

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DO RESFRIAMENTO EM
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

William Hackenhaar

Tese de Doutorado

Porto Alegre, Dezembro de 2020

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DO RESFRIAMENTO EM
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

por

William Hackenhaar
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Coorientador: Prof. PhD Gianni Campatelli, MTRL/DIEF/UNIFI

Aprovada por:

Prof. Dr. Afonso Reguly.....PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez.....PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho.....FEMEC/UFU

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 14 de Dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelos equipamentos, estrutura, consumíveis, equipe e professores pelas contribuições e amizade. Também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior CAPES pelo suporte e bolsa de doutorado regular e sanduíche na Universidade de Florença – Itália, sob o projeto CAPES - PDSE [88881.189938/2018-01].

A minha mãe Lurdes N. Hackenhaar, pai Milton J. Hackenhaar (*in memoriam*), irmã Vivien Hackenhaar e namorada Kelin C. Martin pelo apoio incondicional.

Agradeço especialmente ao meu orientador Prof. Dr. José A. E. Mazzaferro pela orientação, paciência, confiança, conhecimento, amizade e exemplo durante todos os anos no LS&TC.

Ao coorientador Prof. PhD Gianni Campatelli pelo acolhimento, orientação, oportunidades e amizade.

Ao grupo da Universidade de Florença, em especial ao PhD Filippo Montevicchi.

Aos Professores do LS&TC: Prof. Dra. Cintia C. P. Mazzaferro, Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez e Prof. PhD Ivan G. Machado pela amizade, apoio, confiança, conversas no laboratório e ajuda.

Aos meus amigos, familiares e em especial aos colegas, alunos e técnicos que conheci e convivi durante essa jornada.

RESUMO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo de fabricação que integra as características da manufatura aditiva e da tradicional tecnologia de soldagem. Apresenta-se como uma tecnologia promissora para a fabricação de grandes componentes metálicos, baixos custos, depósitos em três dimensões, diversidade de materiais de adição e alta eficiência de deposição. Com o emprego de projeto de experimentos, inicialmente se avaliou a geometria resultante da combinação dos parâmetros. Então parâmetros do processo GMAW foram variados, formas de onda, metais de adição, tempos de inatividade entre depósitos e resfriamento com jato de ar versus convecção natural. Os resultados obtidos foram ciclos térmicos e propriedades mecânicas como resistência à tração, dureza e de forma macro a microestrutura. As formas de onda foram: pulsado sinérgico, Convencional, Sinérgico, Polaridade Variável (PV), “*Cold Metal Transfer*” (CMT) e “*Low Spatter Control*” (LSC). Os resultados do ensaio de tração não apresentaram diferenças significativas para o eletrodo AWS ER70S-6, diferente do AWS ER110S-G no qual a forma de onda da corrente teve influência. Esse comportamento seguiu para a dureza HV. O modo PV apresentou os maiores resultados de tensão máxima para o eletrodo AWS ER110S-G, porém os depósitos produzidos apresentaram algumas descontinuidades. A microestrutura resultante para o eletrodo AWS ER110S-G foi mais refinada quando comparada ao AWS ER70S-6. Para a liga de aço AISI H13, a transferência por CMT apresentou menores modificações na microestrutura e grãos mais refinados, enquanto a menor taxa de resfriamento foi mostrada no modo LSC. A resistência à tração por CMT é ligeiramente menor em comparação ao PS e LSC. Para mitigar o acúmulo de calor devido ao elevado aporte térmico, aplicou-se um jato de ar durante a deposição, comparando seu efeito com a convecção natural. Os dados da superfície destacaram que o resfriamento com jato de ar resultou no aumento da altura dos depósitos entre 0,5 mm e 2,0 mm, e na redução da eficiência de deposição em até 10%, causada por uma maior irregularidade superficial. Na sequência se realizou uma análise do desempenho da imposição do jato de ar por meio de uma abordagem numérico-experimental híbrida. Os resultados indicaram que o jato de ar limita o aumento progressivo da temperatura entre camadas em comparação ao resfriamento por convecção natural. A partir dos resultados, o tempo de inatividade de 30 s mostrou o melhor compromisso entre produtividade e a redução do acúmulo de calor.

Palavras-chave: Manufatura aditiva ao arco elétrico; WAAM; GMAW; Propriedades mecânicas; Resfriamento a jato de ar; Tempo de inatividade entre camadas; Forma de onda.

ABSTRACT

The additive manufacturing by arc deposition (MADA) is a manufacturing process that integrates the characteristics of additive manufacturing and traditional welding technology. It presents itself as a promising technology for the manufacture of large metallic components, low costs, deposits in three dimensions, diversity of filler materials and high deposition efficiency. Using the design of experiments, the geometry resulting from the combination of parameters was initially evaluated. Then GMAW process parameters were varied, waveforms, filler metals, idle times between deposits and air-jet cooling versus natural convection. The results obtained were thermal cycles and mechanical properties such as tensile strength, hardness and a macro approach of the microstructure. The waveforms were: Pulsed Synergic (PS), standard manual, standard synergic, Variable Polarity (PV), Cold Metal Transfer (CMT) and Low Spatter Control (LSC). The results of the tensile test showed no significant differences for the AWS ER70S-6 electrode, unlike the AWS ER110S-G in which the current waveform had an influence. This behavior followed for HV hardness. The PV mode showed the highest results for the ultimate tensile strength using the AWS ER110S-G electrode, however the deposits produced showed some discontinuities. The resulting microstructure for the AWS ER110S-G electrode was more refined when compared to the AWS ER70S-6. For the AISI H13 steel alloy, the CMT mode showed less modifications in the microstructure and more refined grains, while the lowest cooling rate was shown in the LSC mode. The tensile strength by CMT is slightly lower compared to PS and LSC. To mitigate the accumulation of heat due to the high thermal input, an air jet was applied during deposition, comparing its effect with natural convection. The surface data highlighted that cooling with an air jet resulted in an increase in the height of the deposits between 0.5 mm and 2.0 mm, and a reduction in deposition efficiency by up to 10%, caused by a greater surface irregularity. Next, an analysis of the performance of the imposition of the air jet was performed using a numerical-experimental hybrid approach. The results indicated that the air jet limits the progressive increase in temperature between layers compared to cooling by natural convection. From the results, the 30-second downtime showed the best compromise between productivity and the reduction of heat accumulation.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing; WAAM; GMAW; Mechanical properties; Air-jet cooling; Idle time between layers; Waveform.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Propriedades mecânicas	12
3.2	Geometria dos depósitos	15
3.3	Processo GMAW	16
3.4	Projeto de experimentos Box-Behnken.....	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Geometria do cordão e Propriedades Mecânicas AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G ...	23
4.2	Propriedades mecânicas AISI H13.....	31
4.3	Resfriamento com jato de ar versus convecção natural em WAAM	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Resultados: estudo preliminar dos parâmetros de processo	44
5.2	Resultados: propriedades mecânicas AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G	53
5.3	Propriedades mecânicas AISI H13.....	76
5.4	Resultados: resfriamento com jato de ar versus convecção natural em WAAM.....	90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
7	CONCLUSÕES	100
7.1	Geometria do cordão e propriedades mecânicas AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G..	100
7.2	Propriedades mecânicas AISI H13.....	101

7.3	Resfriamento com jato de ar versus convecção natural em WAAM	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		104
APÊNDICE A	Testes Preliminares AWS ER70S-6.....	117
APÊNDICE B	Dureza HV G1 - G6.....	119
APÊNDICE C	Otimização de Parâmetros.....	122
APÊNDICE D	Resultados Ensaio de Tração.....	124
APÊNDICE E	Oscilogramas de Corrente e Tensão do Arco.....	125
APÊNDICE F	Microestruturas.....	127
APÊNDICE G	Corpos de Prova Ensaio de Tração.....	129
APÊNDICE H	Gráficos Tensão–Deformação AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G..	130
APÊNDICE I	Variação da Microdureza HV.....	132
APÊNDICE J	Gráficos de Tensão – Deformação AISI H13.....	134
APÊNDICE L	Corpos de Prova Ensaio de Tração AISI H13.....	135
APÊNDICE M	Microestruturas AISI H13.....	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma esquemático resumido.....	2
Figura 2	Fluxograma esquemático com principais tópicos.....	3
Figura 3	(a) Hélice de navio com 1,35 m de diâmetro de Ni-Al-Bronze e 400 kg. [RAMLAB, 2017]. (b) Exemplos de peças produzidas por WAAM CMT [Williams et al., 2016].....	6
Figura 4	(a) Acúmulo de calor em depósitos por WAAM. (b) Posição dos resfriadores e exemplo experimental. [Henckell et al., 2017].....	8
Figura 5	Sistema de resfriamento dos cordões depositados. [Montevecchi et al., 2017b]..	9
Figura 6	Exemplos de objetos produzidos por CMT. Da esquerda para direita em aço sem liga, aço inoxidável, alumínio e cobre. [Posch et al., 2017].....	10
Figura 7	Forma de onda. (a) Modo CMT. (b) Modo LSC (linha contínua) e Curto-Circuito Convencional (linha tracejada). Detalhe da poça de fusão para o modo LSC. Corrente (I) em vermelho e tensão do arco (U) em cinza. [Fronius International GmbH., 2014].....	18
Figura 8	Formas de onda com corrente e tensão do arco. (a) Pulsado sinérgico (PS). (b) Polaridade Variável (PV).....	19
Figura 9	(a) deposição sendo realizada para a chapa de 6,35 mm. (b) Primeiro cordão depositado e termopares tipo-K. (c) Cordões depositados.....	24
Figura 10	(a) Medidas da geometria (mm). (b) Vista superior com posição dos termopares 1, 2 e 3 (mm).....	27
Figura 11	(a) Cordões depositados para os quatro grupos. (b) Empilhamentos com laterais usinadas.....	28
Figura 12	(a) Vista geral do aparato experimental PV. (b) Cordões depositados PV com metal base deformado, relógios comparadores e termopares.....	29
Figura 13	(a) Máquina de ensaio de tração com corpo de prova. (b) Medidas do corpo de prova para tração. (c) Representação dos corpos para tração retirados dos depósitos.....	30
Figura 14	Amostras do Topo (I), Meio (II) e Base (III) para os grupos G1 a G4 retiradas dos corpos de prova para tração. Amostras para microdureza e micrografia.....	31

Figura 15	Amostras para ensaio de dureza e micrografia. (a) Pulsado sinérgico (G5). (b) Sinérgico (G6).....31
Figura 16	(a) Dimensões gerais. (b) Região de remoção das amostras para teste de dureza. (c) Região de amostras transversal. (d) Dimensões das amostras para testes de tração. (e) Fabricação das amostras de H13 para teste de tração.....33
Figura 17	(a) Vista geral dos depósitos por CMT, LSC e PS, respectivamente. (b) Corpos de prova para tração antes e depois do ensaio. (c) Amostras removidas do corpo de prova de tração AISI H13 e montadas em resina (Modo CMT).....33
Figura 18	(a) Esquema de posicionamento dos termopares. (b) Exemplo de uma deposição completa com os termopares no substrato.....35
Figura 19	Geometrias e termopares do experimento.....36
Figura 20	(a) Amostra em deposição utilizando o resfriamento com jato de ar. (b) Sistema de resfriamento proposto. (c) Posição relativa do jato de ar-parede.....36
Figura 21	(a) Layout da medição superficial dos depósitos com ponteira cônica. (b) Medição da altura dos depósitos com ponteira esférica.....38
Figura 22	(a) Superfícies medidas - teste 1. (b) Planos usados para calcular o EWW e TWW.....38
Figura 23	Modelo de EF para os casos teste.....43
Figura 24	Deposições iniciais verificando a viabilidade do empilhamento vertical. Modo Pulsado Sinérgico com eletrodo AWS ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro.....45
Figura 25	Gráficos de contorno para a área do reforço. Variação de W , v e DBCP.....46
Figura 26	Gráficos de contorno para o ângulo do cordão. Variação de W , v e DBCP.....46
Figura 27	(a) $W = 6,0$ m/min; $v = 2,0$ mm/s; DBCP = 20 mm. (b) $W = 7,5$ m/min; $v = 4,2$ mm/s; DBCP = 17,5 mm. (c) $W = 6,1$ m/min; $v = 3,7$ mm/s; DBCP = 16 mm.....47
Figura 28	Combinação de parâmetros para o cordão com parede de menor área. Linha vermelha delimita o ângulo do cordão, pontilhada 80° e sólida 120°. Linha verde delimita a área do reforço, pontilhada 8 mm ² e sólida 12 mm ²48
Figura 29	Otimizações para a forma de onda pulsado sinérgico.....49
Figura 30	Depósito com 10 e 5 cordões para maior área de reforço (esquerda). Depósito com 5 e 10 cordões para menor área de reforço (Direita).....50
Figura 31	Macrografia dos empilhamentos. (a) Otimização para maximizar área do reforço, com 10 cordões. (b) Otimização para maximizar área do reforço, com 5

	cordões. (c) Otimização para minimizar área do reforço, com 10 cordões. (d) Otimização para minimizar área do reforço, com 5 cordões.....	50
Figura 32	(a) G1 – Pulsado sinérgico - cordão n° 3. (b) G2 – Pulsado sinérgico – cordão n° 4. (c) G3 – Sinérgico – cordão n° 3.....	51
Figura 33	(a) Corpos de prova após o ensaio de tração. G1-1 Topo; G1-2 Meio; G1-3 Base. Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6. (b) Amostras para ensaio de dureza HV. G1-3 Base, G1-2 Meio e G1-1 Topo, respectivamente.....	54
Figura 34	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G1 Pulsado Sinérgico.....	54
Figura 35	Variação da microdureza (HV). G1 Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6.....	55
Figura 36	Microestrutura Topo G1 Pulsado Sinérgico AWS ER70S-6. Aumento de 50 X. (a) Ponto 16 – 188,0 HV. (b) Ponto 11 – 177,8 HV. (c) Ponto 10 – 169,6 HV. (d) Região de transição de microestruturas, aumento 20 X, Ponto 16 com 188,0 HV (esquerda) e ponto 10 com 169,6 HV.....	56
Figura 37	Microestrutura para o eletrodo AWS ER70S-6 na região do Meio G1 Pulsado Sinérgico. (a) Ponto 11, dureza média 171,8 HV. (b) Ponto 19, dureza máxima de 177 HV.....	56
Figura 38	(a) Corpos de prova após o ensaio de tração. G2-1 Topo; G2-2 Meio; G2-3 Base. Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6. (b) Amostras para ensaio de dureza HV. G2-3 Base, G2-2 Meio e G2-1 Topo, respectivamente.....	57
Figura 39	Região de transição da microestrutura grosseira para refinada. Dureza dos pontos 18 = 206 HV (esquerda) e 17 = 197 HV (direita) com aumento de 10 X. Pulsado sinérgico G2 Topo, AWS ER70S-6.....	58
Figura 40	(a) Valores máximos de dureza de 199 HV para ambos os pontos 19 (direita) e 20 (esquerda), aumento 20 X. (b) Ponto 20 com dureza de 199,8 HV. (c) Microestrutura com valor médio de dureza para o topo, de 174 HV.....	60
Figura 41	Ponto 16 = 183 HV (esquerda) e 15 = 164 HV (direita) G4 Convencional. Região de transição na amostra de topo. Aumento de 20 X.....	61
Figura 42	(a) Ponto 16 = 176,1 HV Base G4 Convencional. (b) Ponto 18 = 166,1 HV Meio G4. Aumento 50 X.....	62
Figura 43	Média dos valores medidos de dureza (HV). Eletrodo AWS ER70S-6 0,8 mm.	62
Figura 44	Tensão de escoamento (MPa) vs Tensão máxima (MPa) vs Dureza (HV). Eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.....	63

Figura 45	Máxima tensão (MPa) versus Energia de soldagem (J/mm). Eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.....	64
Figura 46	AWS ER110S-G. (a) Figura ilustrativa dos relógios comparadores no metal base após a deposição dos cordões. (b) 25 cordões depositados o modo pulsado sinérgico com indicação dos termopares no metal base.....	64
Figura 47	(a) 25 depósitos, pulsado sinérgico G5 AWS ER110S-G. (b) Corpos de prova antes e após o ensaio de tração.....	65
Figura 48	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER110S-G. G5 Pulsado Sinérgico.....	65
Figura 49	Sinérgico G6. AWS ER110S-G. (a) 25 cordões depositados. (b) Corpos de prova para ensaio de tração antes e depois do teste, separados em topo, meio e base...	66
Figura 50	Oscilogramas de corrente e tensão. Polaridade Variável. AWS ER110S-G.....	67
Figura 51	Deposições com polaridade variável. Eletrodo AWS ER110S-G. (a) Vista lateral. (b) Indicação da altura média de 50 mm para 25 cordões depositados....	67
Figura 52	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER110S-G. G7 Polaridade Variável.....	68
Figura 53	Ensaio de tração Polaridade Variável. (a) Corpos de prova antes e depois do ensaio. (b) Corpo de prova 2 (meio) indicando porosidade. (c) Fratura inclinada.....	69
Figura 54	Deposição dos cordões com o eletrodo AWS ER110S-G. Aparato experimental para aquisição de temperatura e deformação.....	70
Figura 55	Deformação medida pelos relógios comparadores. Eletrodo AWS ER110S-G. Pulsado Sinérgico G5; Sinérgico G6; Polaridade Variável G7.....	71
Figura 56	Gráfico com temperaturas máximas para os grupos G5, G6 e G7. Eletrodo AWS ER110S-G. Termopar a 10 mm do centro do cordão.....	71
Figura 57	Gráfico comparativo das tensões obtida no ensaio de tração. AWS ER110S-G.	72
Figura 58	Média das tensões para o eletrodo AWS ER110S-G.....	73
Figura 59	Gráfico com durezas para o modo pulsado sinérgico G5.....	73
Figura 60	Microestruturas com 50 X para o Topo I G5 Pulsado Sinérgico. (a) Ponto 10 – 250,7 HV. (b) Ponto 7 – 277,1 HV.....	74
Figura 61	Microestruturas com 50 X para o Topo G6 Sinérgico. (a) Ponto 13 – 260,0 HV. (b) Ponto 9 – 265,9 HV.....	75
Figura 62	Valores médios de dureza (HV) para topo, meio e base. AWS ER110S-G.....	76

Figura 63	Dimensão dos depósitos. (a) Altura. (b) Largura.....	77
Figura 64	Média dos valores de potência para CMT, LSC e PS. (a) Corrente (A). (b) Tensão do arco (V). (c) Energia (J/s).....	78
Figura 65	Comportamento da corrente (A) e tensão do arco (V) enquanto novas camadas são depositadas.....	79
Figura 66	Ciclos térmicos para CMT, LSC e PS.....	80
Figura 67	Temperaturas máximas para cada camada de acordo com CMT, LSC e PS.....	81
Figura 68	(a) Ensaio de tração para o modo CMT com AISI H13. (b) Média da tensão de tração máxima com H13 para CMT, LSC e PS.....	82
Figura 69	Três regiões macro características (Grosseira, parcialmente refinada e refinada). (a) CMT Topo ponto 13 – 755 HK (50 X). (b) LSC meio ponto 17 – 756 HK (50 X).....	84
Figura 70	(a) Perfil de dureza Knoop para CMT, LSC e PS.....	84
Figura 71	Resultados de Dureza Knoop para as amostras da base, meio e topo. Valores médios, mínimos e máximos para CMT, LSC e PS.....	86
Figura 72	Zona de grãos refinados. (a) CMT meio 28 – 756 HK. (b) LSC meio 10 – 746 HK. (c) PS meio 10 – 752 HK. 500 X.....	86
Figura 73	Zona de grãos grosseiros, amostras do meio. (a) CMT 27 – 747 HK. (b) LSC 11 – 749 HK. (c) PS 12 – 748 HK.....	88
Figura 74	Taxas de resfriamento para CMT, LSC e PS.....	89
Figura 75	(a) Camadas depositadas sem resfriamento. 1 - 120 s. 3 - 30 s. 5 - 10 s. (b) Tempos ociosos para depósitos resfriados. 2 - 120 s. 3 - 30 s. 6 - 10 s.....	91
Figura 76	Comparação entre o resfriamento padrão e com jato de ar. (a) Inatividade de 120 s. (b) Inatividade de 10 s.....	92
Figura 77	Comparação: Resfriamento com jato de ar – Convecção natural. (a) 30 s. (b) 10 s.....	94
Figura 78	Resultados da análise superficial: (a) Eficiência de deposição. (b) Altura da parede depositada. (c) Desvio aritmético médio.....	95
Figura 79	Comparação dos resultados de simulação e experimentais para inatividade de 120 s (a) TC 2, convecção natural. (b) TC 4, convecção natural. (c) TC 2, jato de ar. (d) TC 4, jato de ar.....	96
Figura 80	Comparação da simulação das temperaturas entre camadas para convecção natural e jato de ar com 120 s de inatividade.....	98

Figura E.1	Pulsado Sinérgico - G1. $W = 7,5$ m/min; $v = 3$ mm/s; DBCP = 20 mm. Depósito 01	125
Figura E.2	Pulsado Sinérgico - G2. $W = 7,5$ m/min; $v = 4$ mm/s; DBCP = 18 mm. Depósito 01.....	125
Figura E.3	Sinérgico - G3. $W = 7,5$ m/min; $v = 3$ mm/s; DBCP = 20 mm Depósito 01.....	125
Figura E.4	Convencional-G4. $W=7,5$ m/min; $v = 4$ mm/s; DBCP=18 mm Depósito 01.....	126
Figura E.5	Oscilogramas de corrente e tensão. Pulsado Sinérgico G5. AWS ER110S-G..	126
Figura E.6	Oscilogramas de corrente e tensão. Sinérgico G6. AWS ER110S-G.....	126
Figura F.1	Microestrutura para o eletrodo AWS ER70S-6 na região da Base G1 Pulsado Sinérgico.....	127
Figura F.2	Microestruturas com 50X para a Base III G5 Pulsado Sinérgico.....	127
Figura F.3	Microestruturas com 50X para o Meio II G5 Pulsado Sinérgico.....	128
Figura F.4	Microestruturas com 50X para o Meio II G6 Sinérgico.....	128
Figura F.5	Microestruturas com 50X para o Base III G6 Sinérgico.....	128
Figura G.1	Corpos de prova G3.....	129
Figura G.2	Corpos de prova G4.....	129
Figura H.1	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G2 Pulsado Sinérgico.....	130
Figura H.2	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G3 Sinérgico.....	130
Figura H.3	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G4 Convencional..	131
Figura H.4	Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER110S-G. G6 Sinérgico.....	131
Figura I.1	Variação da microdureza (HV). G2 Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6.....	132
Figura I.2	Variação da microdureza (HV). G3 Sinérgico. AWS ER70S-6.....	132
Figura I.3	Mapa de dureza (HV) para o modo Convencional G4.....	133
Figura I.4	Gráfico com mapa de durezas para o modo Sinérgico G6.....	133
Figura J.1	Gráfico Tensão vs Deformação. Modo Pulsado Sinérgico (PS). Amostras da Base, Meio e Topo dos depósitos.....	134
Figura J.2	Gráfico Tensão vs Deformação. Modo “ <i>Low Spatter Control</i> ” (LSC). Amostras da Base, Meio e Topo dos depósitos.....	134
Figura L.1	Forma de onda LSC.....	135
Figura L.2	Forma de onda Pulsado.....	135
Figura L.3	Forma de onda CMT.....	135
Figura M.1	Pulsado Topo, n. 13. Ampliação 50 X e 500 X.....	136

Figura M.2	Pulsado Base, n. 9. Ampliação 50 X e 500 X.....	136
Figura M.3	LSC Topo, n. 12. Ampliação 50 X e 500 X.....	136
Figura M.4	LSC Base, n. 11. Ampliação 50 X e 500 X.....	137
Figura M.5	CMT Topo, n. 6. Ampliação 50 X e 500 X.....	137
Figura M.6	CMT Base, n. 9. Ampliação 50 X e 500 X.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros para o modo pulsado sinérgico. Determinação da geometria. AWS ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm. Fonte Fronius.....	25
Tabela 2	Níveis variados para o Box-Behnken, grupos (G1, G2, G3 e G4).....	25
Tabela 3	Tabela com o Box-Behnken e parâmetros de soldagem para as investigações iniciais. Eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.....	26
Tabela 4	Parâmetros para empilhamento com AWS ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm.	27
Tabela 5	Parâmetros variados para polaridade variável no Box-Behnken.....	28
Tabela 6	Matriz de experimentos para geometria do cordão com polaridade variável.....	29
Tabela 7	Composição química do AISI H13.....	32
Tabela 8	Parâmetros medidos para os modos de transferência PS, CMT e LSC.....	34
Tabela 9	Desvio padrão para a Dureza Knoop. Amostras da base, meio e topo.....	34
Tabela 10	Resumo das condições testadas.....	37
Tabela 11	Parâmetros variados para o modo sinérgico pulsado.....	45
Tabela 12	Parâmetros de soldagem para as deposições preliminares com Pulsado Sinérgico.....	49
Tabela 13	Parâmetros para deposição com AWS ER70S-6 0,8 mm.....	52
Tabela 14	Otimização Polaridade Variável.....	53
Tabela 15	Parâmetros de soldagem e resultados de energia. Eletrodo AWS ER110S-G....	53
Tabela A.1	Avaliação de descontinuidades variando 1 parâmetro ao mesmo tempo.....	117
Tabela A.2	Análise de variância. Área do reforço, pulsado sinérgico. AWS ER70S-6 0,8.	117
Tabela A.3	Análise de variância. Média do ângulo de inclinação do cordão. Pulsado sinérgico.....	118
Tabela B.1	Dureza G1 e G2.....	119
Tabela B.2	Dureza G3 e G4.....	120
Tabela B.3	Dureza G5 e G6.....	121
Tabela C.1	1º otimização. Maximizar a área do reforço e inclinação do cordão de 90°.....	122
Tabela C.2	2º otimização. Obter menor área do cordão e ângulo do cordão de 90°.....	122
Tabela C.3	3º otimização. Obter menor área do cordão e ângulo de 90°.....	123
Tabela C.4	4º otimização. Menor área e ângulo de 90°. Peso e importância variados.....	123
Tabela D.1	Resultados de tensão e deformação. Eletrodo ER70S-G.....	124
Tabela D.2	Resultados de tensão e deformação. Eletrodo AWS ER110S-G.....	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
CC+	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DIEF	Departamento de Engenharia Industrial
END	Ensaio Não Destrutivo
LS&TC	Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas – UFRGS
G1	Grupo 1 Pulsado Sinérgico – AWS ER70S-6
G2	Grupo 2 Pulsado Sinérgico – AWS ER70S-6
G3	Grupo 3 Sinérgico – AWS ER70S-6
G4	Grupo 4 Convencional – AWS ER70S-6
G5	Grupo 5 Pulsado Sinérgico – AWS ER110S-G
G6	Grupo 6 Sinérgico – AWS ER110S-G
G7	Grupo 7 Polaridade Variável – AWS ER110S-G
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
HV	Dureza Vickers
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MTRL	Laboratório de Pesquisa em Tecnologias de Manufatura
PV	Polaridade Variável
SAP	Sistema de Aquisição Portátil
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
WAAM	<i>Wire +Arc Additive Manufacturing</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia total ou nominal	[J/mm]
U	Tensão do arco elétrico	[V]
I	Corrente de soldagem	[A]
I _b	Corrente de base	[A]
t _b	Tempo de base	[ms]
I _n	Corrente negativa	[A]
t _n	Tempo negativo	[ms]
I _p	Corrente de pico	[A]
t _p	Tempo de pico	[ms]
η _a	Eficiência térmica do arco	
v	Velocidade de deposição	[mm/s]
MPa	Megapascal	[N/mm ²]
W	Velocidade de alimentação do eletrodo	[m/min]
P	Potência medida pelo SAP	
R ²	Coefficiente de determinação do ajuste estatístico	
A, B, C	Fatores empíricos para calcular o coeficiente de transferência de calor pela imposição do jato de ar	
l	Distância entre o bocal e a superfície alvo	
Nu	Número de Nusselt, ou seja, coeficiente de transferência de calor adimensional	
Ø	Coordenada angular para o cálculo do coeficiente de calor do jato de ar imposto	
r	Coordenada radial para o cálculo do coeficiente de calor do jato de ar imposto	
d	Diâmetro do bocal de ar	
Re	Número de Reynolds para o jato de ar imposto	
α	Ângulo entre o eixo do jato de ar e a superfície alvo	
Δy	Distância do bocal na direção da coordenada y	
Δz	Distância entre o bocal e a tocha na direção da coordenada z	

1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação por manufatura aditiva ao arco + eletrodo, do inglês “*Wire + Arc Additive Manufacturing*” (WAAM), divide a fabricação do componente em sucessivas camadas depositadas, estas multicamadas podem ser depositadas por processos de soldagem tradicionais ou não-convencionais. É possível fabricar peças com geometrias complexas ou com materiais de alto custo, os quais seriam impraticáveis pelos processos tradicionais ou com custos elevados. Componentes com mais que 10 kg podem ser fabricados utilizando materiais como aço, alumínio, titânio e outros [Williams et al., 2016]. Outro ponto positivo é a possibilidade de automação do processo produtivo, diminuindo o tempo de produção e as diversas etapas que o componente está sujeito na manufatura tradicional. No processo por manufatura aditiva se objetiva a obtenção da geometria final do componente, diferente dos processos tradicionais onde geralmente se parte de um bloco do qual o material é removido.

O aparato básico para a manufatura aditiva envolve uma fonte de calor (arco elétrico), sistema de movimentação (robô) e material de adição (arame) para fabricar o componente. Em geral a fabricação por WAAM é indicada para componentes de média a grande escala, e com geometrias de baixa a média complexidade. Também pode ser usado na recuperação de componentes com desgaste ou fratura, oferecendo diversas possibilidades para combinar metal de adição, metal base, modo de transferência do metal, tratamentos térmicos, etc.

A área de pesquisa em manufatura aditiva está em desenvolvimento e expansão em diversos laboratórios em universidades e institutos de pesquisa em países referência na área de pesquisa de novas tecnologias. Essa área de pesquisa está diretamente ligada a indústria 4.0 [Xu, 2017] se enquadrando como tema com grande potencial para inovação e desenvolvimento.

A versatilidade da manufatura aditiva integrada com o sensoriamento, comunicação com outras máquinas, algoritmos de otimização, programas para projeto e simulação aumentam periodicamente a possibilidade de novos segmentos industriais de aplicação. No caso de WAAM em específico, oferece potencial para esculturas e trabalhos artísticos, e principalmente na fabricação de componentes de grande porte e manutenção híbrida com adição-remoção de material integrada.

Com a maturação da tecnologia, custos devem diminuir, trazendo competitividade e novas possibilidades no projeto e reparo de componentes. Entre os setores beneficiados estão o espacial, aeronáutico, médico, farmacêutico, energético, nuclear, customizados, construção, naval, petrolífero, mineração, agrícola, rodoviário, automobilístico, entre outros.

2 OBJETIVOS

Entre os objetivos deste trabalho estão o estudo das propriedades mecânicas e resfriamento em manufatura aditiva com depósitos ao arco elétrico. Inicialmente, verificou-se os efeitos da variação dos parâmetros do processo, para a execução dos experimentos se utilizou a metodologia de projeto de experimentos Box-Behnken. Avaliou-se os parâmetros geométricos do cordão depositado, como largura, área fundida e área do reforço. Nesse estudo inicial a geometria do cordão foi avaliada para o modo de transferência do metal em duas situações, primeiramente por projeção (pulsado sinérgico) e curto-circuito (sinérgico e convencional), determinando-se as faixas de combinação dos parâmetros do processo.

Entre as principais contribuições desse trabalho estão o efeito de algumas variações das formas de onda do processo GMAW aplicadas a WAAM, entre eles os modos pulsado, convencional, sinérgico, polaridade variável, CMT[®] e LSC[®]. Foram comparados diferentes metais de adição e avaliadas propriedades como resistência à tração, geometria do cordão, dureza, acabamento superficial, ciclos térmicos e realizadas caracterizações macrográficas e micrografias. Também se avaliou o efeito do resfriamento com jato de ar e convecção natural nas propriedades mecânicas e geométricas dos depósitos. Verificou-se o efeito dos tempos de inatividade (espera) entre depósitos no acúmulo de calor e estabilidade dos depósitos. Finalmente, um modelo numérico-experimental em elementos finitos (EF) foi aplicado para validar o efeito do resfriamento com jato de ar durante a deposição das camadas.

As atividades desenvolvidas com vistas aos objetivos do trabalho são representadas de forma resumida pelo fluxograma esquemático na Figura 1. Adicionalmente, o fluxograma ilustrativo com os principais tópicos estudados no trabalho está ilustrado na Figura 2.

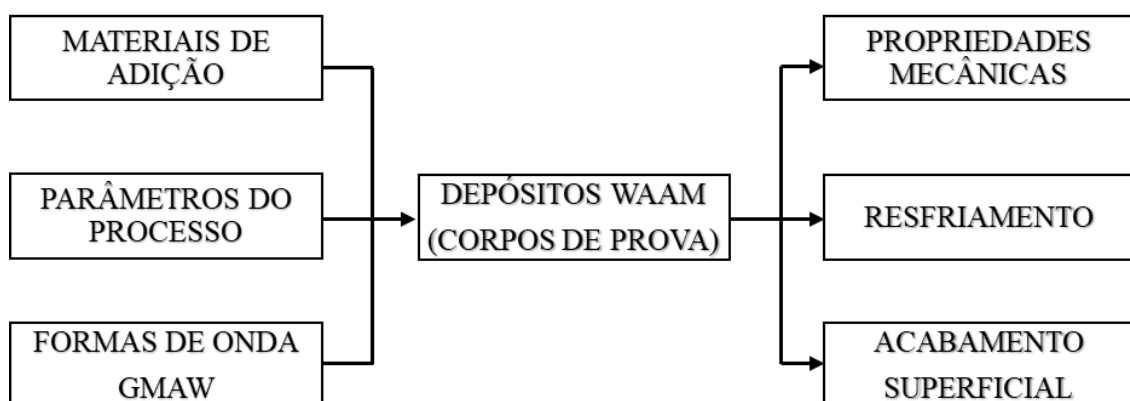


Figura 1 – Fluxograma esquemático resumido.

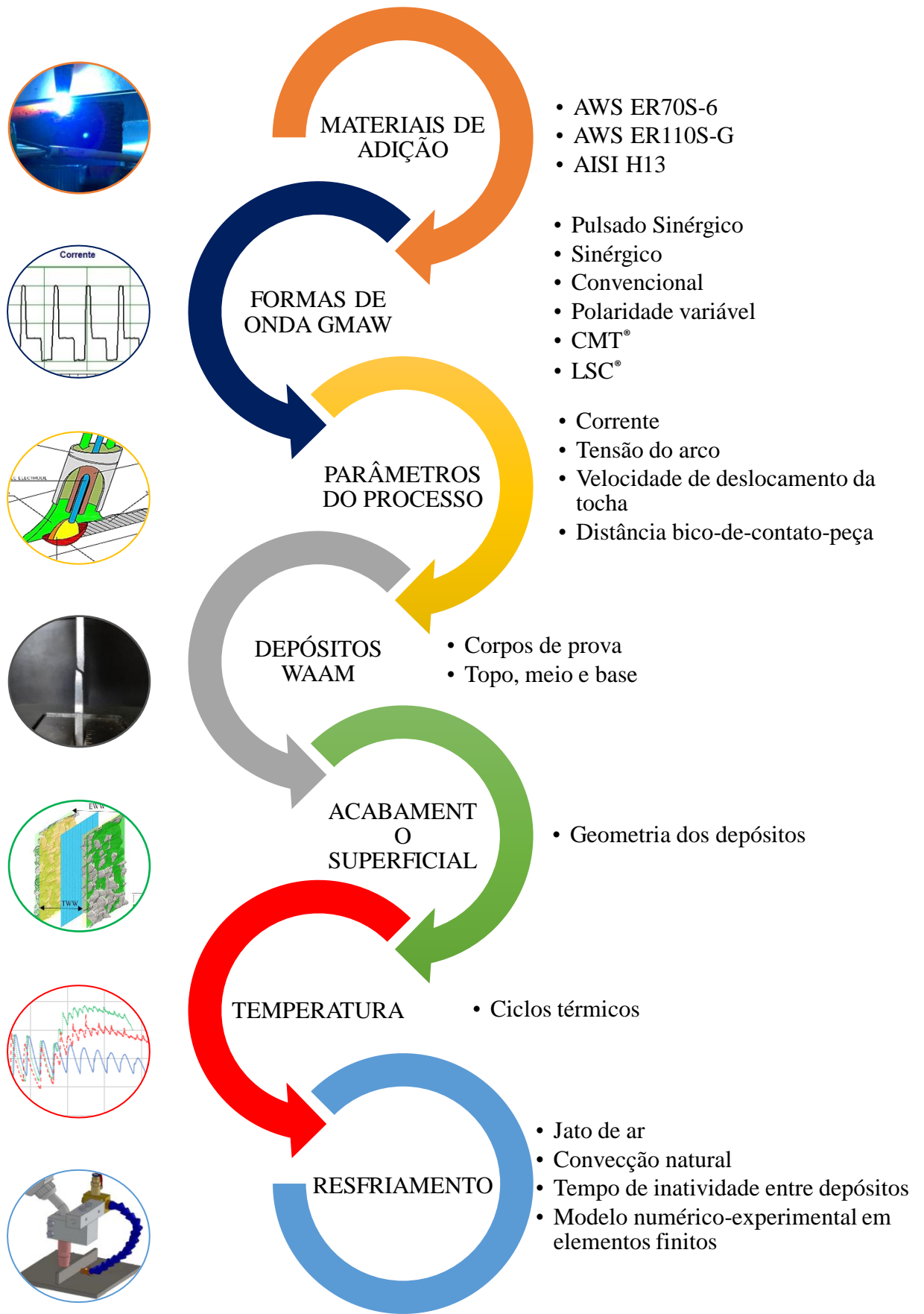


Figura 2 – Fluxograma esquemático com principais tópicos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia inovadora e promissora no cenário mundial de fabricação. A possibilidade de manufatura e o reparo de peças metálicas com geometria complexa e materiais de difícil usinagem a torna competitiva em relação aos processos subtrativos existentes. Esforços vem sendo feitos com o intuito de popularizar a manufatura aditiva nos segmentos aeroespacial [Ding et al., 2011], automotivo [Mueller; Mueller, 2000] e na prototipagem rápida de ferramentas [Levy et al., 2003], onde a fabricação de peças metálicas de geometria complexa apresenta elevado custo, em especial quando envolve o uso de materiais nobres como ligas de titânio e níquel. Do ponto de vista econômico, a aplicação das tecnologias por MA é benéfica quando aplicada à produção de pequenos lotes ou quando é necessária uma “customização em massa” do produto [Wohlers et al., 2018]. Ultimamente, o desenvolvimento da MA tem sido fortemente apoiado pela transição para o paradigma da Indústria 4.0 [Xu, 2017]. Além disso, a recente crise do COVID-19 mostrou o potencial de tecnologias de MA, quando se fazem necessárias e urgentes peças sobressalentes ou novas [Petch, 2020].

A principal tecnologia usada para MA para metais é, na verdade, a abordagem por “*powder-bed*”, caracterizada pela possibilidade de criar formas muito complexas, mas com baixa produtividade e pequena dimensão. Nos últimos anos, foram desenvolvidas abordagens alternativas, como os métodos de Deposição Direta de Energia (DDE). Eles usam estratégias diferentes para fundir o metal de adição, principalmente pó ou eletrodo, e criar um cordão de metal fundido em um substrato. As principais abordagens usam laser, feixe de elétrons e arco elétrico como fontes de energia/deposição. Em geral, o uso de pó permite obter uma melhor precisão a uma taxa de deposição mais baixa, enquanto o uso de arame permite obter um processo mais rápido, mas menos preciso [Cunningham et al., 2018]. A vantagem das abordagens de DDE é que permitem não apenas a produção de novos componentes, mas também o reparo de peças de alto custo, como pás de turbinas ou matrizes de estampagem. O processo de fabricação por manufatura aditiva com arco + eletrodo, do inglês “Wire + Arc Additive Manufacturing” (WAAM), divide a fabricação do componente em sucessivas camadas depositadas, estas multicamadas podem ser depositadas por processos de soldagem tradicionais ou aperfeiçoados (não-convencionais) [Ding et al., 2015a].

A produção de componentes através da manufatura aditiva arco + eletrodo possibilita a produção de peças através de processos de soldagem tradicionais, oferece bom controle

dimensional e a fabricação de peças sem a necessidade de algum tipo de molde, como é necessário em fundição, ou matriz no caso da conformação mecânica. A fabricação de componentes via manufatura aditiva com os processos de soldagem apresenta grande potencial nessa área [Alberti et al., 2014]. O aspecto superficial do componente é afetado por uma ondulação relevante, onde em alguns casos operações de usinagem são necessárias para se obter o acabamento superficial necessário. A otimização do acabamento superficial é exemplificada no trabalho de [Youheng et al., 2017] com o uso do projeto de experimentos Box-Behnken em aços bainíticos para WAAM. Em geral o componente produzido por WAAM é próximo ao formato final “*near-net-shape*”. Comparada com métodos subtrativos de fabricação (como a usinagem, por exemplo), a MA apresenta algumas vantagens: é possível automatizar o processo de produção via MA, começando pelo projeto CAD à fabricação em CAM, reduzindo o tempo de produção e intervenção humana. Ainda, é possível a fabricação de peças únicas de geometria complexa que seriam impossíveis de produzir por rotas convencionais de fabricação [Ding et al., 2015]. Ainda, WAAM é interessante pela fácil integração dessa tecnologia em uma máquina-ferramenta para criar uma máquina híbrida aditiva-subtrativa, solução já disponível no catálogo de alguns dos mais populares fabricantes de máquinas-ferramenta [MAZAK Corporation, 2020].

WAAM é basicamente um processo de soldagem 3D baseado em “*Gas Metal Arc Welding*” (GMAW) que usa um eletrodo de metal e um arco elétrico para criar um cordão de deposição. Entre as vantagens está a possibilidade de criar peças de grande porte, até alguns metros como a hélice de navio fabricada pela RAMLAB, Figura 3 (a) [RAMLAB, 2017]. Também apresenta elevadas taxas de deposição, obtendo uma economia significativa de material em comparação com tecnologias tradicionais [Campatelli et al., 2019; Cunningham et al., 2018]. Para os modos de transferência padrão em GMAW é de cerca de 3-4 kg/h, no modo tandem em torno de 6-8 kg/h, enquanto que para CMT de 2-3 kg/h [Wu et al., 2018a]. Para materiais específicos como alumínio e aço a taxa de deposição por WAAM pode chegar a 1 kg/h e 4 kg/h, respectivamente [Williams et al., 2016], Figura 3 (b). A taxa de deposição por laser ou feixe de elétrons é da ordem de 2-10 g/min, podendo chegar a 800 g/min com o devido controle do calor [Suryakumar et al., 2013]. Para aumentar a taxa de deposição Qi et al. [Qi et al., 2019] desenvolveram uma solução que utiliza uma combinação de eletrodos duplos (7 mm de espessura de parede) que requer um tempo ocioso de 60 s com eletrodo de alumínio 2024, usando resfriamento por convecção natural. O elevado aporte térmico transmitido exigiu posterior tratamento térmico e envelhecimento para aprimorar as propriedades mecânicas da

peça. Para processos que requerem alimentação lateral do eletrodo (rotação da tocha ou do sistema de alimentação do eletrodo) como “*Gas Tungsten Arc Welding*” (GTAW) e “*Plasma Arc Welding*” (PAW), as taxas de deposição são de cerca de 1-2 kg/h e 2-4 kg/h, respectivamente. O PAW e o GTAW têm uma taxa de fusão intrinsecamente menor que o GMAW. Isso ocorre porque nesses processos o metal de adição não é fundido diretamente pelo arco elétrico, mas é alimentado na poça de fusão que está a uma temperatura mais baixa.

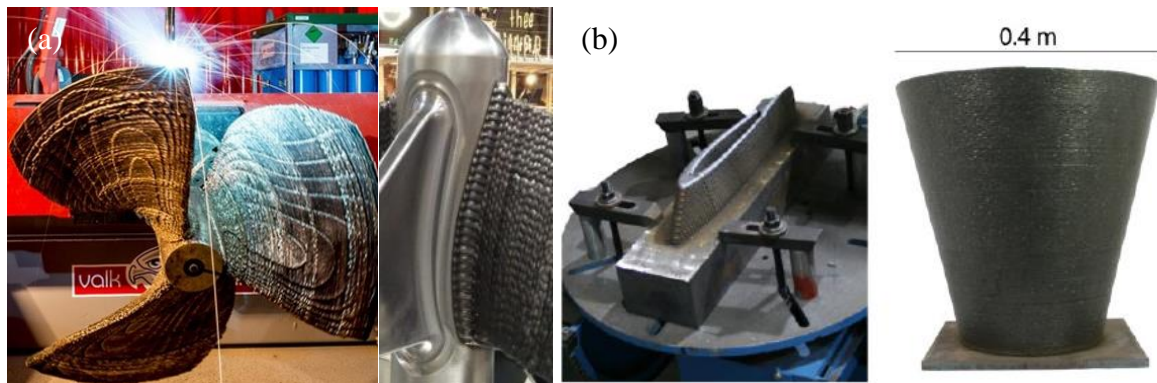


Figura 3 – (a) Hélice de navio com 1,35 m de diâmetro de Ni-Al-Bronze e 400 kg. [RAMLAB, 2017]. (b) Exemplos de peças produzidas por WAAM CMT [Williams et al., 2016].

O aparato básico para a manufatura aditiva envolve uma fonte de calor (arco elétrico), sistema de movimentação (robô, máquinas de 3/5 eixos) e material de adição (eletrodo ou arame) para fabricação do componente. Sistemas adicionais e opcionais para controlar o processo podem ser usados, por exemplo: resfriamento ativo, termocâmeras, termopares, sensores de posicionamento, etc. Como WAAM é frequentemente usado para produzir estruturas com estilo de blocos/paredes com depósito de muitas camadas de metal, a difusão do calor é um dos principais problemas dessa abordagem, Figura 4 (a). A manufatura aditiva baseada em processos GMAW transfere altas energias para a peça, levando ao problema do acúmulo de calor, ou seja, um aumento na energia interna do componente [Wu et al., 2017a]. As consequências são um aumento progressivo da poça de fusão, a fusão excessiva das camadas inferiores e da temperatura de interpasse, isto é, a temperatura da camada superior no início da deposição subsequente. Esse fenômeno ocorre porque o modo de resfriamento preferencial da poça de fusão é por condução de calor em direção ao substrato. Aumentar o número de camadas depositadas diminui a magnitude do fluxo de calor conduzido, gerando o acúmulo de calor. Este efeito tem várias consequências: i) propriedades não homogêneas do material ao longo da direção vertical de deposição [Ge et al., 2018; Wang et al., 2016]; ii) colapso estrutural da peça; iii) modificação da largura e geometria do cordão [Xiong et al., 2018a].

Tais efeitos resultam em uma modificação da geometria das camadas [Wu et al., 2018a; Xiong et al., 2018a] e da microestrutura do material [Wang et al., 2016; Wu et al., 2018c], especialmente ao longo da altura depositada [Prado-Cerqueira et al., 2017]. De acordo com Wu et al. [Wu et al., 2018a], em partes bimetálicas a deformação e a tensão residual são importantes devido à diferença de material na expansão térmica, onde as temperaturas entre depósitos podem desempenhar um papel importante para mitigar esse problema.

O método mais difundido para evitar a acumulação de calor é introduzir tempos de espera “*idle time*” entre os depósitos para resfriar a peça até temperaturas adequadas [Lei et al., 2018; Montevecchi et al., 2018a]. Essa abordagem tem um efeito prejudicial sobre a produtividade, já que atingir a temperatura necessária entre camadas através da convecção natural requer longos períodos de inatividade. Uma solução para diminuir o tempo ocioso entre camadas é usar sistemas de resfriamento ativo que aumentam a transferência de calor para o ambiente, isto é, o coeficiente de transferência de calor por convecção. Uma das consequências do controle da temperatura de resfriamento das regiões depositadas é que altas taxas de resfriamento levam a altas taxas de nucleação [Wu et al., 2017b], resultando em grãos refinados. [Takagi et al., 2015] imergiram o componente em um tanque de água de refrigeração. [Reddy et al., 2019a] propuseram uma técnica baseada no resfriamento controlado do substrato aquecido, com o objetivo de obter propriedades homogêneas ao longo da direção vertical. [Li et al., 2018] implementaram um sistema de resfriamento termoelétrico baseado no efeito Peltier para resfriar as superfícies laterais de uma parede vertical, isto é, um componente com depósitos lineares. A solução proposta proporcionou uma redução significativa da irregularidade dos cordões, tamanho dos grãos e tempo de fabricação, mas sua aplicação em geometrias curvas complexas não é de simples implementação. Um jato de CO₂ direcionado para a superfície superior da última camada depositada para construir uma parede vertical do material Ti6Al4V foi utilizado por [Wu et al., 2018b], isto é, uma série de camadas retas. A aplicação de gás adicional para o resfriamento das camadas alterando o regime de tempo-temperatura também foi investigada por [Henckell et al., 2017] no qual gases como argônio, hidrogênio e nitrogênio foram avaliados, Figura 4 (b). A combinação de gás mais efetiva para o resfriamento foi aquela com maior calor específico e condutividade térmica, resultando em melhor capacidade de absorver e dissipar o calor das camadas depositadas [Henckell et al., 2017].

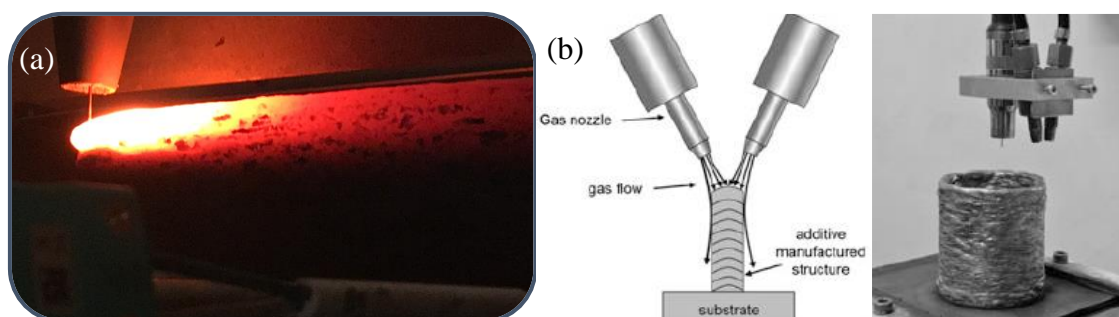


Figura 4 – (a) Acúmulo de calor em depósitos por WAAM. (b) Posição dos resfriadores e exemplo experimental. [Henckell et al., 2017]

Uma abordagem semelhante foi proposta por [Montevecchi et al., 2018b], com duas principais diferenças com [Henckell et al., 2017; Wu et al., 2018b]: i) o uso de ar comprimido padrão no lugar de CO_2 , o que pode reduzir o custo operacional de materiais menos sensíveis à atmosfera de soldagem que o Ti6Al4V e ii) o alvo do jato de ar não é a camada superior, mas as inferiores. Essa abordagem permite ter uma superfície maior para o jato de ar imposto e resulta em uma maior transferência de calor [O'Donovan; Murray, 2007]. A Figura 5 representa o sistema de resfriamento pela imposição de ar nos cordões depositados, proposto por [Montevecchi et al., 2017b]. O sistema é fixado junto a tocha de soldagem, movendo-se em sincronia. Os autores propuseram o uso de um jato de ar comprimido nas camadas previamente depositadas para aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção [Montevecchi et al., 2018b]. A eficácia dessa abordagem foi demonstrada usando uma análise numérica que destacou que a imposição de ar forçado limitou o aumento da temperatura entre os depósitos e o tamanho da poça de fusão. Este sistema apresenta maior facilidade para integração em máquinas para WAAM com diferentes arquiteturas (por exemplo, robôs e máquinas CNC) e também mais adequado para produzir componentes complexos do que as abordagens propostas em [Li et al., 2018; Takagi et al., 2015]. Comparando com a abordagem proposta em [Wu et al., 2018b], o uso de ar no lugar de CO_2 reduz o custo do sistema de refrigeração quando aplicado a materiais que não são altamente sensíveis à atmosfera durante o depósito como o Ti6Al4V. Além disso, a imposição de jatos de ar criam elevados coeficientes de transferência de calor [O'Donovan; Murray, 2007], aumentando a extração de calor.

Um resultado positivo de um resfriamento por ar efetivo durante a deposição de camadas subsequentes, em que o arco elétrico não é extinto nos pontos inicial e final, é mitigar valores e flutuações mais elevados de tensão residual nesse local, conforme indicado por [Li et al., 2019a] na deposição de camadas circulares usando WAAM. O tempo de inatividade entre deposições para possibilitar o resfriamento parcial das amostras realizadas por [Liberini et al.,

2017] foi de 60 s. Avaliou-se o efeito da variação dos parâmetros do processo na macrografia, micrografia e microdureza Vickers para depósitos com o eletrodo AWS ER70S-6.

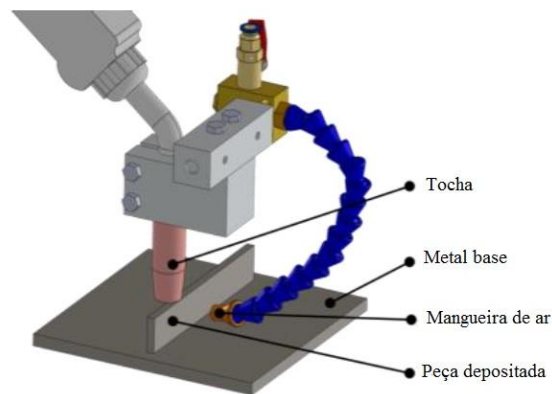


Figura 5 - Sistema de resfriamento dos cordões depositados. [Montevecchi et al., 2017b]

A abordagem para o cálculo do tempo de espera entre cordões para manter a temperatura de interpasse e o tamanho da poça fundida constantes foi feita por [Montevecchi et al., 2017b]. A potencial eficácia do método proposto por [Montevecchi et al., 2018b] foi avaliada usando um modelo validado de transferência de calor pela imposição de jato de ar acoplado com um modelo térmico para o processo WAAM. Os resultados prévios da simulação destacaram que o jato de ar pode impedir um aumento excessivo da temperatura entre camadas, tornando-se uma abordagem promissora para evitar o acúmulo de calor. Modelos computacionais para simular os fenômenos em manufatura aditiva como fonte de calor, extração de calor e propriedades mecânicas utilizando modelos de elementos finitos foram avaliados por [Ding et al., 2015a, 2014; Xiong et al., 2017; Zhao et al., 2017]. A propagação e extração do calor e seus efeitos nas peças depositadas por manufatura aditiva foi avaliada por [Ding et al., 2011; Shen et al., 2017; Xiong et al., 2018b, 2017]. Um estudo usando o método de elementos finitos para uma perfuração a laser por [Moradi; Golchin, 2017].

O estudo do calor transferido para a peça pelo processo TIG aplicado a manufatura aditiva em liga de titânio foi estudado por [Wu et al., 2017b], através de pulsos de corrente com baixa frequência se reduziu o calor transferido. Obteve-se assim o aumento da taxa de resfriamento, refinamento da microestrutura e foi possível realizar a deposição de cordões fora de posição e sem suporte “*unsupported overhangs*”. A diminuição do calor transferido também levou ao aumento da resistência ao escoamento e de ruptura da liga Ti-6Al-4V. Segundo [Wu et al., 2017b] a macroestrutura do cordão depositado depende fortemente do calor transferido e a taxa do tempo de pico do pulso exerce grande influência na poça de fusão. O estudo das

propriedades mecânicas e microestruturas para o processo WAAM também foi abordado por [Lu et al., 2017]. Outras técnicas de deposição direta de metal, baseadas no uso de laser e pó metálico, foram investigadas por [Angelastro et al., 2017]. Uma abordagem interessante é o uso híbrido de arco elétrico-laser proposto por [Näsström et al., 2019], onde um laser seguidor é adicionado a uma tocha CMT para obter melhorias topológicas.

Para deposições subseqüentes no sentido vertical como ocorre em manufatura aditiva a extração de calor ocorre principalmente por condução pelo cordão anterior 1 D, dependendo da geometria e volume de material depositado em relação à energia transferida pelo arco elétrico. Para determinados materiais ou aplicações, como na manufatura aditiva, a transmissão de baixo calor do arco elétrico para a peça oferece muitas vantagens. Pode-se obter a menor taxa de diluição e principalmente a geometria adequada do cordão depositado para produzir depósitos em sequência. Assim, é possível a fabricação de peças com as mais diversas geometrias e complexidades. Devido à forma de onda ou do pulso da corrente de soldagem CMT, que foram concebidas para a transferência do metal em temperaturas menores, ou seja, a gota metálica mais “fria” do que normalmente se obtém nas situações normais onde se busca a completa e perfeita fusão das arestas dos materiais a serem unidos. No trabalho de [Posch et al., 2017] foi realizado um estudo avaliando as propriedades dos materiais depositados pelo processo CMT na fabricação de peças como aço ao carbono, aço inoxidável, alumínio e cobre. A Figura 6 apresenta exemplos de objetos produzidos por [Posch et al., 2017].



Figura 6 - Exemplos de objetos produzidos por CMT. Da esquerda para direita em aço sem liga, aço inoxidável, alumínio e cobre. [Posch et al., 2017].

O processo de manufatura aditiva por arco + eletrodo WAAM, pode utilizar diferentes processos tradicionais de soldagem como fonte de calor, entre eles o processo GMAW, o processo “*Tungsten Inert Gas*” (TIG) e também o processo de soldagem a arco Plasma. Outra alternativa que se tornou popular na área de manufatura aditiva nos últimos tempos foi o processo “*Cold Metal Transfer*” (CMT). O processo CMT, que é uma variação do processo

GMAW, quando comparado aos citados anteriormente oferece benefícios como menor transferência de calor para o componente e elevada taxa de fusão do metal de adição.

Entre os desafios enfrentados pela manufatura aditiva por arco + eletrodo estão as distorções e tensões residuais devido ao elevado calor transferido. Alternativas para reduzir as tensões residuais são a deposição de peças simétricas em uma mesa giratória, uma camada em cada lado, facilitando o controle térmico [Williams et al., 2016]. Outra alternativa é produzir peças com geometrias parecidas, uma em cada lado do metal base, situação semelhante a já citada. A otimização da orientação do componente a ser fabricado em relação ao sentido de deposição e a correta seleção dos parâmetros também favorecem o controle das distorções e tensões residuais.

Métodos para a inspeção e monitoramento dos componentes vem sendo desenvolvidos e adaptados para WAAM, como ensaios não destrutivos (END) e de monitoramento online [Millon et al., 2018; Williams et al., 2016]. Ensaios não destrutivos são usados para inspecionar o formato do cordão e ocorrência de porosidade, como a inspeção por laser ultrassom [Millon et al., 2018]. Sistemas para o monitoramento do tamanho de grão por métodos não destrutivos em materiais policristalinos foram implementados por [Williams et al., 2016], como o uso do método '*spatially resolved acoustic spectroscopy*' traduzido diretamente como espectroscopia acústica resolvida espacialmente. O monitoramento online está relacionado com o acompanhamento de tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de deslocamento da tocha e outros durante a deposição. Métodos para o monitoramento da temperatura do arco e da peça durante a fabricação estão em desenvolvimento [Williams et al., 2016].

O aproveitamento do eletrodo no processo WAAM pode se aproximar de 100 % de eficiência, dependendo da estabilidade da transferência do metal do eletrodo para o metal base. Eficiência essa mais elevada que processos por deposição a pó com sinterização a laser, também não possui as dificuldades de controle do tamanho das partículas do pó, distribuição e contaminação. Outro aspecto positivo do processo WAAM está no custo dos equipamentos quando comparado aos empregados para manufatura aditiva com sinterização a laser ou feixe de elétrons, e na cadeia de fornecedores dos bens de consumo, visto que são os mesmos que a indústria normalmente utiliza para soldagem. Em geral, conforme indicado por [Ding, 2015] o uso de materiais a pó para os diversos métodos de fabricação como sinterização a laser direta do metal, fusão por feixe de elétrons, sinterização a laser seletiva, fusão a laser seletiva, entre outros, correspondem a fabricação de peças com elevada precisão geométrica e complexidade, enquanto com eletrodo (arame) se aumenta a taxa de deposição e o tamanho das peças. No caso

do WAAM se obtêm menor custo e maior produtividade, perdendo-se em precisão geométrica para componentes de alta precisão e qualidade do acabamento quando comparado aos processos citados.

3.1 Propriedades mecânicas

Entretanto, a taxa de deposição e o resfriamento do componente não são as únicas questões a serem abordadas pela comunidade científica em WAAM, amostras com menor tempo de construção, peso do componente e propriedades mecânicas superiores foram geradas por [Moradi et al., 2019] em um estudo da otimização de modelagem da deposição por fusão. Uma melhoria topológica usando o híbrido laser-CMT WAAM, com um feixe de laser seguidor foi realizada por [Näsström et al., 2019]. [Wang et al., 2019] avaliaram o efeito do eletrodo simples e duplo nas propriedades mecânicas de uma liga AlCuSn depositada por WAAM, e a importância do aporte de calor na formação e desempenho das deposições. As propriedades e a microestrutura de uma liga AlMg fabricada por WAAM foram estudadas por [Ren et al., 2019]. [Yang et al., 2019] usando WAAM-CMT em peças de parede fina com o material AlSi7Mg0.6 pesquisaram os efeitos do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas. [Prado-Cerqueira et al., 2018] realizaram depósitos com WAAM-CMT usando o eletrodo AWS ER70S-6 para analisar propriedades mecânicas e metalúrgicas. Diferentes modos do arco elétrico usando WAAM-CMT foram testados na liga de alumínio 5183 por [Fang et al., 2018]. [Shassere et al., 2019] desenvolveram uma abordagem de correção baseada em WAAM para melhorar a conformidade geométrica do cordão usando o módulo “*Surface Tension Transfer*”. Propriedades mecânicas do AWS ER70S-6 depositado por WAAM também foram avaliadas por [Astarita et al., 2019]. O estudo comparou diferentes orientações das amostras em relação à direção de aumento da peça, usando testes de tração e análise de microestrutura, encontrou-se a fase austenítica com pequenos grãos equiaxiais em todas as amostras. O efeito do tamanho da poça de fusão nas propriedades da liga de Ti6Al4V depositado por WAAM foi estudado por [Wu et al., 2017c], afirmando-se que os parâmetros de fabricação influenciam a taxa de resfriamento e o gradiente térmico e podem controlar a formação da morfologia equiaxial dos grãos. Outro trabalho sobre o refinamento de grãos com GTAW aplicado a WAAM foi realizado por Guo et al. [Guo et al., 2016] em uma liga de magnésio modificando a frequência dos pulsos. No estudo de [Syed et al., 2005] que compara as propriedades dos materiais depositados por eletrodo e pó metálico foi encontrado que a microestrutura obtida por ambos

os métodos é similar e para o processo a pó foram encontradas porosidades em algumas amostras.

No contexto de novas estratégias para a fabricação híbrida, [Ambrogio et al., 2019] investigaram a combinação de manufatura aditiva com o processo tradicional de conformação de chapas. Uma aplicação possível é o aumento local da espessura das chapas de metal por MA para reforçar a resistência ou permitir peças mais complexas. O uso da deposição por laser-eletrodos metálicos para produzir paredes delgadas foi estudado por [Demir; Biffi, 2019]; esse processo tem a vantagem de permitir o uso de uma grande variedade de composições de liga e diâmetro do eletrodo. Destaca-se que foi encontrada uma relação entre a taxa de resfriamento e composição química com as propriedades mecânicas da peça produzida, possibilitando um aumento das propriedades mecânicas das ligas de Al adotando os parâmetros corretos. Esse processo é uma alternativa interessante ao WAAM quando pequenos detalhes devem ser produzidos, também é caracterizado por um planejamento de caminho mais complexo devido à alimentação lateral do eletrodo.

As microestruturas em juntas soldadas tradicionais dependem de diversos fatores, como elementos de liga, teor de carbono, tratamentos térmicos, taxa de resfriamento, calor transferido pelo arco elétrico, etc. De maneira geral, após a austenitização, a microestrutura resultante no sentido de aumento da velocidade de resfriamento é composta por: ferrita + perlita (grosseira), ferrita + perlita (fina), bainita, martensita [Marques et al., 2017]. Entre os metais utilizados para deposição estão: ligas de titânio, alumínio, níquel, cobalto, aços (inoxidável, ferramenta e baixa liga) e metais preciosos. Podendo ser alimentadas na forma de arame ou pó [Alberti et al., 2014].

Um dos metais de adição avaliados foi um aço da série AISI H, que estão inseridos no grupo de aços para ferramentas de trabalho a quente, onde o AISI H13 pertence à série de aços com cromo e apresentam boa resistência e dureza em altas temperaturas. Algumas aplicações incluem o contato com outros materiais de trabalho a quente, como em fundição sob pressão, extrusão e forjamento a quente, onde é necessária elevada resistência superficial ao contato mecânico-abrasivo, a altas temperaturas e elevada resistência mecânica. As propriedades de elevada dureza à alta temperatura são resultado do conteúdo moderado de cromo combinado com elementos formadores de carboneto, como molibdênio, vanádio e tungstênio [AWS, 1991]. Os valores de dureza geralmente variam entre 40 HRC e 50 HRC [AWS, 1991]. Em relação ao material AISI H13, um dos principais problemas é a suscetibilidade a trincas. Recentemente, o número de estudos aumentou com foco em aplicações de manufatura aditiva. Em um estudo com ferramentas de H13 e eletrodos à base de níquel (Stellite), Rajeev et al. [G.P. et al., 2017]

usando camadas depositadas com CMT e diferentes condições de tratamento térmico, verificou que trincas poderiam ser evitadas pelo pré-aquecimento e um recozimento pós-solda. Uma abordagem híbrida de fresagem e CMT para fabricar uma matriz de AISI H13 foi utilizada por [Legesse et al., 2018], e mostrou que pode ser fabricada evitando trincas com um sistema de pré-aquecimento. A deposição de amostras de H13 usando o processo GMAW regular foi tentada por [Wang et al., 2018], o recozimento foi realizado por 4 h a 830 °C e resultou em uma redução significativa das propriedades mecânicas: a resistência à tração na direção da deposição diminuiu de 1085 MPa para 536 MPa para os recozidos. A microestrutura identificada por [Wang et al., 2018] foi bainita e martensita. A deposição de um bloco livre de trincas de H13 com porosidade limitada e propriedades mecânicas apropriadas usando CMT foi demonstrada como possível por Ge et al. [Ge et al., 2019], o material foi depositado em um substrato recozido.

Os cordões depositados em sucessivas camadas requerem cuidados no procedimento experimental, devido à necessidade de uma adequada ligação metalúrgica entre o primeiro cordão depositado e o substrato, e entre os demais cordões subsequentemente. Também é necessário garantir a continuidade e homogeneidade da geometria, morfologia e microestrutura das camadas depositadas. Entre as possíveis maneiras de garantir a qualidade dos cordões está a escolha adequada dos parâmetros de processo. Entre as descontinuidades encontradas nos depósitos estão a irregularidade no início e fim do cordão, normalmente ligado à abertura e extinção do arco elétrico, ou parada da tocha nessas regiões. Essa descontinuidade pode ser corrigida com a adoção de caminhos alternativos para a deposição [Venturini et al., 2016, 2018], e pelo controle da rampa de corrente na abertura e extinção do arco, função normalmente usada em soldagem para evitar a descontinuidade conhecida como trinca de cratera. O controle da abertura e extinção do arco elétrico para evitar irregularidades na geometria do cordão depositado foi estudado por [Zhang et al., 2003]. Entre outras descontinuidades que podem ser encontradas estão poros, oxidação dos depósitos, trincas, etc.

A sequência de deposições para evitar distorções foi estudada por [Mughal et al., 2005]. Uma das alternativas sugeridas para reduzir distorções e tensões residuais e promover o refino dos grãos no cordão depositado é através da compressão por rolos [Colegrove et al., 2013]. A diminuição das deformações do componente depositado pode ser buscada pelo balanço entre a temperatura de pré-aquecimento gerada pelo depósito do cordão prévio e o tempo de resfriamento ou inatividade para a camada seguinte.

3.2 Geometria dos depósitos

Após a deposição de múltiplas camadas, um método para a real determinação da geometria ou espessura da “parede” obtida foi sugerida por [Martina et al., 2012] no qual se diferencia as regiões depositadas em espessura total e espessura efetiva. A espessura efetiva considera a parede de cordões empilhados resultante após a usinagem e operações de acabamento que será efetivamente utilizada como componente, enquanto a espessura total leva em conta as irregularidades ou ondulações superficiais decorrentes da sobreposição dos cordões empilhados.

Valores de diluição para diferentes formas de onda foram avaliados por [Martina et al., 2019], e destacaram a forte influência destes, uma vez que o valor alcançado para GMAW-CMT foi de 3 %, para GMAW-AC pulsado de 8 % e para GMAW-Corrente Contínua Pulsado de 28 %. Uma baixa diluição melhora a preservação das propriedades originais do metal base e economiza material na construção da peça, como na altura dos depósitos. Estudos também foram realizados sobre o planejamento do caminho da ferramenta para a deposição. De acordo com Geng et al. [Geng et al., 2017] o ângulo de deslocamento em que o metal de adição é alimentado na poça de fusão tem uma grande influência na geometria do cordão. Assim, a alimentação concêntrica do eletrodo na tocha em GMAW se apresenta como uma alternativa positiva a ser aplicada em WAAM.

Entre os fatores de processamento da manufatura aditiva alguns requerem maior atenção, dentre eles estão os ciclos térmicos produzidos pelas deposições subsequentes, a temperatura entre passes, trajetória de deposição, a distância entre o bico de contato e a peça, distância lateral entre outras camadas e parâmetros de soldagem [Alberti et al., 2014]. Dentro desse contexto ainda se busca a redução e otimização do número de cordões depositados visando reduzir custos, como de deposição e usinagem posterior.

A deposição de cordões dissimilares com duplo eletrodo “*twin-wire*” foi avaliada por [Somashekara; Suryakumar, 2017], os eletrodos AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G foram depositados com o processo GMAW. Propriedades mecânicas e geometria dos depósitos foram avaliadas. Encontrou-se que após o terceiro depósito os valores de dureza diminuíram, estabilizando nos seis cordões posteriores, inferindo-se que ocorreu a estabilização do estado térmico. A mudança de direção de movimentação da tocha, indo ou voltando, não apresentou diferença na dureza das deposições. Utilizando deposição a laser e adição de eletrodo, para

múltiplas camadas depositadas, se verificou a redução na dureza devido aos múltiplos ciclos térmicos experimentados pelos cordões anteriores [Oliari et al., 2017].

Os tratamentos térmicos podem ser necessários para homogeneização da estrutura das camadas depositadas para determinados materiais. Esses tratamentos devem estar alinhados com as informações de diagramas de fases para o tipo de liga utilizada. Entre as consequências do tratamento térmico estão o alívio de tensões, uniformidade da estrutura e dependendo da temperatura e tempo se atinge etapas de solubilização e precipitações, podendo alterar significativamente as propriedades originais do metal depositado. Em WAAM se busca evitar etapas adicionais como tratamentos térmicos devido ao aumento no tempo de produção e custos.

3.3 Processo GMAW

Para o processo GMAW são regulados parâmetros como velocidade de alimentação de arame W (m/min), tensão (V), distância bico de contato peça (DBCP), ângulo de deslocamento e trabalho, tempos e intensidades dos pulsos de corrente nos modos pulsados, etc. A curva característica da fonte geralmente é tensão constante. A alimentação do arame W é contínua. O arco elétrico consiste em uma descarga elétrica, que é sustentada através de um gás ionizado a alta temperatura, conhecido como plasma, podendo produzir energia térmica suficiente para a fusão localizada dos materiais [Marques et al., 2017].

O calor transferido pelo arco representa a quantidade de energia entregue para a peça durante a soldagem, sua taxa é dada por unidade de comprimento do cordão em (J/mm). Os ciclos térmicos do substrato são dependentes dessa transferência de calor que determina a taxa de resfriamento da junta e, portanto, as transformações de fases, propriedades mecânicas, distorções, etc. Segundo [AWS, 2001], a energia de soldagem é definida como a razão entre a potência da fonte de energia em Watts (J/s), e a velocidade de deslocamento da tocha (mm/s), Equação 1.

$$E = \eta_a \frac{U \cdot I}{v} \left(\frac{J}{mm} \right) \quad (1)$$

Onde E é a energia total ou nominal, U é a tensão do arco elétrico em Volts, I é a corrente do arco elétrico em Amperes, η_a a eficiência térmica do arco para cada processo de soldagem e v é a velocidade de deslocamento da tocha. A eficiência do arco elétrico representa o calor que foi realmente transferido para a peça dividido pelo calor total gerado pela fonte de soldagem no

período de tempo com arco aberto, portanto $\eta_a < 1$. Além do calor, o arco elétrico gera radiação eletromagnética de alta intensidade, nas faixas do infravermelho, visível e ultravioleta.

Fontes de energia tradicionalmente utilizadas em soldagem e recentemente aplicadas a WAAM, oferecem diferentes soluções para diminuir a transferência de calor do processo de deposição, tanto pela forma de onda da corrente/tensão quanto para a alimentação do material de adição. A solução que introduz micro-movimentos do eletrodo da tocha sincronizada com a forma de onda, a fim de reduzir drasticamente a entrada de calor é o modo Cold Metal Transfer [Fronius International GmbH., 2014], Figura 7 (a). A modificação da forma de onda da corrente pode reduzir o calor transferido pela fonte de calor para a peça de trabalho e evitar ou reduzir fases deletérias, distorções ou tensões térmicas. Entre as soluções avançadas estão as fontes de energia com modos de transferência por curto-circuito controlado. [Norrish; Cuiuri, 2014] compararam diferentes fontes de energia por curto-circuito controlado, o modo CMT foi identificado como capaz de combinar baixa transferência de calor, redução nos salpicos e alta confiabilidade do equipamento. Até agora, o CMT é uma das abordagens mais promissoras para WAAM e foi selecionado neste estudo para comparar seus resultados com outros modos de transferência para o material AISI H13. Os outros modos para esse material foram: “*Low Spatter Control*” (LSC) e Pulsado Sinérgico (PS); estes foram selecionados porque estão entre as soluções mais avançadas para reduzir a transferência de calor do arco elétrico. A principal diferença com o CMT está na ausência de um controle do micro movimento do eletrodo durante a deposição.

LSC é um modo de transferência do metal por imersão/mergulho (*dip transfer*) com alta estabilidade do arco elétrico e baixo nível de geração de salpicos, graças à adoção de uma forma de onda de corrente aprimorada, Figura 7 (b). O processo de transferência é baseado em curto-circuito, a corrente é reduzida antes de quebrar a ponte do curto-circuito, levando à reignição suave do arco. Comparado ao curto-circuito, o modo por projeção (forma de onda pulsada) apresenta uma menor transferência de calor para o metal base, como consequência menor distorção e redução de algumas transformações de fase deletérias. No modo pulsado, a corrente média é reduzida devido ao pulso de corrente. No período baixo, o pulso de corrente é mantido em níveis baixos para não transferir o material do eletrodo, mas alto o suficiente para não extinguir o arco elétrico. Em seguida, a corrente de pico é elevada acima da corrente de transição por um tempo suficiente para promover a formação e transferir uma gota de metal. Estas são opções tradicionais no campo de soldagem que recentemente começaram a ser aplicadas em WAAM.

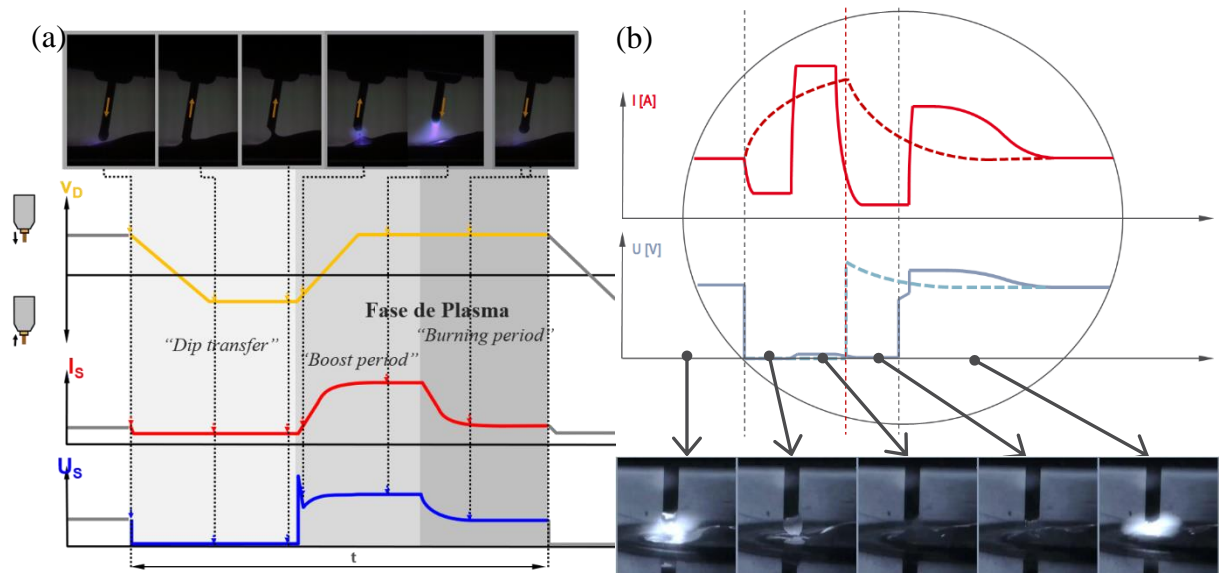


Figura 7 – Forma de onda. (a) Modo CMT. (b) Modo LSC (linha contínua) e Curto-Circuito Convencional (linha tracejada). Detalhe da poça de fusão para o modo LSC. Corrente (I) em vermelho e tensão do arco (U) em cinza. [Fronius International GmbH., 2014]

Outro importante modo de transferência metálica é a transferência por curto-circuito, Figura 7 (b), na qual ocorre o contato da gota com a poça antes do destacamento [Scotti, A.; Ponomarev, 2008]. O modo de transferência está relacionado aos parâmetros de soldagem, dentre eles destacam-se a corrente, tensão e comprimento do arco, ainda o tipo de gás exerce alguma influência. O modo de transferência por curto-circuito ocorre geralmente quando aqueles são de pequena ordem, pois a mudança para outros modos de transferência como globular ou goticular “*spray*” acontece quando a energia (principalmente corrente) e/ou comprimento do arco são elevados. Através dos oscilogramas de tensão e corrente é possível analisar as curvas para os parâmetros utilizados, onde de forma geral, segundo [Scotti, A.; Ponomarev, 2008], se busca que a taxa de subida da corrente de curto-circuito seja elevada o suficiente para promover a transferência da gota, porém baixa o suficiente para diminuir a geração de salpicos.

A distância bico-de-contato-peça (DBCP) é uma variável importante nesse estudo devido a sua influência direta na corrente de soldagem. Se a extensão do eletrodo aumenta em uma fonte de tensão constante, a corrente de soldagem diminui rapidamente devido ao aumento da resistência elétrica para pré-aquecer o eletrodo. A corrente é uma função direta da velocidade de alimentação do eletrodo e inversa de sua extensão. A taxa de deposição varia apenas com a velocidade de alimentação [AWS, 2001]. Assim se houver variação do DBCP ao longo das deposições em manufatura aditiva ao arco, irá ocorrer a variação da corrente de soldagem. Porém, a velocidade de alimentação do eletrodo se mantém constante, podendo levar a

alterações na geometria do cordão de solda e energia de soldagem devido à variação da corrente disponível para fusão do eletrodo.

O modo de transferência projetado do metal para o processo GMAW Pulsado, Figura 8 (a), apresenta como característica menor transferência de calor para o metal base, menor distorção e minimiza os salpicos [AWS, 2004]. Nesse modo, a corrente média de soldagem é reduzida devido aos pulsos de corrente. Permite o emprego em todas as posições de soldagem e em chapas finas. Durante a aplicação da corrente de base se mantém níveis suficientemente baixos para não ocorrer a transferência do metal, mas elevados o suficiente para não extinguir o arco elétrico. Então, o pico de corrente é elevado acima da corrente de transição por tempo suficiente para promover a formação da gota e transferência de uma gota por período do pulso. Em sistemas sinérgicos, fabricantes de fontes de potência configuram previamente os parâmetros do pulso para determinados metais de adição e seu diâmetro, gases de proteção, etc. Geralmente, o usuário ajusta poucos parâmetros, como por exemplo, a velocidade de alimentação do eletrodo como parâmetro principal, o comprimento do arco elétrico e a indutância como secundário para ajustar a tensão do arco elétrico. A fonte de potência então determina os demais parâmetros que definem o pulso, por isso é chamado de sinérgico.

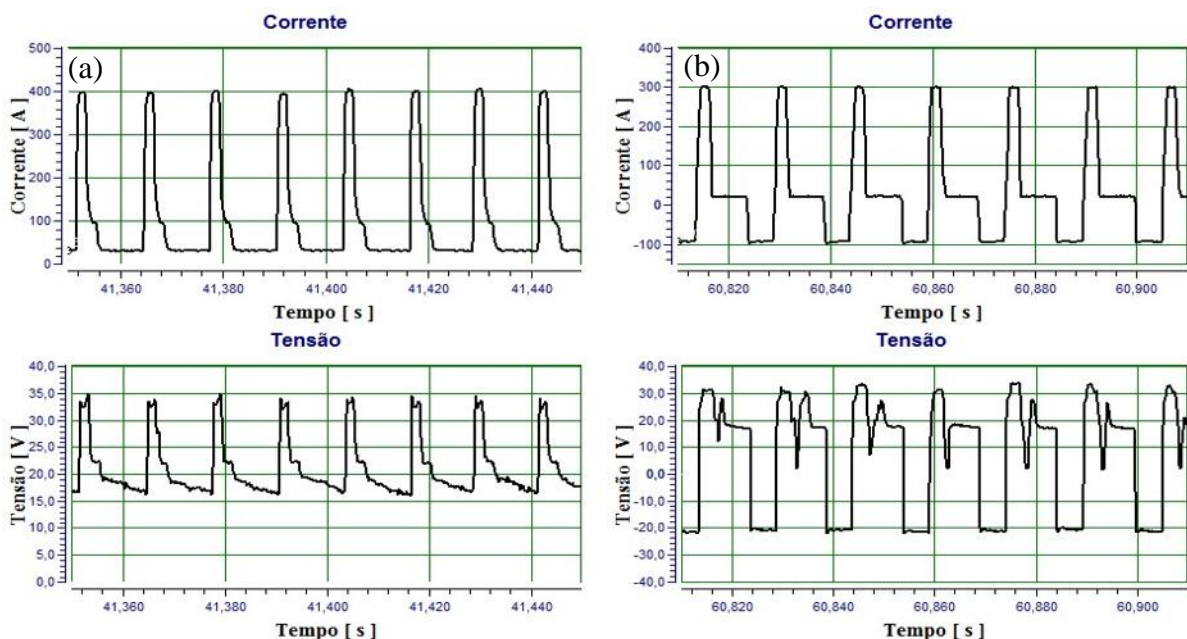


Figura 8 – Formas de onda com corrente e tensão do arco. (a) Pulsado sinérgico (PS). (b) Polaridade Variável (PV).

A estabilidade do arco elétrico no processo GMAW pulsado sinérgico está ligada à combinação dos parâmetros do pulso com a velocidade de alimentação de arame. Duas condições devem ser cumpridas em soldas tradicionais para os pulsos de corrente [Gonzalez,

1997]: equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação de arame e sua taxa de fusão, mantendo constante o comprimento do arco; deve ser destacado somente uma gota da ponta do eletrodo em cada pulso. Possibilitando o controle da massa transferida pelos pulsos periódicos de corrente.

A curva de corrente geralmente utilizada no processo de soldagem GMAW com Polaridade Variável (PV), Figura 8 (b), é muito semelhante à curva utilizada para GMAW pulsado corrente contínua (CC). A diferença principal é a adição da parte negativa no formato da curva de corrente, assim apresentando três partes: pulso positivo, base positiva e pulso negativo. Os parâmetros do modo de corrente PV são: corrente de pico (I_p), tempo de pico (t_p), corrente de base (I_b), tempo de base (t_b), corrente negativa (I_n) e tempo negativo (t_n). A região com eletrodo positivo é necessária para prover a fusão do metal base e metal de adição (eletrodo), destacar a gota e favorecer a estabilidade do arco. O uso do pulso negativo gera um aumento na taxa de fusão do arame com conseqüente redução da temperatura no metal base.

Para o processo GMAW convencional com corrente contínua eletrodo positivo (CCEP) a concentração do calor é mais elevada no metal base, ou seja, recebe o somatório de todo o calor transferido pelo arco elétrico e metal de adição, descontando-se as perdas intrínsecas de cada processo para o meio. Para a polaridade variável, a adição da região negativa no formato do pulso altera essa distribuição de calor, levando a uma parcela do calor ser deslocada para o eletrodo. Essa alteração leva ao aumento da taxa de fusão, aumento da tensão do arco elétrico, diminuição da temperatura no metal base e redução da penetração. A corrente de base possui função de equilibrar a energia entre as duas polaridades e deve ser mantida constante.

3.4 Projeto de experimentos Box-Behnken

Os projetos de experimentos estão baseados em conceitos estatísticos, e são destinados ao planejamento, execução, análise e otimização de um experimento. Seu uso possibilita a estruturação da sequência de ensaios, facilitando o entendimento dos objetivos preestabelecidos pela produção do máximo de informação com um gasto mínimo de tempo e recursos.

As etapas do projeto de experimentos consistem em estabelecimento do problema (definição dos objetivos), formulação das hipóteses, planejamento do experimento (variáveis de resposta, fatores controláveis, número de níveis para cada fator, restrições experimentais, modelo estatístico, etc), execução do experimento, análise dos resultados (gráficos, tabelas e análise de significância) e otimização do processo em estudo.

O projeto de experimentos utilizado neste trabalho foi proposto por Box & Behnken em 1960, consiste num projeto com três níveis fatoriais incompletos, são projetos de segunda ordem, rotacionalidade ou quase rotacional, com adequação à resposta de superfície e gráfico de contorno. Esses projetos são desenvolvidos pela combinação de 2^k fatores com blocagem do projeto incompleta [Montgomery, 2013]. O ensaio se dá com 15 experimentos, dos quais 12 são combinações dos fatores pesquisados e 3 são pontos centrais. Ainda, este projeto de experimentos não contém pontos no vértice do cubo criados pelos valores máximos e mínimos das variáveis, logo, em nenhuma situação os três fatores, por exemplo, velocidade de alimentação de arame, velocidade de deslocamento da tocha e tensão, estarão em seus limites inferiores ou superiores no mesmo experimento. Um dos três fatores sempre está em seu valor médio, evitando assim combinações de todos os níveis nos valores máximos ou nos mínimos ao mesmo tempo, que poderiam causar danos ao experimento.

O erro experimental (repetitividade) do experimento é testada através dos pontos centrais, que são a repetição do ensaio com as três variáveis em seus valores médios, em ordem aleatória por três vezes, então os valores são comparados e a confiança do experimento é determinada, condição inerente ao Box-Behnken.

Neste trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas como resistência à tração e dureza das amostras, micrografias e macrografias produzidas pelos diferentes modos de transferência, ou seja, modificando o formato de onda da corrente para o processo GMAW. Foram caracterizadas e analisadas para diferentes metais de adição. Buscou-se uma análise macro do efeito dos modos de transferência na microestrutura. Para o estudo inicial da geometria dos cordões se utilizou a metodologia de resposta de superfície utilizando o projeto de experimentos Box-Behnken. Com a análise dos resultados se determinou os cordões adequados ao depósito por manufatura aditiva. Os resultados devido à combinação dos parâmetros do processo foram avaliados e otimizados segundo o incremento de qualidade dos cordões e estabilidade do arco elétrico, com o objetivo de gerar combinações de parâmetros, modos de corrente e metais de adição que podem produzir componentes com propriedades mecânicas adequadas e sem descontinuidades. Os materiais de adição avaliados foram aços com teor crescente de carbono ou elementos de liga em sua composição. Os eletrodos foram os seguintes: AWS ER70S-6, AWS ER110S-G e AISI H13, sendo a última uma liga frequentemente utilizada no setor de fabricação de ferramentas e matrizes.

Também se investigou o efeito da imposição de um jato de ar na superfície dos depósitos por WAAM. O sistema de refrigeração proposto foi implementado em um protótipo de máquina

para WAAM. Várias amostras de depósitos verticais foram fabricadas usando resfriamento por convecção natural e pela imposição de jato de ar. Os tempos de inatividade entre depósitos foram modificados para testar a efetividade da imposição do ar forçado em diferentes condições de acúmulo de calor. Ainda, se avaliou o aspecto superficial “*waviness*” das amostras manufaturadas. As medidas foram realizadas através de uma Máquina de Medição por Coordenadas (CMM), e finalmente, as superfícies medidas foram comparadas através de métricas específicas.

Ainda, os dados de temperatura adquiridos durante a deposição de diferentes amostras foram comparados para avaliar o efeito do jato de ar na temperatura do substrato. A fim de avaliar o efeito do resfriamento do ar na temperatura entre camadas, a deposição das amostras foi simulada usando um modelo preliminar de Elementos Finitos (EF). Os dados de simulação foram comparados com os valores obtidos pelos termopares para avaliar a precisão do modelo. O modelo busca fornecer os tempos de inatividade ideais em cada camada para atender a faixas de temperaturas pré-determinadas que não resultem em aspectos deletérios à fabricação do componente. Também possibilita o estudo da história térmica de qualquer volume da peça depositada, permitindo avaliar transformações de fases, deformações, e zonas críticas de acúmulo de calor que devem sofrer resfriamento intensivo. As temperaturas entre camadas obtidas pela simulação foram utilizadas para comparar o padrão do jato de ar e o resfriamento por convecção natural nas amostras.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização experimental do trabalho se utilizou a estrutura e equipamentos fornecidos pelo Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e do Laboratório de Pesquisa em Tecnologias de Manufatura (MTRL) do Departamento de Engenharia Industrial (DIEF) da Universidade de Florença (UNIFI) - Itália. Entre os aspectos avaliados estão a resistência à tração, microdureza, macrografias, análise visual do aspecto superficial e acabamento das amostras. Foram avaliados parâmetros de processo como velocidade de alimentação do eletrodo, tensão do arco, velocidade de deposição (deslocamento da tocha), distância bico-de-contato-peça, e parâmetros geométricos como largura, altura e área dos cordões empilhados. No decorrer do trabalho também foi avaliado e implementado um modelo numérico para previsão da extração de calor nos pontos de interesse do componente.

Para a análise das propriedades mecânicas as amostras produzidas foram usinadas de forma a extrair um corpo de prova normalizado para que possa ser ensaiado. A medição de dureza foi realizada ao longo da seção retangular do corpo de prova a fim de identificar possíveis variações na resistência mecânica do material em função dos parâmetros de processo avaliados. Outro fenômeno avaliado foi o efeito da imposição do resfriamento artificial (forçado) com jato de ar nas regiões de interesse durante a deposição dos cordões nas propriedades mecânicas das amostras.

4.1 Geometria do cordão e Propriedades Mecânicas AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G

Inicialmente, para o primeiro grupo de testes que se iniciou com a avaliação da geometria do cordão depositado, se utilizou os modos de transferência pulsado sinérgico, sinérgico e convencional. Os eletrodos utilizados para o processo GMAW foram o AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro e posteriormente o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm de diâmetro. O gás de proteção foi a mistura Ar + 10% CO₂ com vazão de 15 l/min. Utilizou-se como metal base o aço ao carbono AISI 1010 com 6,35 mm de espessura para as deposições com AWS ER70S-6 e aço carbono A36 com 12,7 mm de espessura para o eletrodo AWS ER110S-G.

Os experimentos iniciais buscaram explorar o efeito da variação dos parâmetros do processo, para isso a seguinte sequência foi seguida: escolha dos parâmetros variando um dos

fatores principais em cada deposição; dois parâmetros foram deixados fixos e alterado o terceiro com a intenção de verificar os valores máximos e mínimos que resultassem em depósitos sem defeitos. Os defeitos foram caracterizados por diferentes métodos, como: ensaio visual; projeto de experimentos Box-Behnken; medição das dimensões dos corpos de prova, área do reforço e ângulo do reforço; otimização da geometria dos corpos de prova; verificação do cordão otimizado e, finalmente, empilhamento dos cordões.

Para a realização das deposições se utilizou um sistema robotizado composto por um robô MA1400 fabricado pela Yaskawa Motoman Robotics, associado à fonte TransPlus Synergic 4000R da marca Fronius®. A Figura 9 ilustra o aparato experimental para deposição do eletrodo AWS ER70S-6, onde (a) representa a deposição realizada com metal base fixado em 4 pontos nas extremidades para a chapa de 6,35 mm. (b) Primeiro cordão depositado e termopares tipo-K. (c) Cordões depositados. Todos os depósitos do trabalho foram feitos com os sentidos de ida e retorno da tocha.

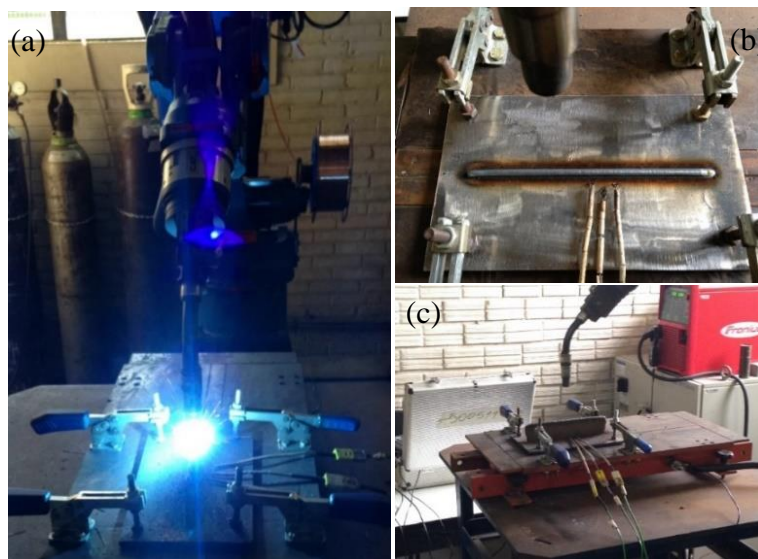


Figura 9 – (a) deposição sendo realizada para a chapa de 6,35 mm. (b) Primeiro cordão depositado e termopares tipo-K. (c) Cordões depositados.

Para os modos de operação GMAW Pulsado Sinérgico, Sinérgico e Convencional os parâmetros analisados foram velocidade de alimentação do arame (W), Distância Bico-de-Contato-Peça (DBCP) e velocidade de deslocamento da tocha (v).

Os parâmetros de soldagem nominais e codificados para as avaliações iniciais com o eletrodo AWS ER70S-6 e modo de corrente pulsado sinérgico estão demonstrados na Tabela 1. Os resultados da geometria foram avaliados pelo projeto de experimentos Box-Behnken.

Tabela 1 – Parâmetros para o modo pulsado sinérgico. Determinação da geometria. AWS ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm. Fonte Fronius.

Sequência de soldagem	Valores Codificados			Valores Reais		
	W (m/min)	v (mm/s)	DBCP (mm)	W (m/min)	v (mm/s)	DBCP (mm)
1	0	-1	+1	6,7	2	20
2	0	0	0	6,7	6	18
3	+1	0	+1	7,5	6	18
4	+1	0	-1	7,5	6	16
5	0	0	0	6,7	6	18
6	0	+1	+1	6,7	10	20
7	-1	0	-1	6,0	6	16
8	0	0	0	6,7	6	18
9	0	+1	-1	6,7	10	16
10	+1	-1	0	7,5	2	18
11	-1	-1	0	6,0	2	18
12	+1	+1	0	7,5	10	18
13	-1	+1	0	6,0	10	18
14	-1	0	+1	6,0	6	20
15	0	-1	-1	6,7	2	16

A Tabela 2 apresenta os níveis dos parâmetros variados para o modo de transferência projetado para o Pulsado Sinérgico (G1), Pulsado Sinérgico (G2); e curto-circuito para o Sinérgico (G3) e Convencional (G4). A distinção para os grupos G3 e G4 como sinérgico e convencional, respectivamente, são para distinguir os modos oferecidos pela fonte Fronius® que foram avaliados nesta etapa do trabalho. A função sinérgica significa que se um dos parâmetros ajustáveis na fonte de potência for modificado para o processo MAG Pulsado sinérgico ou MAG padrão sinérgico, todos os outros parâmetros, incluindo o parâmetro da tensão do arco elétrico, também serão definidos automaticamente. A função sinérgica garante que todos os outros parâmetros de soldagem sejam ajustados quando um parâmetro individual for alterado. A combinação dos parâmetros é a mesma da Tabela 1, com os mesmos níveis de W e DBCP. A velocidade de deslocamento da tocha v foi reduzida para dois blocos após a avaliação dos 15 resultados iniciais da geometria resultante da velocidade de 2 – 4 mm/s e 4 – 6 mm/s, onde se observou forte influência desse parâmetro.

Tabela 2 – Níveis variados para o Box-Behnken, grupos (G1, G2, G3 e G4).

	G1 e G3 (2 – 4 mm/s)			G2 e G4 (4 – 6 mm/s)		
	-1	0	+1	-1	0	+1
W (m/min)	6,0	6,7	7,5	6,0	6,7	7,5
v (mm/s)	2,0	3,0	4,0	4,0	5,0	6,0
DBCP (mm)	16	18	20	16	18	20

Foram depositados 60 cordões divididos em 4 projetos de experimentos Box-Behnken para a determinação da geometria adequada para empilhamento, nos quais (W) e (DBCP) foram mantidos constantes para os todos os modos de transferência do metal. A velocidade de deslocamento da tocha foi variada nos valores de (2; 3; 4 mm/s) e (4; 5; 6 mm/s) inicialmente com o propósito de determinar dois cordões com geometria adequada para empilhamento, porém, devido à instabilidade na alimentação do eletrodo durante o empilhamento com o modo sinérgico (G3) e velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s se optou por alterar para convencional (G4), melhorando-se significativamente a estabilidade das deposições. A Tabela 3 representa o Box-Behnken com os parâmetros de soldagem para as investigações iniciais de geometria e estabilidade do arco com o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

Tabela 3 – Tabela com o Box-Behnken e parâmetros de soldagem para as investigações iniciais. Eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

Sequência de soldagem	W (m/min)	v (mm/s)	DBCP (mm)	W (m/min)	v (mm/s)	DBCP (mm)
1	0	-1	+1	6,7	2/4	20
2	0	0	0	6,7	3/5	18
3	+1	0	+1	7,5	3/5	18
4	+1	0	-1	7,5	3/5	16
5	0	0	0	6,7	3/5	18
6	0	+1	+1	6,7	4/6	20
7	-1	0	-1	6,0	3/5	16
8	0	0	0	6,7	3/5	18
9	0	+1	-1	6,7	4/6	16
10	+1	-1	0	7,5	2/4	18
11	-1	-1	0	6,0	2/4	18
12	+1	+1	0	7,5	4/6	18
13	-1	+1	0	6,0	4/6	18
14	-1	0	+1	6,0	3/5	20
15	0	-1	-1	6,7	2/4	16

A deposição dos cordões selecionados dos grupos G1, G2, G3 e G4 foi em sentido de vai e vem da tocha. O tempo de espera foi suficiente para a temperatura de interpassa ficar entre 50 °C e 60 °C, faixa de temperatura conservadora para evitar transformações de fase em andamento. O comprimento dos depósitos foi de 170 mm, altura final de aproximadamente 45 mm e espessura aproximada de 6 mm como depositados, Tabela 11 (a). Foram utilizados 3 termopares tipo-K no metal base, fixados por descarga capacitiva, a 100 mm do início do cordão no sentido da deposição. Dois termopares foram fixados a 10 mm do centro do cordão

(termopares 1 e 3) com espaçamento de 20 mm e um termopar a 15 mm do centro do cordão (termopar 2) e entre os dois termopares anteriores, Figura 10 (b).

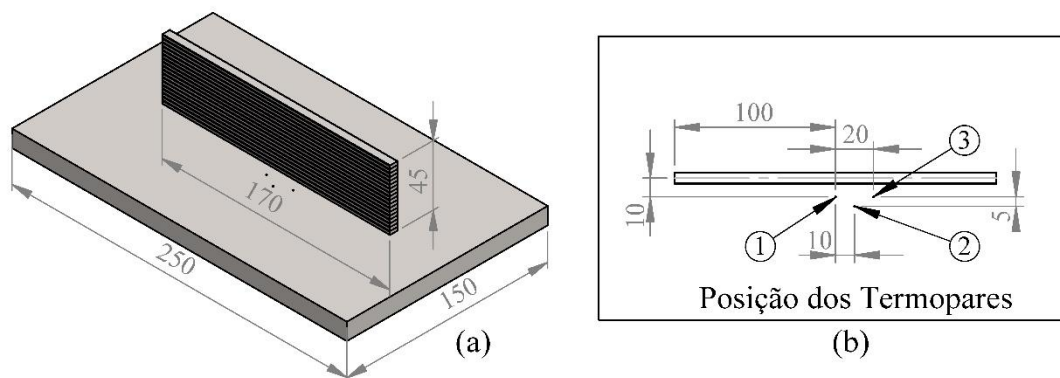


Figura 10 – (a) Medidas da geometria (mm). (b) Vista superior com posição dos termopares 1, 2 e 3 (mm).

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados para as deposições após a avaliação da geometria nos 4 grupos com o eletrodo AWS ER70S-6.

Tabela 4 – Parâmetros para empilhamento com AWS ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm.

AWS ER70S-6 0,8 mm	G1 - Pulsado Sinérgico (2-4 mm/s)	G2 - Pulsado Sinérgico (4-6 mm/s)	G3 - Sinérgico (2-4 mm/s)	G4 - Convencional (4-6 mm/s)
W (m/min)	7,5	7,5	7,5	7,5
v (mm/s)	3	4	3	4
DBCP (mm)	20	18	20	18
Nº depósitos	22	19	19	20

Os depósitos com o eletrodo AWS ER70S-6 para as 4 combinações do modo de corrente estão demonstrados na Figura 11. Na Figura 11 (a) se demonstra o início e fim dos depósitos cortados para excluir a região com instabilidade de abertura e desligamento do arco elétrico. Na Figura 11 (b) estão ilustrados os depósitos após a usinagem lateral preliminar. Após o fresamento preliminar as amostras foram usinadas nas medidas e acabamento para o ensaio de tração.

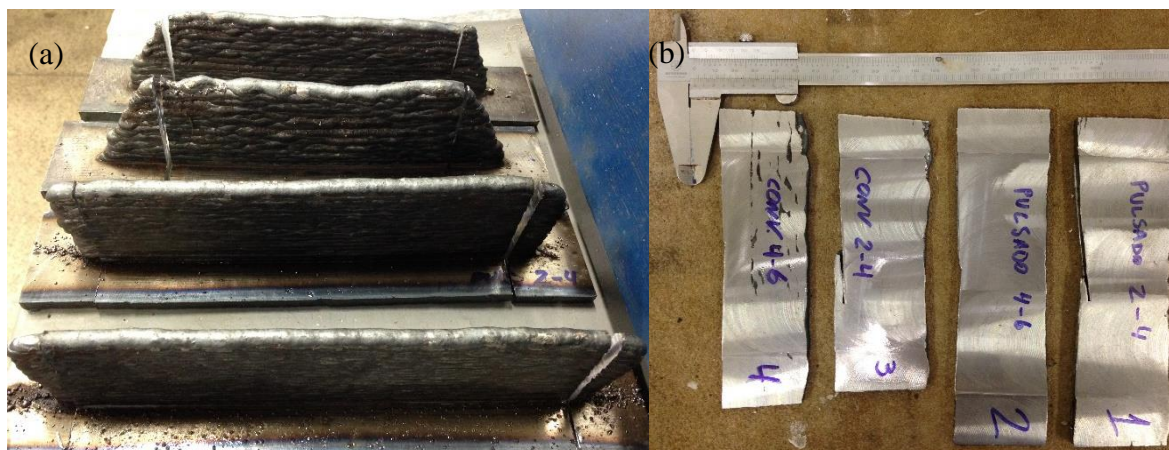


Figura 11 – (a) Cordões depositados para os quatro grupos. (b) Empilhamentos com laterais usinadas.

Após os experimentos preliminares, os parâmetros para a determinação da geometria dos cordões a serem empilhados para o modo de corrente com polaridade variável foram: corrente de pico ($I_p = 300 \text{ A}$), tempo de pico ($t_p = 2,5 \text{ ms}$) e corrente de base ($I_b = 30 \text{ A}$). O eletrodo foi AWS ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro com gás de proteção Argônio + 10 % CO_2 e vazão de 15 l/min. A distância bico-de-contato-peça (DBCP) foi de 18 mm com ângulo de avanço da tocha de -10° (empurrando). Os parâmetros variados foram a corrente negativa (I_n), tempo negativo (t_n) e tempo de base (t_b) segundo os níveis escolhidos para o projeto de experimentos Box-Behnken, Tabela 5. A velocidade de alimentação do eletrodo (W) foi ajustada para cada combinação para se obter a estabilidade do arco elétrico.

Tabela 5 – Parâmetros variados para polaridade variável no Box-Behnken.

Parâmetros	Níveis de variação		
	-1	0	+1
$I_n \text{ (A)}$	-100	-70	-40
$t_n \text{ (ms)}$	5	10	15
$t_b \text{ (ms)}$	5	10	15

Para a realização das deposições dos cordões se utilizou uma fonte de soldagem multiprocessos DIGIPlus A7 450 da empresa IMC Soldagem e Tartilope V4 para a movimentação da tocha, ilustrados na Figura 12 (a). A medida da deformação foi realizada através de dois relógios comparadores posicionados no lado livre do metal base, enquanto a outra extremidade permaneceu fixa, Figura 12 (b). Comparou-se a deformação para os grupos G5, G6 e G7. Para a aquisição da tensão do arco e corrente de soldagem se utilizou o Sistema de Aquisição de Potência (SAP) 4.01 da empresa IMC Soldagem.

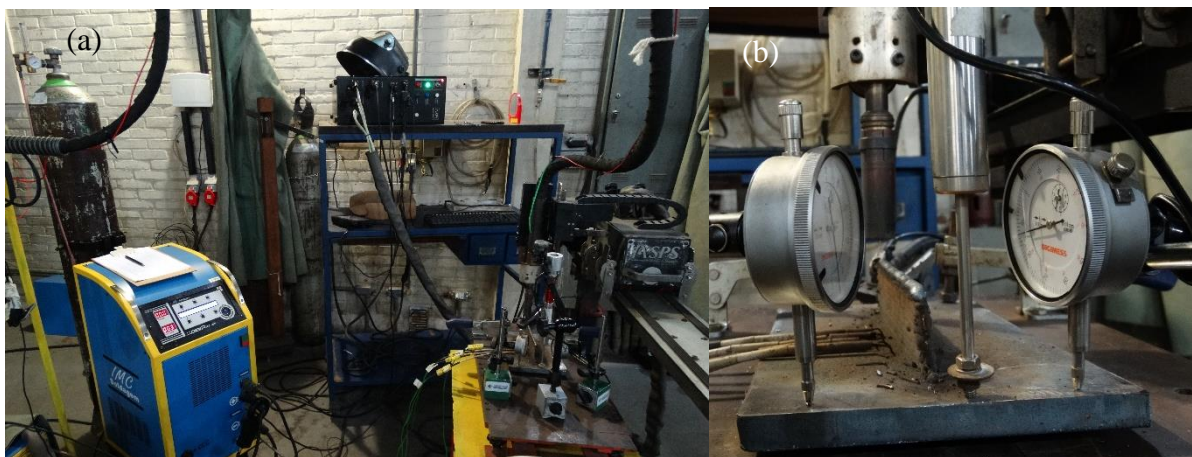


Figura 12 – (a) Vista geral do aparato experimental PV. (b) Cordões depositados PV com metal base deformado, relógios comparadores e termopares.

A matriz de experimentos com os parâmetros para a polaridade variável se encontra na Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz de experimentos para geometria do cordão com polaridade variável.

Sequência de soldagem	Sequência aleatorizada	In (A)	Tn (ms)	Tb (ms)	W (m/min) ajustado
1	5	-100	10	5	6,4
2	14	-70	10	10	4,0
3	7	-100	10	15	4,6
4	2	-40	5	10	4,5
5	4	-40	15	10	2,8
6	15	-70	10	10	4,0
7	10	-70	15	5	4,3
8	8	-40	10	15	2,7
9	6	-40	10	5	3,2
10	11	-70	5	15	3,1
11	12	-70	15	15	3,6
12	3	-100	15	10	6,0
13	9	-70	5	5	5,6
14	13	-70	10	10	4,0
15	1	-100	5	10	4,1

Após a determinação da melhor combinação de parâmetros para o modo polaridade variável considerando a geometria e estabilidade do arco se procedeu à etapa de deposição. As 25 deposições foram realizadas com o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm. Alterou-se a velocidade de deslocamento da tocha para 4 mm/s para ficar equivalente com a energia de soldagem dos demais depósitos e a posição de avanço da tocha para neutra. Não foram realizados empilhamentos dos cordões com PV utilizando o metal de adição AWS ER70S-6 pois se buscou investigar previamente se o eletrodo AWS ER110S-G apresentaria diferenças

significativas quando comparado aos resultados já obtidos com pulsado sinérgico, sinérgico e convencional, utilizando o eletrodo AWS ER70S-G. Devido ao desafio na seleção de parâmetros para PV, se optou por verificar possíveis efeitos nas propriedades mecânicas no material com maior sensibilidade a variação dos parâmetros de processo.

A norma adotada para o ensaio de tração foi a ASTM E8/E8M-16a “*Standard test methods for tension testing of metallic materials*”. Os testes para os metais de adição AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G foram realizados na máquina da marca Shimadzu AG-X Plus Autograph com 250 KN de capacidade no Laboratório do grupo de mecânica aplicada GMAp – UFRGS. A célula de carga é do tipo SFL-250KNAG, código E, com precisão de $\pm 0,5\%$ da carga. A deformação dos corpos de prova foi medida pelo aferidor “*gage*” Shimadzu, modelo SG25-50AD. A Figura 13 (a) ilustra o ensaio de tração, (b) as medidas do corpo de prova e (c) os corpos de prova para o ensaio retirados do corpo depositado. As amostras para tração possuem 100 mm de comprimento com espessura de 4 mm. O comprimento final do corpo de prova foi de 140 mm, se adicionou 20 mm de cada lado para evitar o deslizamento da amostra nas garras da máquina durante o ensaio.

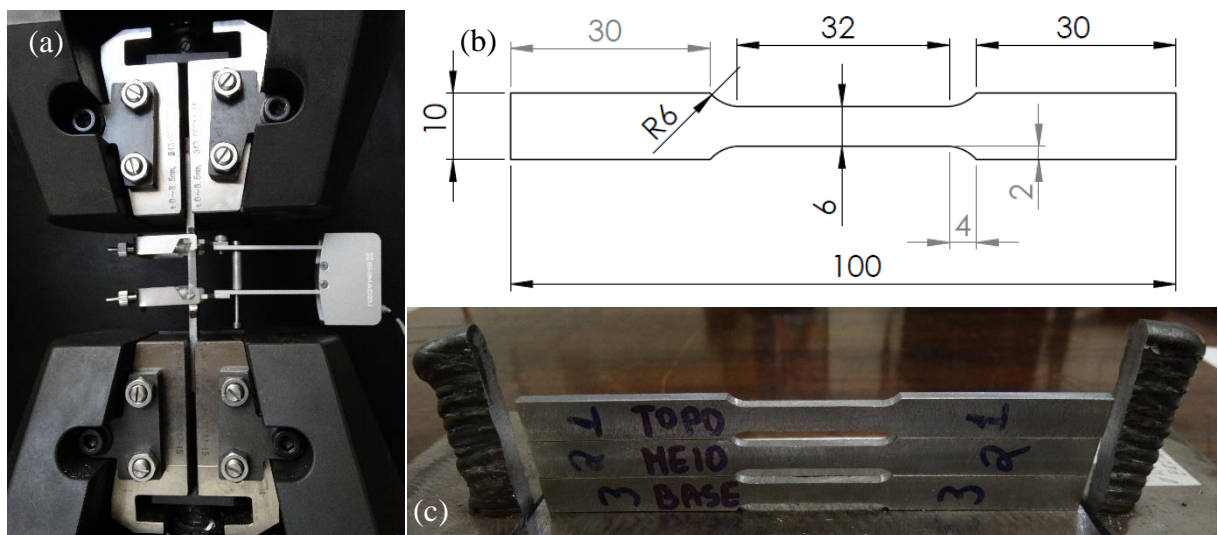


Figura 13 – (a) Máquina de ensaio de tração com corpo de prova. (b) Medidas do corpo de prova para tração. (c) Representação dos corpos para tração retirados dos depósitos.

A Figura 14 demonstra as amostras retiradas dos corpos de prova das regiões do topo I, meio II e base III. Essas amostras foram retiradas na seção de 10x4 mm próximo ao início do raio de 6 mm.

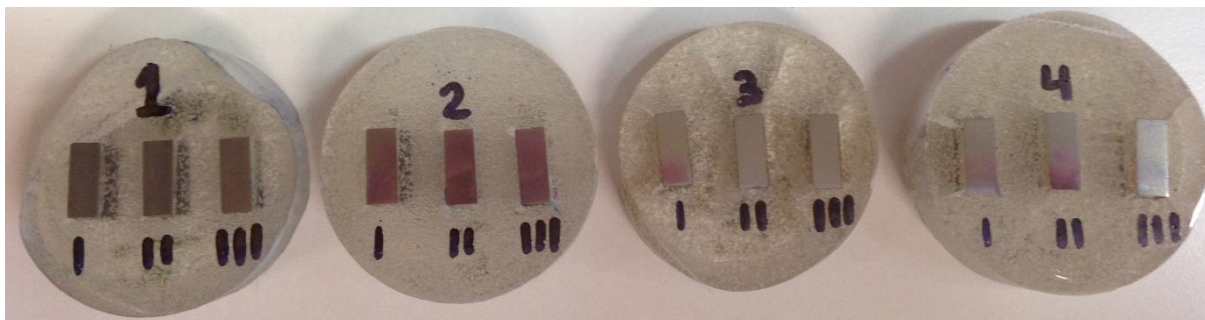


Figura 14 – Amostras do Topo (I), Meio (II) e Base (III) para os grupos G1 a G4 retiradas dos corpos de prova para tração. Amostras para microdureza e micrografia.

A macroestrutura e microestrutura das amostras foi avaliada através de microscopia óptica, realizando-se a devida preparação através do lixamento com a granulometria incremental de 60 a 1200 #, polimento e ataque químico com solução de Nital 10 %.

As amostras embutidas para o ensaio de dureza e micrografia são mostradas na Figura 15 (a) Pulsado sinérgico e (b) Sinérgico.

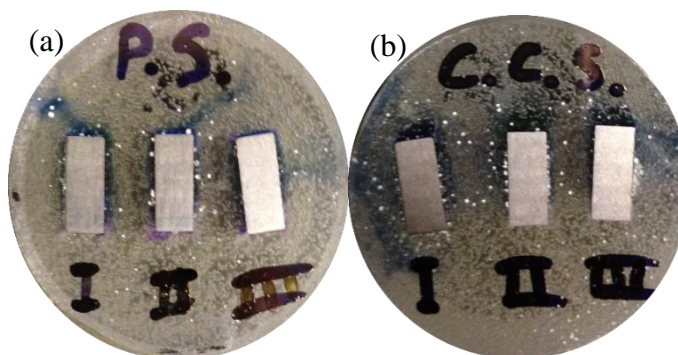


Figura 15 – Amostras para ensaio de dureza e micrografia. (a) Pulsado sinérgico (G5). (b) Sinérgico (G6).

As amostras montadas da Figura 15 representam as amostras retiradas dos corpos de prova para tração com o eletrodo AWS ER110S-G. A ordem marcada nelas representa Topo I, Meio II e Base III. Foram realizados 20 pontos em cada amostra para medir ou mapear o comportamento da dureza ao longo da seção depositada.

4.2 Propriedades mecânicas AISI H13

Seguindo a metodologia apresentada na seção 4.1, as propriedades mecânicas do material AISI H13 foi avaliada. Os testes com esse material foram realizados nos laboratórios da Universidade de Florença – Itália. Para os testes experimentais, utilizou-se uma fonte de soldagem TPSi 320 CMT marca Fronius®. Os modos de transferência foram CMT, LSC e PS. O modo Pulsado Sinérgico foi usado como referência para comparação com os ensaios

anteriores, enquanto o CMT e LSC ampliaram o envelope de estudo. A tocha CMT foi montada em uma fresadora de 3 eixos, cujo controle numérico pode ser programado com linguagem ISO padrão para definir e obter o caminho da ferramenta e a velocidade da tocha com boa precisão. A barra de aço usada como substrato para a deposição tem as dimensões de 250 x 150 x 12 mm. Os cordões depositados têm o comprimento de 170 mm e espessura média de 7 mm. O tempo de inatividade entre depósitos foi de 35 s. Em geral, os tempos de inatividade são usados entre a deposição de camadas subsequentes para permitir que a peça de reduza a temperatura de trabalho para valores inferiores à faixa de transição de fases [Gou et al., 2019; Hackenhaar et al., 2020; Lei et al., 2018; Montevecchi et al., 2018a]. Esse valor foi selecionado baseado em diversos testes preliminares, a fim de evitar uma refusão excessiva dos cordões anteriores, sendo mantido constante em todos os testes com o aço AISI H13, permitindo a comparação adequada dos resultados. O diâmetro do eletrodo foi de 1,0 mm, a composição química de acordo com o fabricante Bohler-Uddeholm está indicada na Tabela 7. O material AISI H13 é um aço ligado ao Cromo-Molibdênio-Vanádio.

Tabela 7 - Composição química do AISI H13.

C	Cr	Mo	V	Mn	Si
0.39	5.3	1.3	0.9	0.4	1.0

Os parâmetros utilizados para todos os depósitos foram os seguintes: $W = 5,0$ m/min; $v = 4$ mm/s; DBCP = 18 mm; gás de proteção Ar + 2 % CO₂ com vazão de 15 l/min; correção de arco e dinâmica = 0,0; número de camadas = 30. A mesma norma foi adotada para os testes de tração, ASTM E8/E8M - 16a. Os testes de tração foram realizados à temperatura ambiente em uma máquina de teste universal (Instron MTS 810) com uma velocidade constante de 0,5 mm/min. Uma sequência de depósitos (parede) foi realizada para cada modo de transferência e três amostras para teste foram usinadas de cada parede, conforme apresentado na Figura 16. O total de 9 amostras com 4 mm de espessura foram testadas e comparadas.

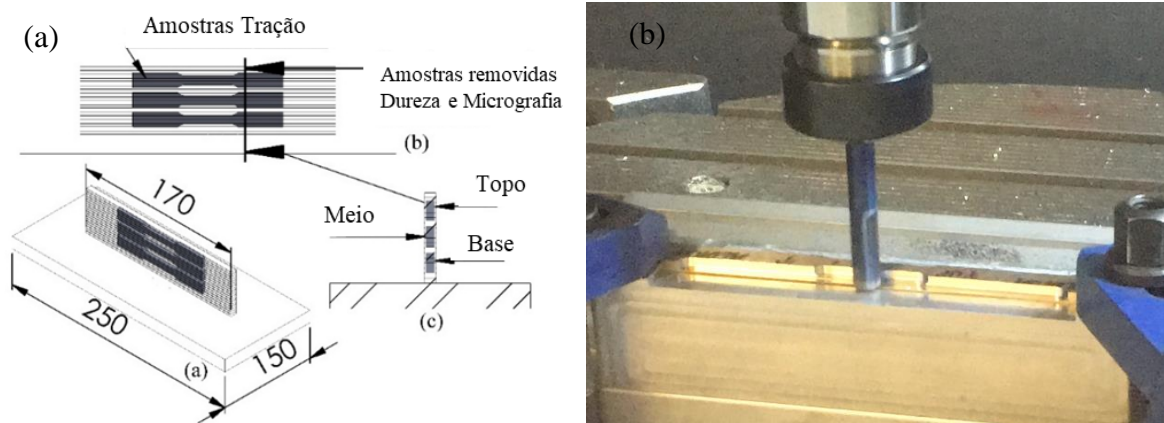


Figura 16 - (a) Dimensões gerais. (b) Região de remoção das amostras para teste de dureza. (c) Região de amostras transversal. (d) Dimensões das amostras para testes de tração. (e) Fabricação das amostras de H13 para teste de tração.

A dureza Knoop foi realizada usando um dispositivo Shimadzu HVM-2000 com uma carga de 300 g e tempo de 10 s. A dureza foi medida a cada 0,5 mm na seção transversal das amostras de tração. Isso resulta em cerca de 20 medidas em cada direção de deposição vertical, base, meio e topo. A Figura 16 (a) indica a região onde as amostras foram removidas do corpo de prova de tração para os testes de dureza e micrografia. As amostras foram preparadas utilizando procedimentos metalográficos padrão, montadas em resina fenólica, lixadas em papéis abrasivos de 80 a 2000 # e finalmente polidas. Para a análise da microestrutura, as amostras foram atacadas com Nital 2%. As imagens ópticas foram realizadas usando o microscópio Nikon Eclipse LV150.

Os resultados do teste de tração são a média dos três testes para cada deposição, onde as amostras foram usinadas e testadas no sentido longitudinal de deposição. A Figura 17 (a) mostra a visão geral das paredes depositadas. Exemplo dos corpos de prova para tração, antes e depois do teste, Figura 17 (b) e as amostras montadas em resina para a micrografia e dureza na Figura 17 (c).

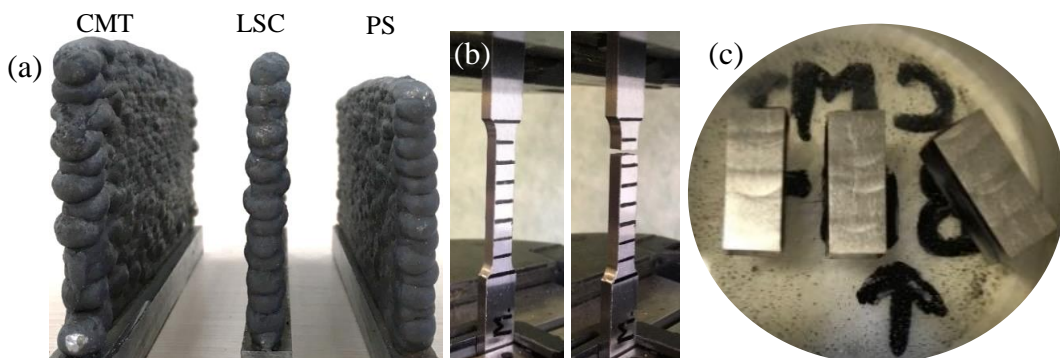


Figura 17 - (a) Vista geral dos depósitos por CMT, LSC e PS, respectivamente. (b) Corpos de prova para tração antes e depois do ensaio. (c) Amostras removidas do corpo de prova de tração AISI H13 e montadas em resina (Modo CMT).

Os parâmetros do processo de deposição adquiridos usando o sistema de aquisição integrado da fonte de potência “logger” são mostrados na Tabela 8. A corrente de deposição (A), a tensão do arco (V), a potência (kW), a energia (kJ) e a velocidade de alimentação do eletrodo (m/min) foram adquiridos. Além disso, a geometria dos depósitos, como altura e largura, foi medida ao final da deposição.

Tabela 8 - Parâmetros medidos para os modos de transferência PS, CMT e LSC.

Valores médios H13	I (A)	U (V)	P (kW)	E (kJ)	Altura (mm)	Largura (mm)	W (m/min)
PS	80	21,9	2153	93,6	62,0	8,3	4,9
CMT	128	14,5	2249	97,6	71,0	9,0	5,8
LSC	117	16,6	1914	83,1	65,0	8,0	4,7

Para conhecimento, os valores médios para o desvio padrão do teste de dureza Knoop são apresentados na Tabela 9. Valores similares foram obtidos, variando de 16 a 27, mostrando uma boa prática experimental na execução dos testes de dureza.

Tabela 9 - Desvio padrão para a Dureza Knoop. Amostras da base, meio e topo.

Std Dev	CMT	LSC	PS
Base	23,77	23,26	27,34
Meio	16,67	16,67	18,86
Topo	17,20	18,52	18,44
Total	27,04	20,56	25,71

Os ciclos térmicos foram medidos no metal base usando termopares tipo-K. A posição dos termopares é apresentada na Figura 18 (a), os termopares foram fixados através de descarga elétrica (capacitiva). O pré-aquecimento do substrato foi de 120 °C. Não foram encontrados defeitos/descontinuidades internos na análise da seção transversal dos depósitos. Os resultados do termopar 1 são discutidos nas seções a seguir, uma vez que a tendência dos demais termopares foram similares. Um exemplo de depósito completo com os termopares posicionados é apresentado na Figura 18 (b).

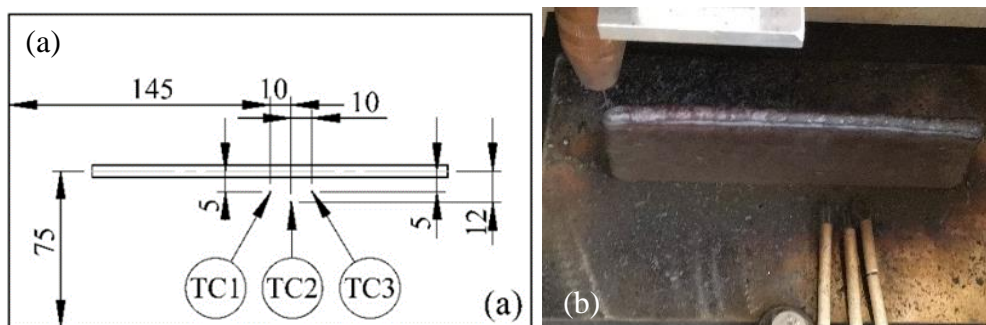


Figura 18 - (a) Esquema de posicionamento dos termopares. (b) Exemplo de uma deposição completa com os termopares no substrato.

Em relação à correção dinâmica (DC) e correção do comprimento do arco (ALC), são parâmetros de ajuste fino que foram mantidos constantes com o objetivo de reduzir os parâmetros a serem avaliados, mantendo-se o foco no efeito das formas de onda. Os efeitos do ajuste de DC e ALC foram previamente avaliados por [Rajeev et al., 2019], com o uso do modo CMT e Stellite 6 como metal de adição. As conclusões desse estudo foram que menores valores de ALC, como -30 (menor transferência de calor) resulta em uma estrutura mais fina com valores de dureza mais elevados se comparados a estrutura dendrítica grosseira para o nível de ALC de 30. A diferença na dureza entre as duas configurações foi em torno de 60 HV.

4.3 Resfriamento com jato de ar versus convecção natural em WAAM

Na etapa final do trabalho se utilizou a configuração e geometria para os testes apresentada na Figura 19. Nesta etapa foram avaliados os efeitos do resfriamento por jato de ar e convecção natural, os efeitos no aspecto superficial dos depósitos, e finalmente o modelo numérico-experimental do resfriamento ativo em elementos finitos.

O material depositado foi o AWS ER70S-6. O substrato utilizado foi um bloco de AISI 1040 com 30 mm de espessura. A parede foi construída depositando 25 camadas. Os valores de largura e altura da parede mostrados na Figura 19 são nominais, isto é, calculados usando a largura e a altura obtida de um cordão sobre chapa utilizando os mesmos parâmetros de processo. A deposição das amostras foi realizada em uma máquina de usinagem CNC adaptada, equipada com a fonte de soldagem AWELCO 250 PULSEMIG. As amostras do envelope de teste foram depositadas utilizando os seguintes parâmetros de processo: tensão de 18 V; corrente de 93 A; $W = 4,6$ m/min; DBCP = 10 mm; $v = 3,33$ mm/s; calor transferido de 0,495 kJ/mm; diâmetro do eletrodo de 0,8 mm; gás de proteção Ar + 17% CO₂ com vazão de 15 l/min.

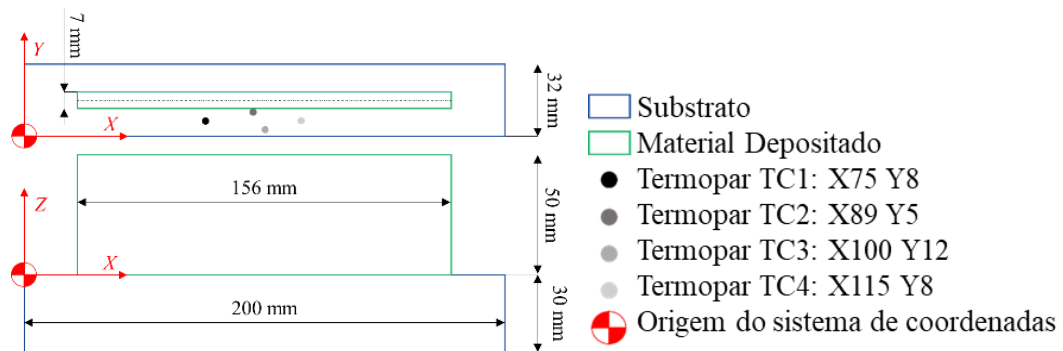


Figura 19 - Geometrias e termopares do experimento.

O sistema de refrigeração de jato de ar foi implementado na máquina WAAM, conectando um tubo de refrigeração, com saída no bocal de resfriamento com 3°mm de diâmetro, ao suporte da tocha. Ar seco foi fornecido à pressão de 0,6 MPa, resultando em um número de Reynolds de $2,2 \cdot 10^4$. A posição e orientação do jato de ar em relação à parede ou superfície contribuem significativamente para determinar o coeficiente de transferência de calor [Goldstein; Franchett, 1988]. Testes preliminares foram realizados para selecionar a posição e orientação do jato em relação à superfície lateral dos depósitos. A configuração adotada foi selecionada para aumentar a extração de calor e evitar instabilidades do arco elétrico devido à interferência do jato de ar no fluxo de gás de proteção. A Figura 20 (b) mostra o sistema de refrigeração proposto, enquanto a Figura 20 (c) destaca a configuração do jato de ar adotado.

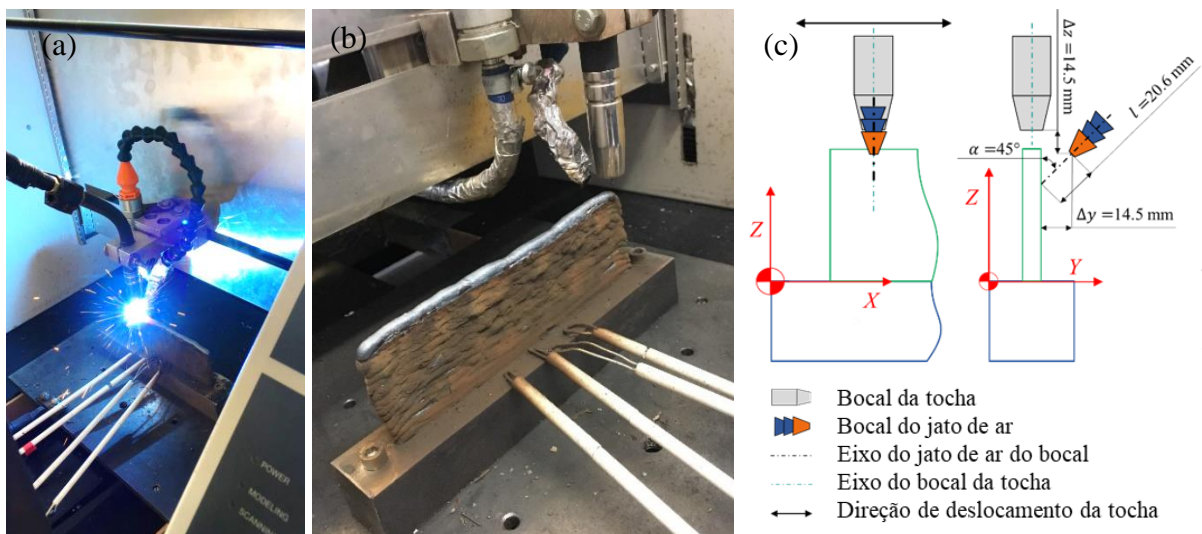


Figura 20 - (a) Amostra em deposição utilizando o resfriamento com jato de ar. (b) Sistema de resfriamento proposto. (c) Posição relativa do jato de ar-parede.

Diferentes amostras de casos foram produzidas variando: i) as condições de resfriamento, isto é, convecção natural e jato de ar; ii) os tempos de inatividade ou espera entre os depósitos.

A Tabela 10 resume as condições testadas, ou seja, os tempos de inatividade, as condições de resfriamento e a camada na qual o resfriamento com jato de ar é ativado.

Tabela 10 - Resumo das condições testadas.

Teste	Tempo de inatividade entre depósitos [s]	Condição de resfriamento	Camada inicial
1	120	Convecção livre	Nenhuma
2	120	Jato de ar	14
3	30	Convecção livre	Nenhuma
4	30	Jato de ar	11
5	10	Convecção livre	Nenhuma
6	10	Jato de ar	11

Todas as amostras foram produzidas utilizando um tempo de ociosidade entre depósitos de 120 s para um primeiro conjunto de camadas. Isso ocorre porque abaixo do décimo depósito o jato de ar transfere o ar imposto para o substrato no lugar da superfície lateral do depósito, resultando em possíveis interferências com o gás de proteção. Portanto, para evitar o possível colapso das amostras, o tempo de ociosidade entre camadas foi reduzido após um primeiro conjunto depositado. Os tempos de espera testados foram de 120 s, 30 s e 10 s.

A temperatura do substrato foi monitorada através de 4 termopares tipo-K fixados no substrato nas posições representadas na Figura 19. Os sinais de temperatura foram adquiridos a uma taxa de amostragem de 10 Hz, usando um módulo de termopares National Instruments 9212.

Para avaliar o aspecto superficial das amostras devido ao jato de ar aplicado para resfriamento, seguiu-se três etapas principais: fabricação das amostras, medições do aspecto superficial via uma máquina de medição por coordenadas (CMM) e processamento dos dados medidos para extrair as métricas de comparação das superfícies. Como mencionado por [Ríos et al., 2018], os principais parâmetros geométricos a serem controlados na produção de uma peça são a altura do cordão e a largura efetiva da parede.

O aspecto superficial das amostras manufaturadas foi adquirido usando uma CMM Mitutoyo EURO-C A776, equipado com uma sonda rotatória Renishaw PH10M. Ambas superfícies laterais e também a superior foram medidas utilizando os layouts apresentados na Figura 21 (a) e (b), respectivamente.

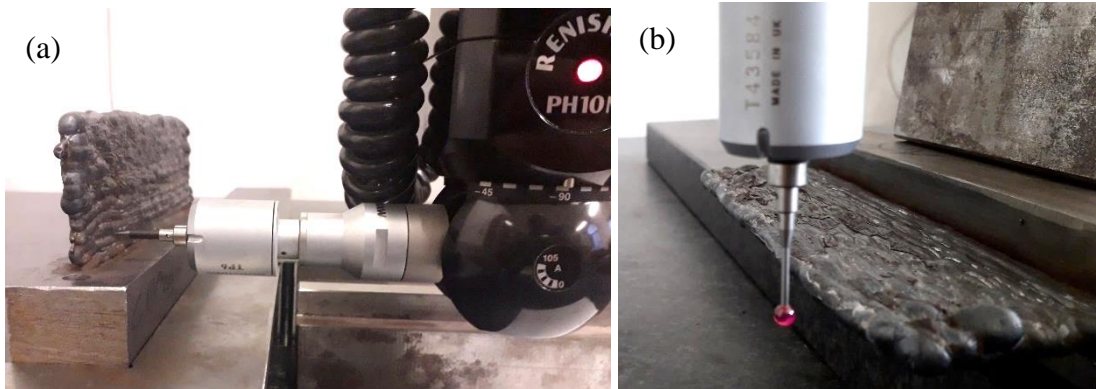


Figura 21 - (a) Layout da medição superficial dos depósitos com ponteira cônica. (b) Medição da altura dos depósitos com ponteira esférica.

As superfícies laterais foram medidas usando uma ponteira cônica para capturar a oscilação ou os vales e picos do aspecto superficial. A superfície superior foi medida usando uma sonda esférica de 4 mm de diâmetro. As superfícies laterais foram mapeadas utilizando um avanço de 10 mm na direção X (Figura 19 do sistema de coordenadas) e 0,1 mm na direção Z para aumentar a precisão de medição entre vales e picos da superfície. As superfícies superiores foram escaneadas usando um avanço de 10 mm na direção de X e medidos 7 pontos na direção Y, independente da largura do depósito. A Figura 22 (a) mostra uma representação das superfícies laterais medidas para o teste 1, isto é, 120 s de tempo ocioso entre depósitos no resfriamento por convecção natural.

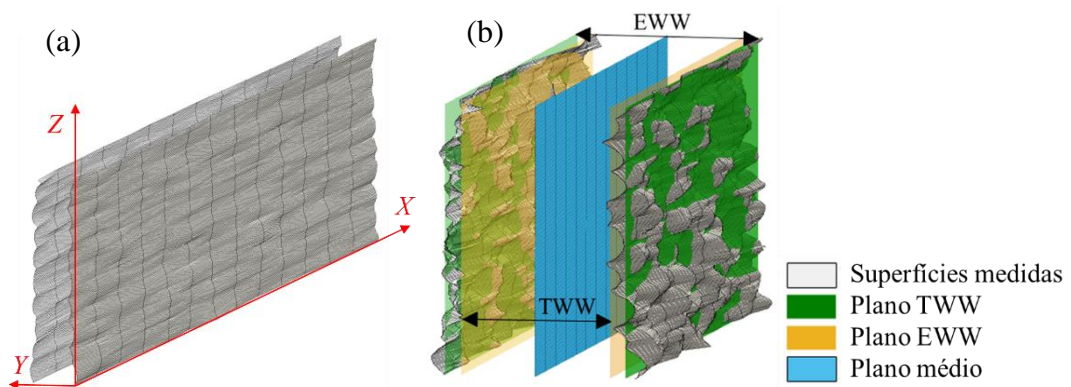


Figura 22 - (a) Superfícies medidas - teste 1. (b) Planos usados para calcular o EWW e TWW.

Os dados do CMM foram processados para extrair métricas de comparação relevantes: a eficiência de deposição, o desvio aritmético médio e a altura dos depósitos. Os dois primeiros índices foram derivados dos dados das superfícies laterais, enquanto a altura das paredes depositadas das superfícies superiores. A eficiência de deposição é definida por Jhavar et al [Jhavar et al., 2014] como a razão da largura efetiva da parede do inglês “*Effective Wall Width*” (EWW), ou seja, a largura máxima que pode ser obtida após a remoção das ondulações

superficiais por usinagem, sobre a largura total da parede do inglês “*Total Wall Width*” (TWW), ou seja, a largura máxima dos depósitos. Essa métrica é importante, pois a remoção da superfície externa é necessária para componentes que demandam bom acabamento superficial. Avalia-se ambas EWW e TWW utilizando um procedimento ligeiramente modificado, conforme destacado na Figura 22 (b)).

Primeiro, o plano médio é definido como o plano adequado ao quadrado mínimo de ambas as superfícies da parede (plano médios na Figura 22 (b)). Os planos TWW (Figura 22 (b)) então são definidos calculando a distância média entre os pontos das superfícies laterais e o plano médio da parede, e deslocando o plano médio ao longo da normal desse valor. Os planos EWW (Figura 22 (b)) são então definidos deslocando-se os planos TWW: o desvio padrão da distância entre os pontos de cada superfície lateral e seu respectivo plano TWW é calculado; os planos TWW são então traduzidos de uma distância igual a três vezes o desvio-padrão. Finalmente, TWW e EWW são calculados como a distância entre os planos TWW e EWW, respectivamente. O uso de uma abordagem estatística para calcular o EWW permitiu negligenciar defeitos aleatórios locais, cujo efeito se torna insignificante usando uma ampla base de amostras.

O desvio aritmético médio foi avaliado como a média das distâncias dos pontos de cada superfície em relação ao respectivo plano de melhor ajuste. A altura da parede foi calculada pela média da distância máxima entre cada linha de varredura na direção Y e a superfície superior do substrato.

A etapa seguinte do trabalho foi a avaliação do desempenho do jato de ar em uma abordagem numérico-experimental híbrida. Diferentes amostras foram fabricadas e a temperatura do substrato foi medida usando termopares do tipo-K. No entanto, os termopares fixados no substrato fornecem uma perspectiva limitada dos fenômenos de transferência de calor durante a deposição, pois fornecem dados pontuais em uma região distante da poça de fusão. Para ampliar a investigação, um modelo de elementos finitos foi usado para simular a deposição dos casos teste. Então os resultados da simulação foram comparados com os dados obtidos dos termopares para avaliar a precisão do modelo. Como o modelo de EF retorna o campo de temperatura transiente ao longo de todo o domínio da peça, uma previsão precisa da temperatura do substrato permite que a análise de transferência de calor seja estendida para diferentes regiões. Portanto, as temperaturas entre depósitos no topo de cada cordão foram extraídas dos resultados da simulação, fornecendo um parâmetro importante para avaliar a eficácia do resfriamento por jato de ar. Deve-se ressaltar que a análise apresentada dos

resultados da simulação visa fornecer uma comparação das tendências de temperatura entre camadas, em vez de quantificar com precisão suas modificações pontuais.

Na sequência está descrita a parte experimental do trabalho, isto é, os casos testes, a implementação do resfriamento por jato de ar e as condições experimentais. Em seguida o modelo de EF usado para simular os ciclos de resfriamento do estudo.

O objetivo foi avaliar a eficácia da imposição de um jato de ar na prevenção do acúmulo de calor em WAAM. O estudo experimental é uma geometria que traz desafios no sentido de acúmulo de calor: uma parede vertical em que sua altura é responsável por uma redução do fluxo de calor em direção ao substrato e o acúmulo de calor resultante. Esse valor foi definido em 50 mm, adotando a geometria de teste usada por Wu et al. [Wu et al., 2018b], suficiente para ter efeitos mensuráveis de diferentes estratégias de resfriamento e o tempo ocioso. O material de adição usado foi o aço ao carbono AWS ER70S-6, de 0,8 mm de diâmetro. Para evitar distorção excessiva, o substrato utilizado foi um bloco AISI 1040 com 30 mm de espessura. A deposição foi realizada usando uma fonte de energia AWELCO 250 Pulsemig conectada a uma fresadora de 3 eixos adaptada. A combinação dos parâmetros do processo foi selecionada após testes experimentais preliminares para manter um arco estável e com a menor transferência de calor possível: tensão do arco 18 V (tensão constante), corrente 93 A, velocidade de alimentação do arame 4,6 m/min, distância bico-de-contato-peça 10 mm, velocidade de deslocamento da tocha 3,33 mm/s, resultando em uma entrada de calor de 0,5 kJ/mm e gás de proteção Ar + 17 % de CO₂ fornecido a 15 l/min. Tais parâmetros resultaram em cordões com 7,5 mm de largura e 2,0 mm de espessura, exigindo 25 camadas para fabricar a geometria selecionada. Cabe ressaltar que a precisão das técnicas de modelagem em EF utilizadas neste trabalho foram previamente verificadas com esse conjunto de parâmetros de processo [Montevecchi et al., 2018a], a fim de obter uma análise confiável da temperatura entre camadas. O substrato e depósitos seguiram o posicionamento no protótipo WAAM como mostrado na Figura 20 (b). A Figura 19 mostra a orientação da peça de trabalho em relação aos eixos da máquina WAAM.

A temperatura do substrato foi monitorada através de 4 termopares tipo-K com um diâmetro de 1,29 mm. Os termopares não eram blindados, com junção quente exposta e isolamento cerâmico. Os termopares foram fixados por descarga elétrica na superfície superior do substrato, como mostrado na Figura 20 (b). As posições dos termopares, em relação ao sistema de coordenadas, estão indicadas na Figura 19. O uso de múltiplos pontos de medição permitiram uma comparação mais detalhada das simulações e experimentos de EF. Os dados

dos termopares foram adquiridos usando um módulo 9212 da marca National Instruments. Todos os sinais foram gravados a uma taxa de amostragem de 10 Hz.

Um tubo refrigerante para aplicações de usinagem com um bocal de 3 mm de diâmetro foi acoplado ao suporte da tocha. O reduzido diâmetro do bico foi escolhido para permitir o posicionamento em diferentes ângulos na proximidade da tocha de soldagem. O tubo foi conectado ao plenum de 0,2 m³ e fornecida com ar seco a uma pressão de 0,6 MPa. O fluxo de ar foi iniciado por uma válvula solenoide controlada pelo controle numérico da máquina WAAM para ser sincronizado com as deposições. O gerenciamento da válvula foi realizado graças a uma macro do controle numérico projetada especificamente para permitir que uma função M controle o solenóide que ativa o jato de ar. A Figura 20 (b) ilustra a implementação do sistema de resfriamento na máquina WAAM, enquanto a Figura 20 (a) representa a deposição em andamento usando o sistema de resfriamento a jato de ar proposto.

A seleção dos parâmetros do jato de ar é importante para obter um coeficiente de fluxo de calor elevado. De acordo com Goldstein and Franchett [Goldstein; Franchett, 1988], o coeficiente de transferência de calor local para um jato de ar imposto em uma superfície alvo pode ser calculado através da correlação descrita na Equação 1:

$$Nu(r, \phi) = A \cdot Re^{0,7} \exp - \left(B + C \cos(\phi) \left(\frac{r}{d} \right)^{0,75} \right) \quad (1)$$

Nu é o número de Nusselt, ou seja, a forma adimensional do coeficiente de transferência de calor, Re é o número de Reynolds avaliado na seção de saída do bocal, r e ϕ definem as coordenadas polares da superfície alvo em um sistema centrado na interseção entre o eixo do jato e a superfície alvo, e A , B e C são coeficientes adimensionais determinados pelos experimentos. Goldstein e Franchett [Goldstein; Franchett, 1988] destacaram que esse coeficiente depende do ângulo (α) entre o eixo do jato e a superfície alvo e da razão (l/d) da distância de afastamento e do diâmetro do bocal. A Equação 1 indica que o coeficiente de transferência de calor tem um decaimento exponencial em relação ao seu valor máximo no ponto de interseção. Para diminuir α e aumentar os valores de l/d , Nu experimenta um aumento no coeficiente de decaimento e no valor de pico. Portanto, para um dado diâmetro do bocal e taxa do fluxo de ar, um jato perpendicular e uma baixa distância de afastamento aumentam o coeficiente de transferência de calor. No entanto, em WAAM o aumento de ambos, o ângulo α e a proximidade do bocal é limitado pela interferência do jato de ar no gás de proteção do arco elétrico, uma vez que a mistura excessiva pode levar a instabilidades do arco, isto é, a

perturbação da região do gás de proteção do arco. Testes preliminares realizados com o bocal perpendicular à superfície da parede destacaram que essa condição não permitia a obtenção de um arco estável, independentemente da vazão do ar ou da distância de afastamento. Com base nesses testes, a posição e a orientação do bocal representadas na Figura 20 (c) com um ângulo de inclinação de 45° foram adotadas para os testes de deposição. A geometria do caso de teste experimental é apresentada na Figura 19.

O eixo do bocal de ar estava localizado no mesmo plano XZ que o eixo da tocha, permitindo que o eixo do jato tivesse acesso a superfície da parede em todas as posições X da tocha, ou seja, durante a deposição de toda a camada. O posicionamento em Δz e Δy (destacadas na Figura 20 (c) definem a posição do bocal no plano YZ . A distância em Δy foi ajustada no valor mínimo possível para evitar sua interferência com o substrato. No caso de Δz , a diminuição de seu valor move a interseção do eixo do jato de ar e a superfície alvo para mais perto da poça de fusão. Isso resulta em um maior gradiente de temperatura do fluido para a superfície, aumentando a extração de calor. No entanto, uma proximidade excessiva à borda do bocal da tocha resultaria em uma contaminação do gás de proteção. Portanto, após muitos testes experimentais preliminares, o valor de 14,5 mm, Figura 20 (c), foi selecionado como um balanço entre esses requisitos opostos. Com base em uma análise da correlação de [Goldstein; Franchett, 1988], o ângulo α foi ajustado em 45° , uma vez que ângulos menores resultaram em uma redução prejudicial dos coeficientes de transferência de calor. Tal arranjo geométrico resultou em uma distância, l , de 20,6 mm, isto é, em uma relação l/d de 6,9.

Testes preliminares adicionais foram realizados usando a orientação e a localização propostas do jato de ar para identificar a vazão máxima possível e evitar problemas de instabilidade do arco. O Re da vazão selecionada foi 22000, o que está próximo do centro da faixa de Re coberto pela correlação Goldstein e Franchett [Goldstein; Franchett, 1988].

Como mencionado anteriormente, diferentes amostras dos casos de teste foram fabricadas usando diferentes tempos de inatividade, em condições de convecção natural e de resfriamento por jato de ar. Para todas as amostras, as 10 primeiras camadas foram depositadas usando resfriamento padrão e 120 s de tempo ocioso entre camadas. Essa estratégia foi selecionada, pois a ativação do resfriamento a jato abaixo desse nível não permitia que o jato de ar visasse a superfície da parede. O tempo ocioso de 120 s também foi utilizado por Gou et al. [Gou et al., 2019] na deposição de camadas subsequentes com Ti6Al4V usando o processo CMT, permitindo que o material depositado esfrie abaixo da temperatura de transformação de fases. O tempo ocioso entre camadas utilizado por Li et al. [Li et al., 2019a] foi de 33 s e

incremento na direção vertical de 1,6 mm em cada camada. Após a camada número 10, as dimensões das camadas anteriores permitiram que o ar fluísse sobre a superfície dos depósitos, evitando turbulências que podem interferir no gás de proteção.

Para a modelagem em elementos finitos, o processo de deposição foi simulado usando uma análise de transferência de calor por EF para obter o campo de temperatura total da peça, realizado de forma similar por Casalino et al. [Casalino et al., 2019], onde a simulação por EF foi usada para prever a transformação do perfil de temperatura em um endurecimento superficial por laser com uma fonte de calor cilíndrica no metal AISI 4130. As simulações foram realizadas usando o solucionador de EF comercial, LS-DYNA. As técnicas de modelagem WAAM, como a movimentação da fonte de calor, o algoritmo de ativação dos elementos e os modelos de comportamento dos materiais, baseiam-se em pesquisas anteriores [Montevecchi et al., 2016, 2017a]. A Figura 23 representa o modelo EF utilizado para simular a deposição dos casos de teste.

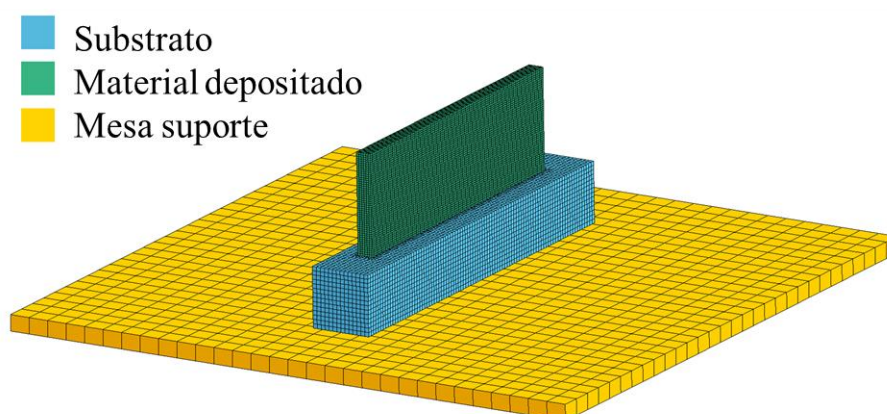


Figura 23 - Modelo de EF para os casos teste.

A geometria foi discretizada usando 60274 elementos hexaédricos sólidos de 1ª ordem, resultando em 75017 nós. O domínio de modelagem foi estendido para a suporte da mesa da peça de aço, uma vez que o fluxo de calor por condução do substrato é uma contribuição relevante para a extração de calor em geral. A condução entre o substrato e a mesa de fixação da peça foi incluída usando um algoritmo de contato. A condutividade da interface foi ajustada para 2000 W/m² °C com base em dados da literatura [Sridhar; Yovanovich, 1996]. O efeito do jato de ar imposto foi incluído usando a técnica apresentada em [Montevecchi et al., 2018b]. Os diferentes tempos de inatividade (ociosidade) foram simulados variando-se a duração dos intervalos em ligado/desligado da fonte de calor. Uma fonte de calor semi-elíptica 3D em movimento foi usada por Mirkoohi et al. [Mirkoohi et al., 2019] para prever o perfil de

temperatura na fabricação de aditivos metálicos baseados em laser, os autores também usaram propriedades térmicas do material como dependentes da temperatura. Além disso, verificou-se que o espaçamento temporal (atraso de tempo entre duas irradiações da poça de fusão) não influencia a evolução das propriedades térmicas do material.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A subseção 5.1 apresenta o trabalho inicial, onde foram avaliados os parâmetros do processo e a sua influência na geometria e qualidade do cordão depositado. Para isso, diversos experimentos foram realizados a fim de determinar intervalos para W , v e DBCP onde a estabilidade do arco elétrico fosse atingida. Após se realizou um refinamento com o projeto de experimentos Box-Behnken.

A subseção 5.2 avaliou as propriedades mecânicas para os eletrodos AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G utilizando as formas de onda de corrente pulsado sinérgico, sinérgico e convencional. Também se avaliou o modo Polaridade Variável, o qual apresentou discontinuidades.

A subseção 5.3 continua com as propriedades mecânicas para o aço AISI H13. Nela são avaliados modos de transferência como CMT, LSC e novamente o Pulsado.

A subseção 5.4 determina o efeito do resfriamento no aspecto superficial das amostras produzidas com o eletrodo AWS ER70S-6. Também avalia a influência do tempo de inatividade entre depósitos “*idle time*”.

A subseção 5.5 apresenta o fechamento do trabalho, com os resultados da investigação numérica-experimental híbrida sobre a eficácia do jato de ar imposto. Nenhuma das amostras fabricadas mostrou evidência de discontinuidades visíveis. Apresenta os resultados experimentais, discutindo as tendências gerais dos termopares nas diferentes condições testadas. Finalmente, apresenta a comparação entre os termopares e os dados da simulação, estendendo a comparação entre o jato de ar e o resfriamento por convecção natural até o padrão de temperatura entre camadas.

5.1 Resultados: estudo preliminar dos parâmetros de processo

Inicialmente, testes foram realizados para determinar as faixas de variação dos parâmetros, onde são eliminados cordões com elevada instabilidade do arco, irregularidade superficial e geometria da seção transversal inadequada para as deposições. São 3 parâmetros

variados em 3 níveis cada para o projeto de experimentos Box-Behnken. São depositados 15 cordões e realizadas as macrografias da seção transversal para análise da geometria. Esse processo é realizado para cada variação do modo de onda da corrente de soldagem. O cordão com geometria adequada é escolhido para deposições em camadas, do qual são retirados corpos de prova para análise das propriedades mecânicas e microestrutura. A Figura 24 ilustra as deposições iniciais verificando a viabilidade do empilhamento vertical, antes de iniciar o estudo com projeto de experimentos.

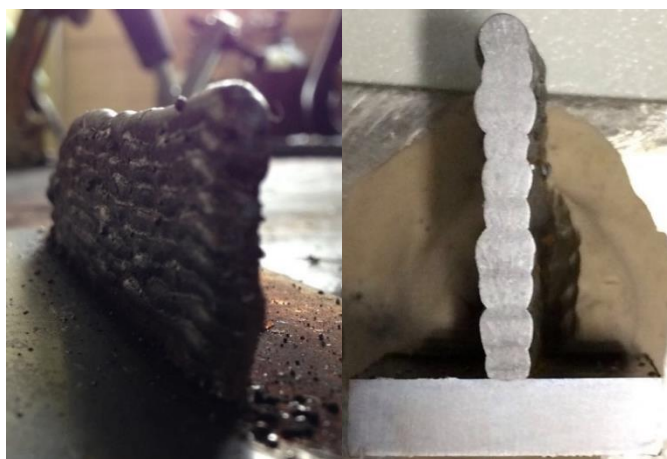


Figura 24 – Deposições iniciais verificando a viabilidade do empilhamento vertical. Modo Pulsado Sinérgico com eletrodo AWS ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro.

Inicialmente, foram depositados cordões resultantes da análise da geometria para a faixa de velocidade de deslocamento da tocha de 2 mm/s a 10 mm/s. Os parâmetros de soldagem variados para cada nível de combinação do Box-Behnken para avaliação da área do reforço e média do ângulo de inclinação do cordão depositado seguem conforme Tabela 11. O modo de transferência projetado para o processo pulsado sinérgico com a fonte Fronius e eletrodo AWS ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro.

Tabela 11 - Parâmetros variados para o modo sinérgico pulsado.

Parâmetros	Níveis de variação		
	-1	0	+1
W (m/min)	6,0	6,7	7,5
v (mm/s)	2,0	6,0	10,0
DBCP (mm)	16	18	20

O resultado dos testes preliminares para o modo pulsado sinérgico estão representados na Tabela A.1 do APÊNDICE A, variou-se W, DBCP e v , indicando que para valores acima ou abaixo dos níveis da Tabela 11 não houve cordão satisfatório para o empilhamento.

A análise de variância dos parâmetros estudados para a área do reforço com o modo pulsado sinérgico apresentou coeficiente de regressão R^2 de 99,92%. Os fatores significativos na ordem decrescente de $F_{\text{calculado}}$, foram: v^2 ; v ; $W \cdot v$; $v \cdot \text{DBCP}$. O APÊNDICE A.2 apresenta a tabela completa. A Figura 25 apresenta os gráficos de contorno com os resultados do Box-Behnken para a área do reforço com pulsado sinérgico.

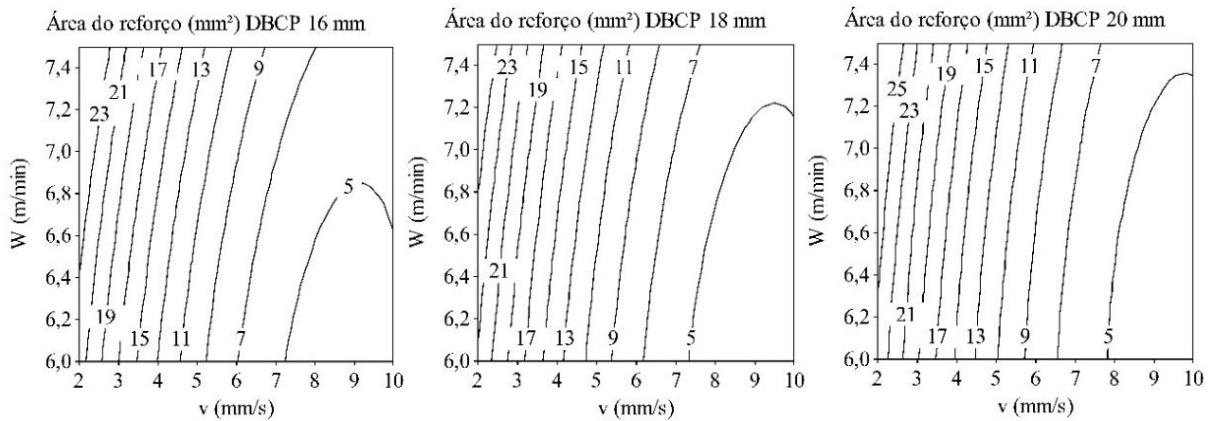


Figura 25 – Gráficos de contorno para a área do reforço. Variação de W , v e DBCP.

A análise de variância dos parâmetros estudados para a média do ângulo de inclinação do cordão com o modo pulsado sinérgico apresentou coeficiente de regressão R^2 de 95,83%. Os fatores significativos na ordem decrescente de $F_{\text{calculado}}$, foram: v ; v^2 . O APÊNDICE A.3 apresenta a tabela completa. A Figura 26 apresenta os gráficos de contorno com os resultados do Box-Behnken para a média do ângulo de inclinação ao metal base mais próximo de 90° para o pulsado sinérgico. O ângulo medido usa como referência a superfície superior do metal base como 0° , no corte transversal da macrografia é traçado uma reta com origem no pé do cordão e tangente à superfície lateral do cordão, evitando a sobreposição da reta com a seção transversal.

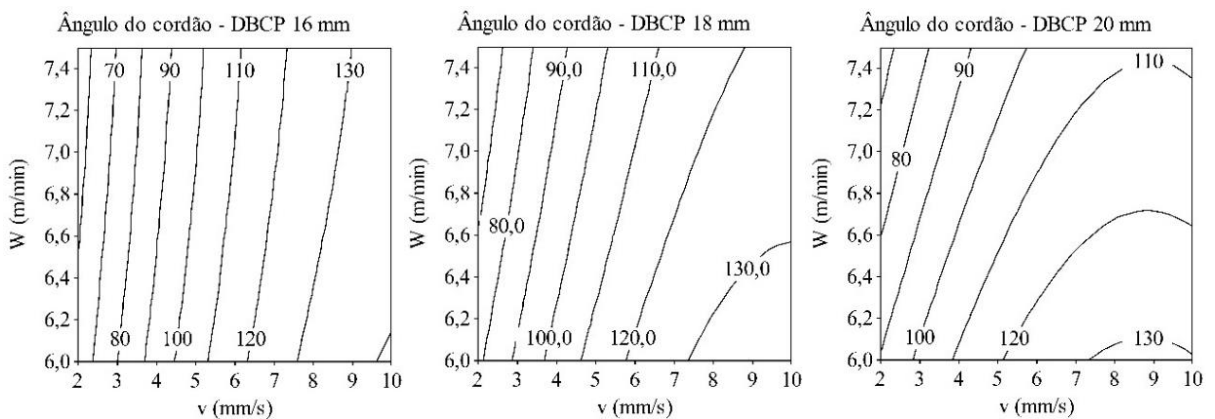


Figura 26 - Gráficos de contorno para o ângulo do cordão. Variação de W , v e DBCP.

Após a determinação dos gráficos de contorno para o ângulo do reforço e área do cordão se buscou otimizar esses valores para maximizar a área e aproximar o ângulo de 90° . Seguiram-se quatro tentativas, porém como exposto a seguir, essa abordagem não se provou adequada devido ao surgimento de defeitos como sobreposição do reforço e falta de fusão, que não são previstos no modelo matemático estatístico. Esses defeitos geram cordões com geometrias inadequadas para a manufatura aditiva.

Na primeira otimização se buscou determinar a combinação dos parâmetros para obter área alvo de 28 mm^2 (máximo obtido) e ângulo de inclinação do cordão de 90° . Os parâmetros foram $W = 6,0 \text{ m/min}$; $v = 2,0 \text{ mm/s}$; $\text{DBCP} = 20 \text{ mm}$. A função desejabilidade composta apresentou um valor baixo, de $0,737$. A Tabela C.1 completa está no APÊNDICE C. O resultado apresentou sobreposição do reforço próximo as bordas do cordão, Figura 27 (a). O ângulo do cordão obtido foi de 99° e área do reforço de 21 mm^2 . A segunda otimização se objetivou a menor área do cordão com mínimo de 10 mm^2 e ângulo de 90° . Os parâmetros foram $W = 7,5 \text{ m/min}$; $v = 4,2 \text{ mm/s}$; $\text{DBCP} = 17,5 \text{ mm}$. A função desejabilidade composta apresentou valor de $0,809$. O resultado obtido foi a não otimização do ângulo do cordão, ou seja, não atingiu os valores alvos pré-determinados. Os resultados foram de 110° e $14,19 \text{ mm}^2$ para ângulo e reforço, respectivamente. A Tabela C.2 completa está no APÊNDICE C.

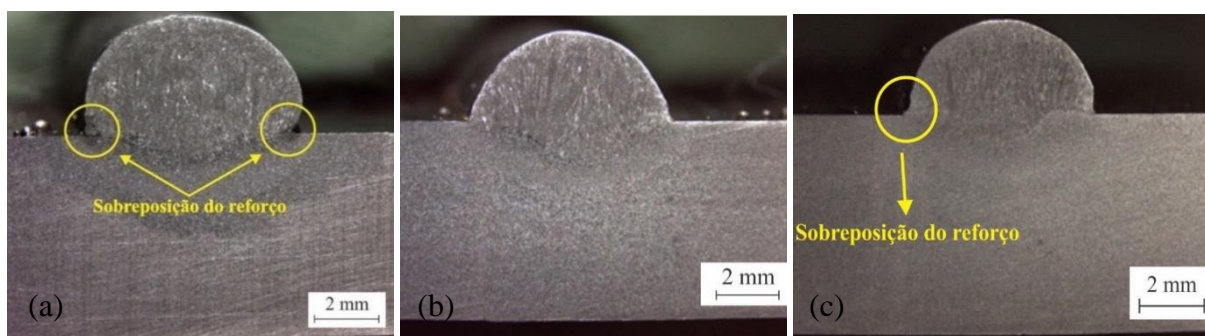


Figura 27 – (a) $W = 6,0 \text{ m/min}$; $v = 2,0 \text{ mm/s}$; $\text{DBCP} = 20 \text{ mm}$. (b) $W = 7,5 \text{ m/min}$; $v = 4,2 \text{ mm/s}$; $\text{DBCP} = 17,5 \text{ mm}$. (c) $W = 6,1 \text{ m/min}$; $v = 3,7 \text{ mm/s}$; $\text{DBCP} = 16 \text{ mm}$.

A terceira tentativa de otimização visou a menor área do cordão com ângulo de 90° e minimizar a área do reforço. Os parâmetros foram $W = 6,1 \text{ m/min}$; $v = 3,7 \text{ mm/s}$; $\text{DBCP} = 16 \text{ mm}$. A função desejabilidade composta apresentou valor de $0,88$. A Tabela C.3 completa está no APÊNDICE C. O cordão resultante não apresentou defeito, porém não otimizou o ângulo. A área se comportou como esperado, Figura 27 (c). O ângulo do cordão obtido foi de $101,1^\circ$ e área do reforço de 12 mm^2 . A quarta otimização buscou a menor área como alvo e ângulo de 90° , foram modificados em relação as demais tentativas o peso e a importância. Os parâmetros

foram $W = 6,0$ m/min; $v = 4,8$ mm/s; DBCP = 16 mm. A função desejabilidade composta apresentou valor de 0,88. A Tabela C.4 completa está no APÊNDICE C.

A otimização do ângulo do cordão e das áreas do reforço não se apresentaram efetivas para os valores buscados em relação a combinação de parâmetros utilizada. Defeitos como sobreposição foram encontrados, os defeitos não são previstos pelo modelo matemático gerado para otimizar as características geométricas do cordão. Observou-se que existe uma região de transição entre o cordão de menor área e o de maior área de reforço onde se encontrou especialmente a sobreposição. Em geral os cordões com menor área apresentaram boas características quando com ângulo do cordão de 100° e área em torno de $10,5$ mm². Os cordões com maior área apresentaram boas características com ângulo do cordão em torno de 70° e área de 23 mm².

A partir das dificuldades encontradas em otimizar os dois parâmetros, optou-se pelo uso da sobreposição dos gráficos de contorno, com o objetivo de determinar áreas que possibilitem a escolha dos parâmetros pela análise gráfica direta dos resultados obtidos.

A seguir, seguem os gráficos de contorno sobrepostos para determinar a área do reforço entre 8 e 12 mm² e ângulo do cordão entre 80 e 120° com o objetivo de obter a melhor combinação dos parâmetros para o cordão com menor área de reforço e geometria para empilhamento aceitável, Figura 28. O objetivo dessa combinação de parâmetros é a obtenção de uma parede de cordões empilhados mais esbelta. Nos gráficos de contorno sobrepostos, a linha sólida (valor mínimo) e a pontilhada (valor máximo) em vermelho representam a região que atende ao ângulo do cordão buscado. A região delimitada pela linha sólida verde representa a máxima área do reforço, enquanto a linha pontilhada verde a área mínima. Esse padrão de cores é o mesmo em todo o trabalho para os gráficos de contorno sobrepostos.

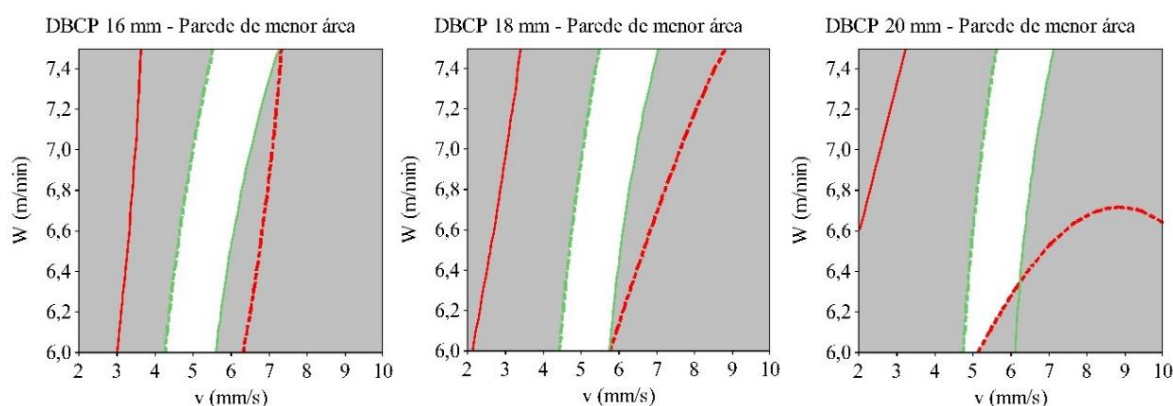


Figura 28 – Combinação de parâmetros para o cordão com parede de menor área. Linha vermelha delimita o ângulo do cordão, pontilhada 80° e sólida 120° . Linha verde delimita a área do reforço, pontilhada 8 mm² e sólida 12 mm².

A Figura 29 apresenta os gráficos de contorno sobrepostos para determinar a área do reforço entre 20 e 26 mm² e ângulo do cordão entre 80 e 120° com o objetivo de obter a melhor combinação dos parâmetros de soldagem para o cordão com maior área de reforço e geometria para empilhamento aceitável.

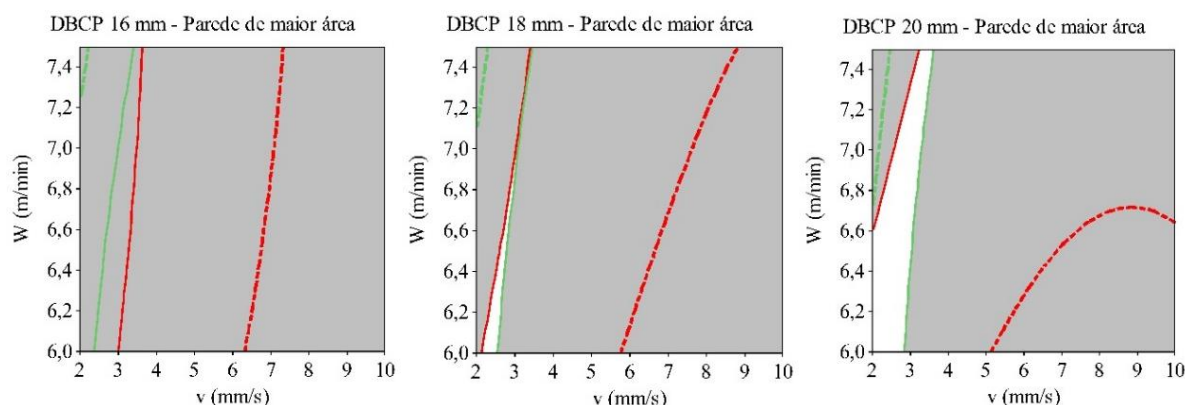


Figura 29 - Otimizações para a forma de onda pulsado sinérgico.

Após a análise das regiões otimizadas nos gráficos para as deposições com um cordão de menor área e outro de maior área, se tentou realizar as deposições com os parâmetros da Tabela 12 utilizando o eletrodo AWS ER70S-6 de 0,8 mm e modo pulsado sinérgico.

Tabela 12 – Parâmetros de soldagem para as deposições preliminares com Pulsado Sinérgico.

Empilhamento preliminar Pulsado Sinérgico	Deposição “estrita” Cordão nº4	Deposição “larga” Cordão nº 11
W (m/min)	7,5	6,0
v (mm/s)	6,0	2,0
DBCP (mm)	16	18
Potência (W)	2226	1709
Energia (J/mm)	371	854,5
Corrente I (A)	79	64
Tensão U (V)	21	19

Novamente, os depósitos obtidos não foram satisfatórios, então se optou pela combinação de parâmetros do Box Behnken que produziram cordões satisfatórios considerando a geometria e estabilidade do arco. Os cordões escolhidos foram o 4 e o 11 para menores e maiores valores de área de reforço, respectivamente, Tabela 1. O ângulo desejado foi o mais próximo a 90°.

A Figura 30 demonstra os cordões depositados, onde a esquerda mostra os cordões com maior área de reforço e a direita os cordões com menor área de reforço. O número de cordões está indicado na figura, setas na cor amarela dez cordões e em verde cinco cordões empilhados.

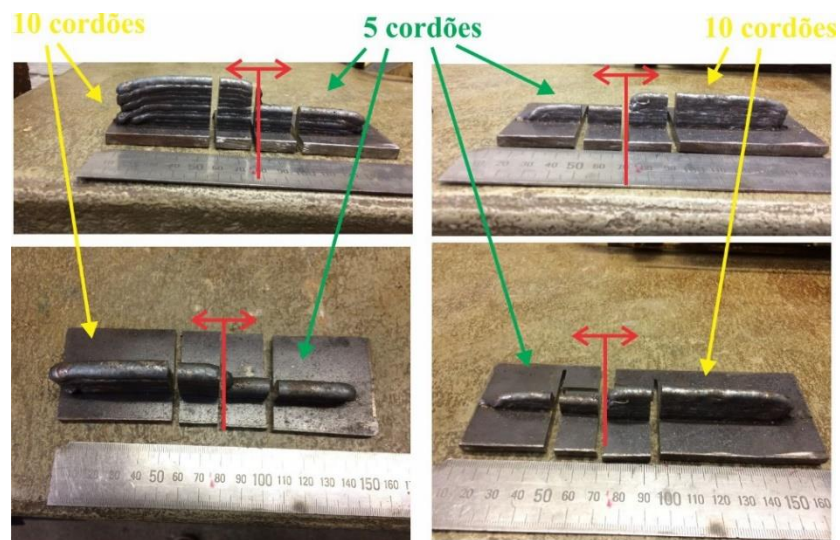


Figura 30 - Depósito com 10 e 5 cordões para maior área de reforço (esquerda). Depósito com 5 e 10 cordões para menor área de reforço (Direita).

Tal experimento foi realizado a fim de observar se o comportamento do empilhamento é equivalente ao de um cordão. Foram realizados quatro empilhamentos, dois com a otimização para maior área de reforço, um com cinco cordões empilhados e outro com dez cordões empilhados. Os outros dois com a otimização para a menor área do reforço, igualmente com cinco e dez cordões. As macrografias estão apresentadas na Figura 31.

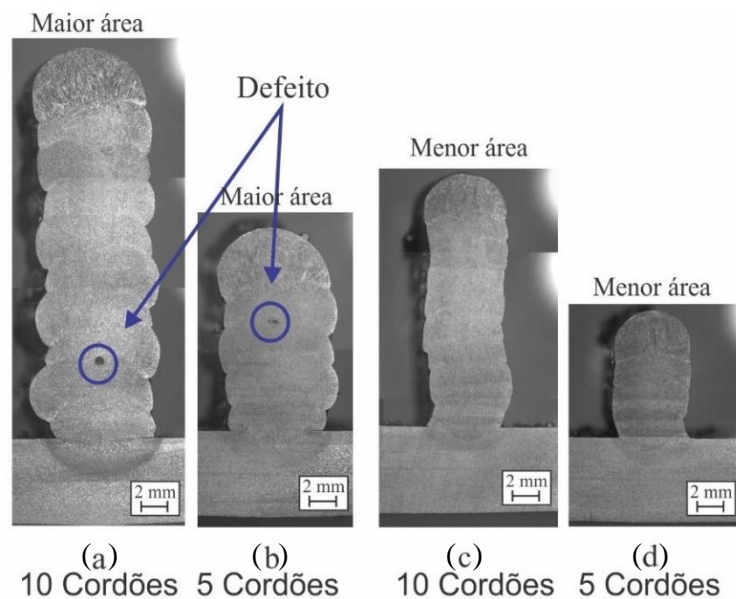


Figura 31 - Macrografia dos empilhamentos. (a) Otimização para maximizar área do reforço, com 10 cordões. (b) Otimização para maximizar área do reforço, com 5 cordões. (c) Otimização para minimizar área do reforço, com 10 cordões. (d) Otimização para minimizar área do reforço, com 5 cordões.

Nos depósitos ficam evidentes os defeitos (setas azuis), Figura 31, para as otimizações para maximizar a área do reforço, também se verifica grande irregularidade nas laterais. Já para as otimizações para minimizar a área do reforço não fica evidente defeito na seção transversal ou irregularidades nas laterais.

Após o processo exploratório dos parâmetros de soldagem e geometria do cordão algumas observações puderam ser delineadas para a continuidade do trabalho: os depósitos de cordões de solda para manufatura aditiva através processo de soldagem GMAW pulsado sinérgico com Ar + 10% CO₂ são possíveis. A otimização do ângulo do cordão e área do reforço não foi satisfatória através do projeto de experimentos Box Behnken para a faixa de valores escolhidos, os valores medidos não foram semelhantes aos previstos. Porém através da análise direta, visual, dos resultados se pode escolher parâmetros adequados. A abordagem de realizar duas análises para maior e menor área de reforço, simultâneas, para o mesmo diâmetro de arame mostrou-se ineficiente.

A abordagem deve ser realizada independente para maior área e para menor área de reforço, para se verificar a efetividade da otimização pelo Box Behnken. A janela de parâmetros escolhida para avaliação dos cordões se mostrou muito ampla para a velocidade de deslocamento da tocha de 2 a 10 mm/s, novos testes devem ser realizados para cada situação, limitando a velocidade para o estudo dos parâmetros adequados. Para o cordão de menor área se utilizou 2 a 4 mm/s. Para o cordão de maior área a velocidade de 4 a 6 mm/s. As macrografias dos cordões com geometria aceitável para deposições subsequentes e com estabilidade do arco elétrico para o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro estão demonstradas na Figura 32. Foram os seguintes, Figura 32: (a) G1 Pulsado sinérgico, cordão n° 3; (b) G2 Pulsado sinérgico, cordão n° 4; (c) G3 Sinérgico, cordão n° 3. A numeração dos cordões é relativa à Tabela 3.

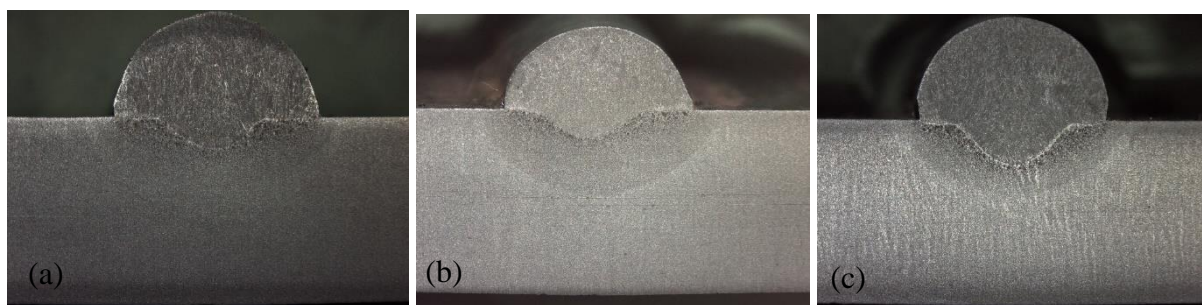


Figura 32 – (a) G1 – Pulsado sinérgico - cordão n° 3. (b) G2 – Pulsado sinérgico – cordão n° 4. (c) G3 – Sinérgico – cordão n° 3.

Não foram depositados os cordões para o sinérgico com velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s. Optou-se pelo modo convencional (G4), esse modo foi escolhido devido à instabilidade do arco elétrico para as deposições com sinérgico para a velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s. A alimentação do eletrodo apresentou forte instabilidade em diversas regiões do cordão, mesmo com as tentativas de regulagem do freio da bobina de arame., provavelmente devido à atuação do fenômeno de autoajustagem que para os parâmetros e materiais usados não encontrou um equilíbrio. Então se optou por manter os parâmetros que seriam do modo sinérgico e avaliar o depósito resultante no modo convencional.

Os cordões para as deposições com o eletrodo AWS ER70S-6 de 0,8 mm de diâmetro foram selecionados devido a geometria mais adequada, por não apresentar defeitos e devido ao ângulo de inclinação do cordão ser adequado para sucessivas deposições verticais. A combinação dos parâmetros entre os modos de transferência por projeção (pulsado) e curto-circuito foi a mesma, ou seja, $G1 = G4$ e $G2 = G3$, conforme Tabela 13. Foi possível manter a mesma velocidade de alimentação para todos, mantendo a potência aproximada, minorando o efeito da variável velocidade de alimentação e possibilitando a análise dos demais efeitos. Entre os resultados geométricos avaliados, a área do reforço apresentou a maior variação entre os modos de transferência para os mesmos parâmetros.

Tabela 13 – Parâmetros para deposição com AWS ER70S-6 0,8 mm.

AWS ER70S-6	Pulsado Sinérgico (G1)	Pulsado Sinérgico (G2)	Sinérgico (G3)	Convencional (G4)
W (m/min)	7,5	7,5	7,5	7,5
v (mm/s)	3	4	3	4
DBCP (mm)	20	18	20	18
Potência (W)	2074	1999	2019	1955
Energia (J/mm)	691	500	673	489
Corrente I (A)	74	72	106	108
Tensão U (V)	20,5	20,5	18,9	18,4

A Tabela 14 representa os dados para a otimização do modo de corrente PV após a avaliação dos resultados obtidos pelo Box-Behnken com os 15 cordões depositados para a janela de parâmetros da Tabela 6. Esses experimentos foram realizados com o eletrodo AWS ER70S-6 de 1,0 mm pois já estava prevista a deposição com o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm para esse modo de corrente.

Tabela 14 - Otimização Polaridade Variável.

Otimização	Tn (ms)	Tb (ms)	In (A)	I eficaz (A)	U eficaz (V)
1	7	7	-70	137	31,8
2	5	7	-80	125	37
3	15	5	-100	141	30,6

Após a avaliação da macrografia e estabilidade do arco se optou pela combinação de parâmetros relativa a otimização 2 da Tabela 14. Manteve-se a $I_p = 300$ A, $t_p = 2,5$ ms e $I_b = 30$ A fixos. A velocidade de alimentação do eletrodo foi de 4,5 m/min, velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s e DBCP de 18 mm. A energia de soldagem resultante foi de 560 J/mm para o modo PV. Os principais parâmetros de soldagem para os depósitos realizados com o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm estão na Tabela 15. Esses ensaios representam a continuidade do trabalho com o modo de corrente pulsado sinérgico (G5), sinérgico (G6) e polaridade variável (G7). As justificativas pela escolha desses modos seguem no decorrer do texto.

Tabela 15 – Parâmetros de soldagem e resultados de energia. Eletrodo AWS ER110S-G.

AWS ER110S-G	Pulsado Sinérgico (G5)	Sinérgico (G6)	Polaridade Variável (G7)
W (m/min)	5,0	5,0	4,5
v (mm/s)	4,0	4,0	4
DBCP (mm)	18	18	18
Potência (W)	2646	2625	2235
Energia (J/mm)	661	656	560
Corrente I (A)	97 (Média)	134 (Média)	125 (Eficaz)
Tensão U (V)	20,9	19,5	22,8

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos para os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo de corrente pulsado sinérgico G1 para o eletrodo AWS ER70S-6 estão representados APÊNDICE E1.1.

5.2 Resultados: propriedades mecânicas AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G

Os corpos de prova do ensaio de tração para o modo de corrente pulsado sinérgico do grupo 1 – G1, estão representados na Figura 33 (a). Nota-se a região com corte de onde foram retiradas as amostras para ensaio de dureza e micrografia. A altura das amostras embutidas foi de aproximadamente 15 mm. Os resultados do ensaio do Meio 1-2 devem ser desconsiderados,

pois ocorreu erro do operador da máquina de ensaio no posicionamento do corpo de prova. Os demais ensaios de tração apresentados no trabalho ocorreram de forma padrão e seus resultados podem ser considerados para avaliar os fenômenos estudados nesse trabalho.

As amostras após o ensaio de microdureza HV do G1 Pulsado Sinérgico para o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro estão representadas na Figura 33 (b). A distância entre os pontos indentados foi de 0,5 mm portanto com 20 pontos por amostra. A altura média de cada cordão após a deposição foi de 4 mm, então em média 4 pontos de dureza cobrem a altura de cada cordão. As amostras embutidas possuem 10 mm de altura e 4 mm de largura, a linha de dureza foi realizada ao longo da seção transversal em seu centro. Esse procedimento foi repetido para todos os ensaios de microdureza HV. A carga foi de 300 g pelo tempo de 10 s. O sentido de indentação foi de baixo para cima, ou seja, cordão inferior para o superior.

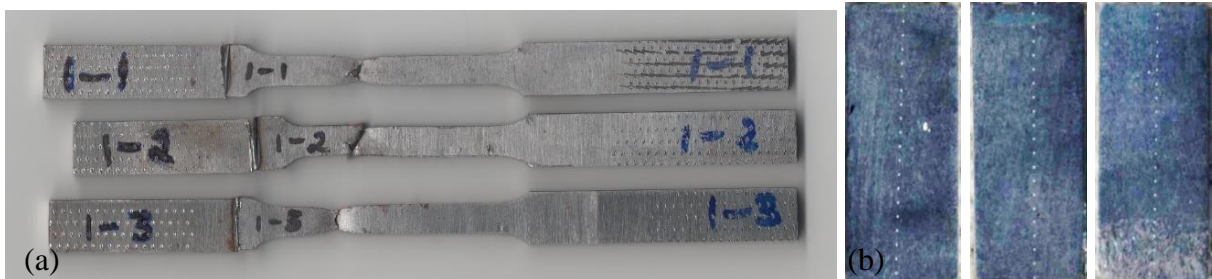


Figura 33 – (a) Corpos de prova após o ensaio de tração. G1-1 Topo; G1-2 Meio; G1-3 Base. Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6. (b) Amostras para ensaio de dureza HV. G1-3 Base, G1-2 Meio e G1-1 Topo, respectivamente.

O gráfico com as curvas de tensão versus deformação para o modo de corrente pulsado sinérgico G1 com o metal de adição AWS ER70S-6 estão representadas na Figura 34.

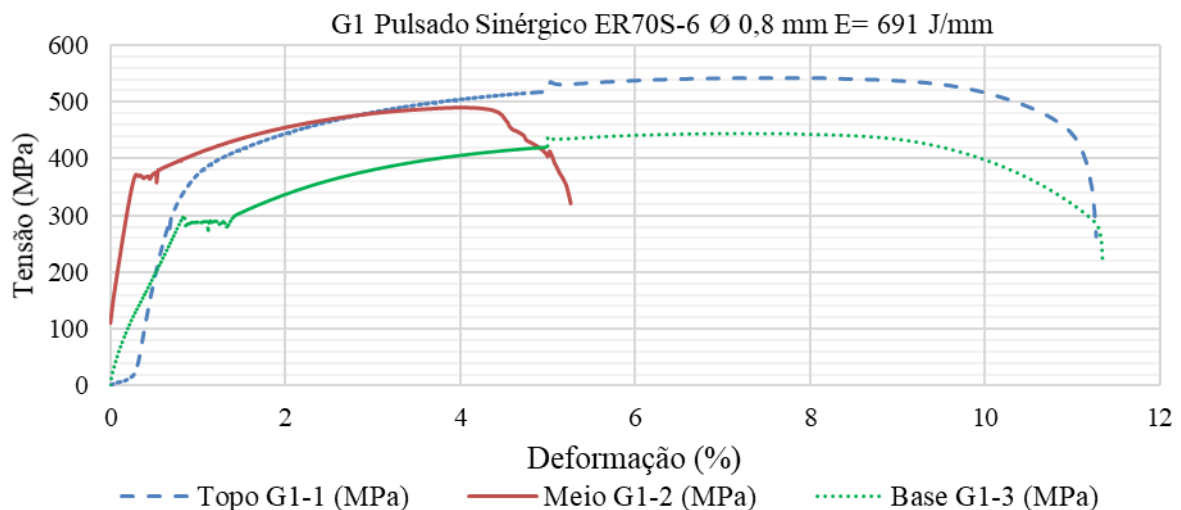


Figura 34 - Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G1 Pulsado Sinérgico.

Os valores medidos no ensaio de tração para o G1, Figura 34, estão no APÊNDICE D.1.

A variação da dureza ao longo da seção das amostras para o G1 pulsado sinérgico está ilustrada na Figura 35. A ordem marcada nelas representa Topo G1-1, Meio G1-2 e Base G1-3. Foram realizados 20 pontos em cada amostra para mapear o comportamento da dureza ao longo da seção transversal depositada.

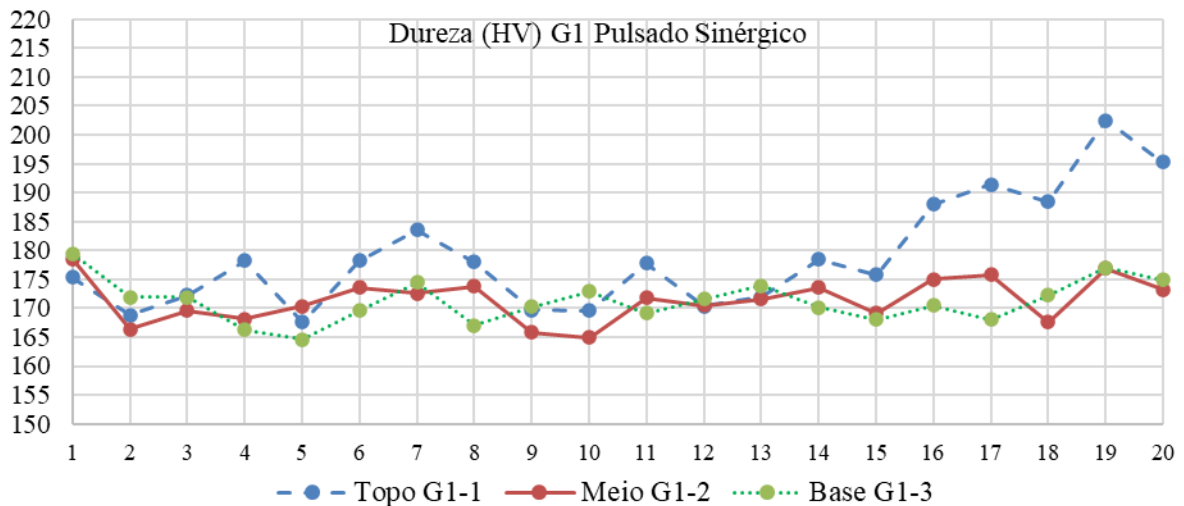


Figura 35 - Variação da microdureza (HV). G1 Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6.

A Figura 36 ilustra as microestruturas com a oscilação média na dureza do Topo G1 entre (a) 169,6 HV com predominância de ferrita com pequenos carbonetos, grande tamanho de grão e poucas perlitas e de (c) 188 HV para a região com predominância de microestrutura mais refinada que a anterior e menor tamanho dos grãos. Esse comportamento se repetiu para o eletrodo AWS ER70S-6 ao longo da seção transversal dos depósitos. Em (b) com 177,8 HV teve refino intermediário. A exceção foram os últimos depósitos para o topo, nos quais não ocorre o reaquecimento do mesmo modo como nos anteriores avaliados, base e meio. A transição de microestruturas devido ao reaquecimento, que representa a oscilação encontrada nos mapas de dureza ao longo do trabalho está em (d), aumento 20 X, Ponto 16 com 188,0 HV (esquerda) e ponto 10 com 169,6 HV.

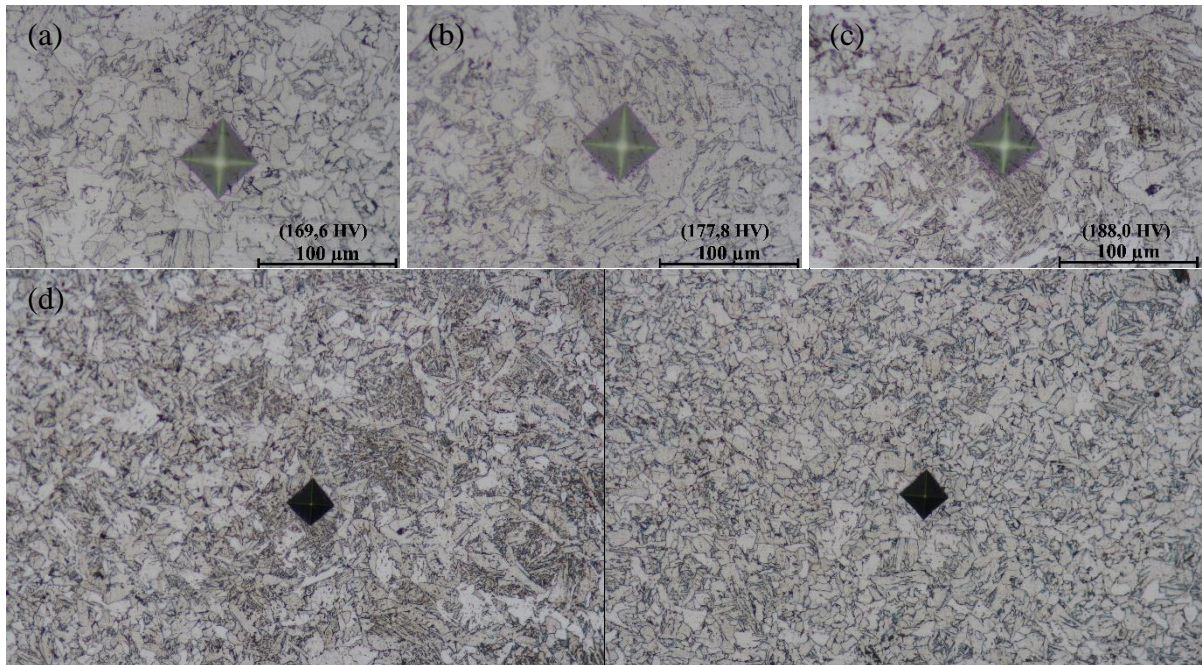


Figura 36 – Microestrutura Topo G1 Pulsado Sinérgico AWS ER70S-6. Aumento de 50 X. (a) Ponto 16 – 188,0 HV. (b) Ponto 11 – 177,8 HV. (c) Ponto 10 – 169,6 HV. (d) Região de transição de microestruturas, aumento 20 X, Ponto 16 com 188,0 HV (esquerda) e ponto 10 com 169,6 HV.

A microestrutura que representa o valor médio de dureza para a região do Meio G1 Pulsado Sinérgico com eletrodo AWS ER70S-6 está representada na Figura 37. Foi utilizado aumento de 50 X. O valor médio foi de 172 HV, o ponto de dureza 11 teve 171,8 HV. O ponto máximo de dureza foi de 177 HV representado pelo ponto 19.

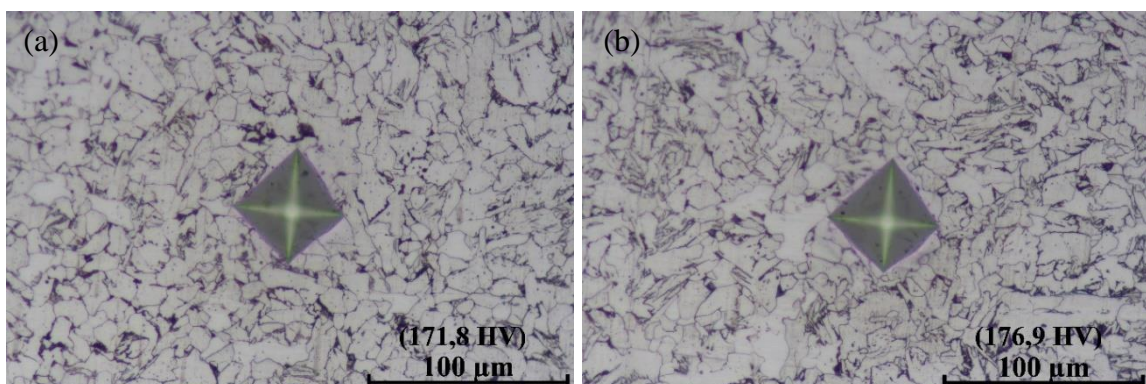


Figura 37 – Microestrutura para o eletrodo AWS ER70S-6 na região do Meio G1 Pulsado Sinérgico. (a) Ponto 11, dureza média 171,8 HV. (b) Ponto 19, dureza máxima de 177 HV.

A microestrutura para a amostra do Meio – G1, Figura 37, apresentou predominância de ferrita poligonal com carbonetos dispersos nos grãos e perlita. Para o ponto 11 (a) as perlitas se apresentam em maior concentração quando comparadas ao ponto 19 (b). Percebe-se que o

aumento da dureza está relacionado ao refino da microestrutura e o surgimento de pequenas concentrações de ferrita acicular. A microestrutura para a Base G1 Pulsado sinérgico, apresentou-se similar àquela da região do meio, também em valores de dureza, APÊNDICE F.1. Entre os resultados encontrados por [Liberini et al., 2017] se observou que a microestrutura apresentou grãos de ferrita-perlita a lamelas de bainita ao longo da seção vertical das amostras. As propriedades mecânicas como dureza e resistência mecânica avaliadas por [Suryakumar et al., 2013] apresentaram variações negligenciáveis de resistência à tração e dureza.

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos para os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo de corrente pulsado sinérgico G2 para o eletrodo AWS ER70S-6 se encontra no APÊNDICE E, foram semelhantes aos do G1.

Os corpos de prova do ensaio de tração para o modo de corrente pulsado sinérgico do grupo 2 – G2 estão na Figura 38 (a). Observa-se a fratura a 90°, com comportamento predominantemente dúctil, bem como a região de estrição dos corpos de prova com elevada deformação antes da ruptura. Todas as rupturas ocorreram na região com menor seção transversal dos corpos de prova, indicando a não presença de descontinuidades consideráveis como porosidade que pudessem favorecer a nucleação de trincas ou outros defeitos. As amostras após o ensaio de dureza HV do G2 Pulsado Sinérgico estão representadas na Figura 38 (b).

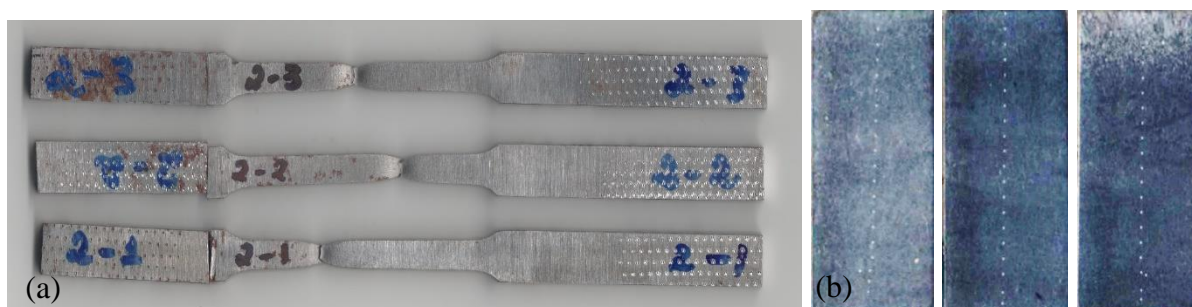


Figura 38 – (a) Corpos de prova após o ensaio de tração. G2-1 Topo; G2-2 Meio; G2-3 Base. Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6. (b) Amostras para ensaio de dureza HV. G2-3 Base, G2-2 Meio e G2-1 Topo, respectivamente.

O gráfico de tensão versus deformação para o pulsado sinérgico G2 estão demonstrados no APÊNDICE H.1 e resultados no APÊNDICE D.1. Nota-se que os resultados de tensão para o G2 pulsado sinérgico com velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s, em geral, foram mais elevados que os obtidos pelo G1 pulsado sinérgico com 3 mm/s com deformações médias muito próximas para ambos os grupos.

As microestruturas para o Topo do G2 pulsado sinérgico, eletrodo AWS ER70S-6, que representam o comportamento de oscilação da dureza entre as diferentes regiões dos cordões depositados para a manufatura aditiva são demonstradas na Figura 39, aumento do microscópio de 10 X ou 100 vezes. Percebe-se a região de transição entre os pontos 18 (esquerda) e 17 (direita) na microestrutura. Confirmando o comportamento do aumento da dureza para as regiões com microestrutura de maior refino. O gráfico com variação da dureza para o G2 pulsado sinérgico está no APÊNDICE I.1.

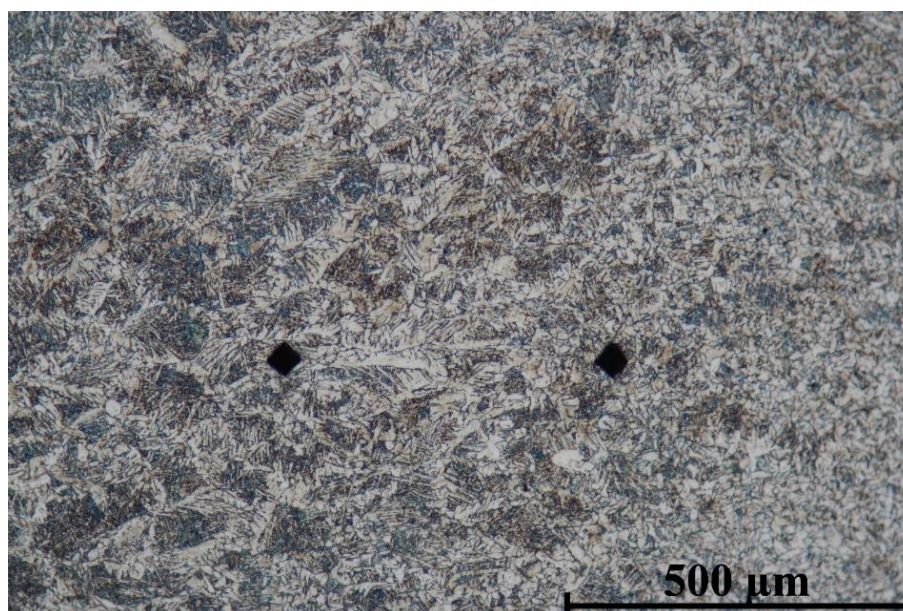


Figura 39 – Região de transição da microestrutura grosseira para refinada. Dureza dos pontos 18 = 206 HV (esquerda) e 17 = 197 HV (direita) com aumento de 10 X. Pulsado sinérgico G2 Topo, AWS ER70S-6.

Os resultados de dureza para o pulsado sinérgico G2 com AWS ER70S-6 apresentaram a média de dureza para Topo, Meio e Base de 173 HV, 173 HV e 171 HV, respectivamente. Variando do mínimo de 162 HV ao máximo de 206 HV. As microestruturas resultantes podem ser representadas pelos pontos 17 e 18 da Figura 39, devido a suas similaridades e similar comportamento ao do grupo G1. Para o G2 se utilizou a velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s no lugar de 3 mm/s do G1. A redução da dureza levou ao aumento da ferrita poligonal, das perlitas dispersas e incremento do tamanho de grão.

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos para os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo de corrente sinérgico G3 para o eletrodo AWS ER70S-6 estão no APÊNDICE E.3.

Os corpos de prova do ensaio de tração para o modo de corrente sinérgico G3, metal de adição AWS ER70S-6, APÊNDICE G.1, apresentaram as regiões das fraturas com comportamento predominantemente dúctil, bem como a região de estrição dos corpos de prova com elevada deformação antes da ruptura. A fratura do corpo de prova do meio G3-2 para o sinérgico apresentou menor deformação quando comparada aos demais do mesmo grupo. Esse fato pode ter ocorrido devido a instabilidade de alimentação do eletrodo durante as deposições, de maneira geral, a instabilidade raramente aconteceu. Uma possível causa seria a fusão não homogênea ocorrida pela instabilidade do arco. Então ocasionando deformidades na geometria do cordão que não foram totalmente corrigidas pela deposição posterior, levando a fratura com aspecto de maior fragilidade, indicado pela inclinação da fratura e aspecto de arrancamento, indicação de clivagem na seção.

O gráfico de tensão versus deformação obtidos no ensaio de tração para o sinérgico G3 com o eletrodo AWS ER70S-6 estão no APÊNDICE H.2 e os resultados do ensaio de tração para o G3 no APÊNDICE D.1.

Os resultados de tensão para o G3 com velocidade de deslocamento da tocha de 3 mm/s, em geral, foram muito similares aos obtidos pelo G2 pulsado sinérgico com 4 mm/s. As deformações médias foram próximas, excetuando-se a amostra com defeito. Portanto, não se observou efeito significativo na resistência à tração para o AWS ER70S-6 entre os dois modos de corrente G3 e G2, também não se observou efeito significativo entre eles devido à diferença na velocidade de deslocamento da tocha.

O gráfico com a variação da dureza para o G3 Sinérgico, APÊNDICE I.2, teve comportamento oscilatório semelhante aos grupos anteriores. As microestruturas para o Topo do G3 Sinérgico, eletrodo AWS ER70S-6, com os valores máximos de dureza de 199 HV para ambos os pontos 19 (direita) e 20 (esquerda) são demonstradas na Figura 40 (a) com aumento de 20 X. O ponto 20 com dureza de 199,8 HV é demonstrado com aumento de 50 X na Figura 40 (b). Esse comportamento com elevada dureza e modificação pronunciada da microestrutura ocorreu nos últimos cordões depositados, nesse caso para a amostra do topo, onde não sofreu o reaquecimento dos cordões subsequentes. A microestrutura típica que representa o valor médio de dureza para o topo, de 174 HV, está ilustrada com aumento de 50 X na Figura 40 (c). As microestruturas do Meio e Base do G3 Sinérgico seguiram o padrão apresentado pela Figura 40 (c).

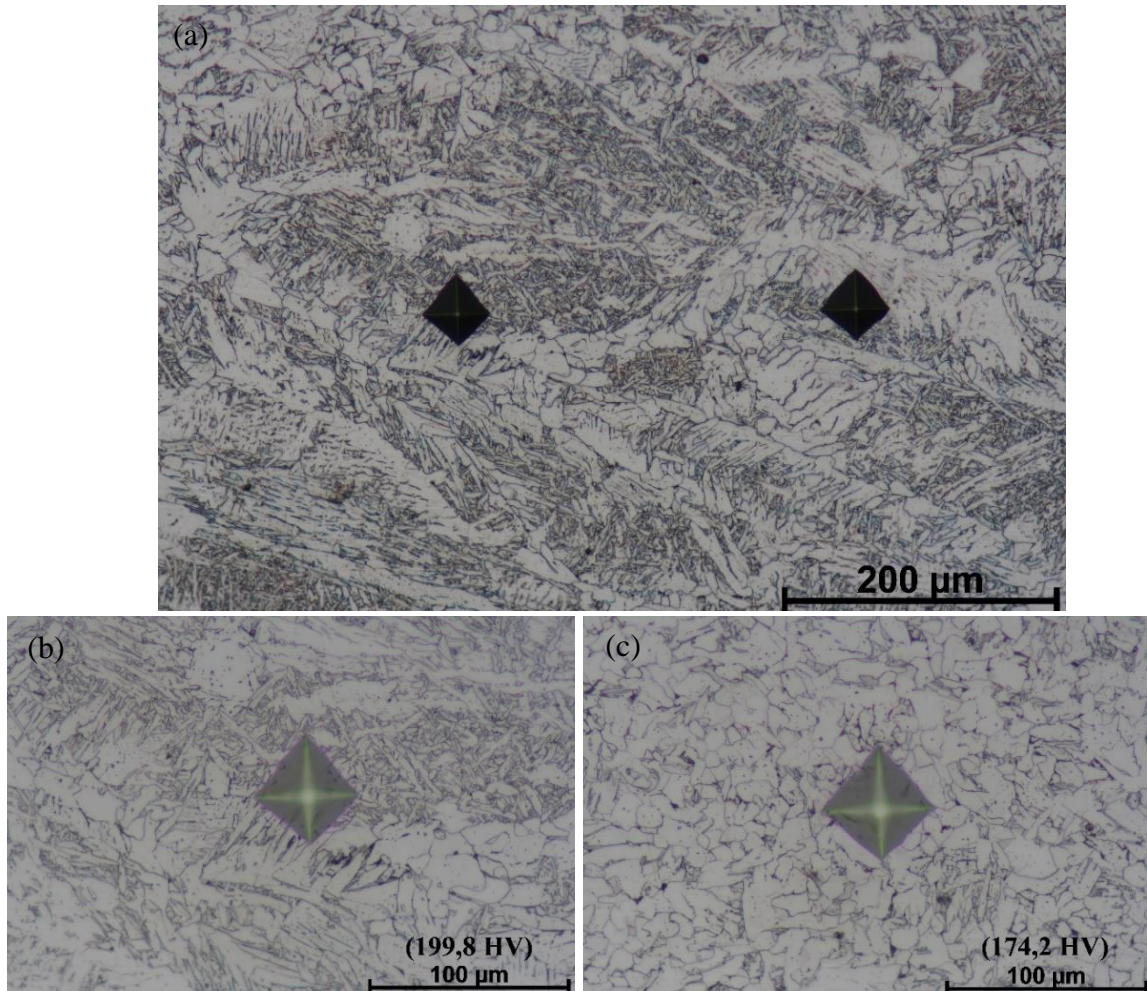


Figura 40 – (a) Valores máximos de dureza de 199 HV para ambos os pontos 19 (direita) e 20 (esquerda), aumento 20 X. (b) Ponto 20 com dureza de 199,8 HV. (c) Microestrutura com valor médio de dureza para o topo, de 174 HV.

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos para os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo de corrente convencional G4 para o eletrodo AWS ER70S-6 estão representados no APÊNDICE E.4.

Um aspecto perceptível durante as deposições foi que quando utilizado o modo sinérgico se obteve maior estabilidade do arco elétrico e auto-ajuste da transferência do metal devido a variação de altura nos cordões já depositados, seja devido à deformação ou irregularidade na geometria do cordão anterior. Assim, alterando a distância bico-de-contato-peça. Através dos testes realizados se observou que o DBCP contribui para a geometria do cordão e estabilidade da transferência do metal.

Os corpos de prova do ensaio de tração para o modo de corrente convencional G4, metal de adição AWS ER70S-6 estão representados no APÊNDICE G.2. Observa-se as regiões das fraturas com comportamento predominantemente dúctil, similar aos grupos anteriores. O

gráfico de tensão versus deformação obtidos no ensaio de tração para o Convencional G4 com o eletrodo AWS ER70S-6 estão demonstrados no APÊNDICE H.3.

Os valores obtidos no ensaio de tração para o G4 estão no APÊNDICE D.1. Não se observou diferenças significativas entre os valores específicos ou médios das tensões e deformações para esse grupo G4 Convencional com velocidade de deslocamento da tocha de 4 mm/s com os anteriores G3 ($v = 3$ mm/s e sinérgico) e G2 ($v = 4$ mm/s e pulsado sinérgico). O gráfico com a variação da dureza ao longo da seção das amostras para o G4 Convencional está ilustrado no APÊNDICE I.3.

A região de transição na amostra de topo, com aumento de 20 X, para o G4 Convencional está demonstrada na Figura 41. Ponto 16 = 183 HV (esquerda) com microestrutura ferrita poligonal e ferrita acicular com maior refino e ponto 15 = 164 HV (direita) com ferrita poligonal, maior tamanho dos grãos e menor refino. Ambas apresentaram perlitas levemente dispersas ao longo de toda a área.

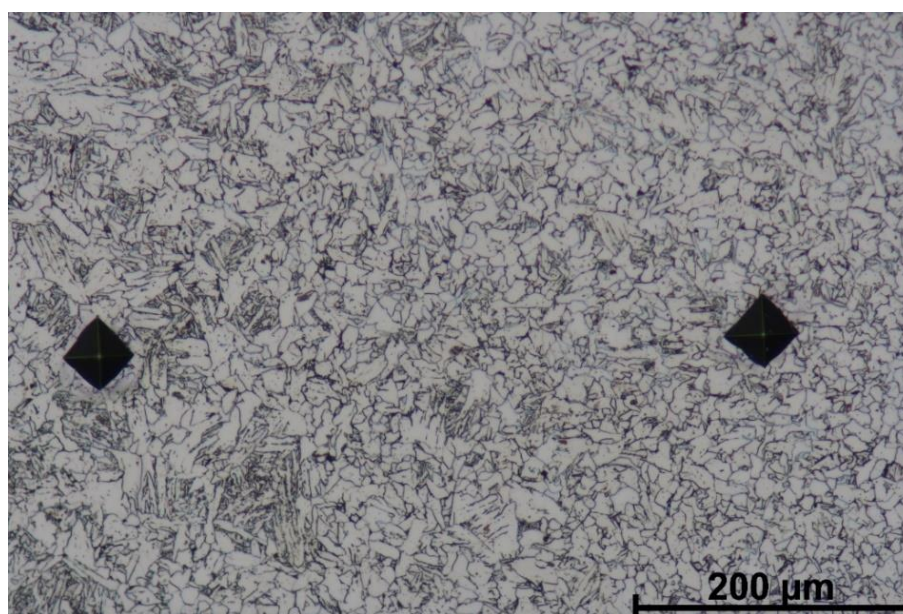


Figura 41 – Ponto 16 = 183 HV (esquerda) e 15 = 164 HV (direita) G4 Convencional. Região de transição na amostra de topo. Aumento de 20 X.

A Figura 42 ilustra as microestruturas com aumento de 50 X para a região da Base G4 Convencional, eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

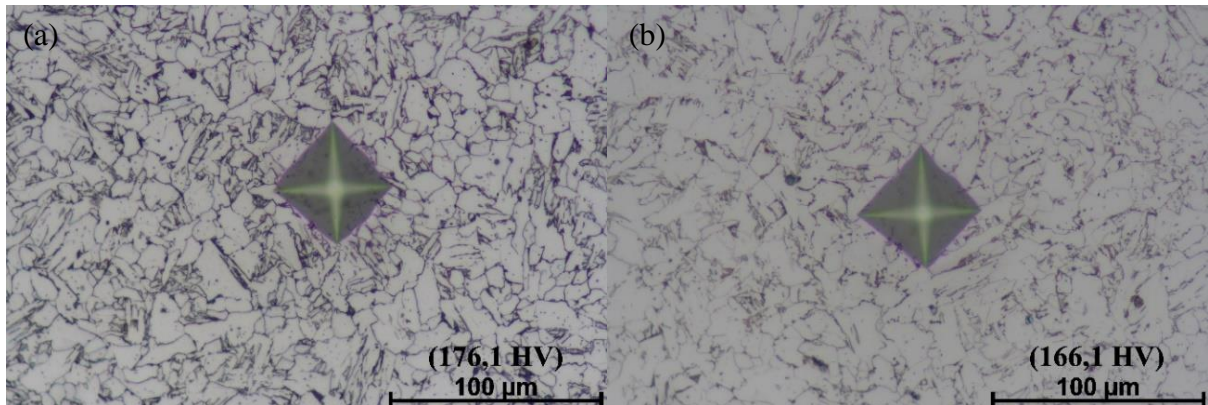


Figura 42 – (a) Ponto 16 = 176,1 HV Base G4 Convencional. (b) Ponto 18 = 166,1 HV Meio G4. Aumento 50 X.

O ponto 16 com 176,1 HV da Base, Figura 42 (a), representa a microestrutura padrão com a média de dureza apresentada pelo grupo. O grupo do meio teve a média de dureza menor, o ponto 18 com 166,1 HV representa o padrão apresentado com predominância de ferrita poligonal com pequenos carbonetos e perlita em baixo teor, Figura 42 (b), com valores médios de 166 HV.

O gráfico de barras com a média das durezas HV para o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro para os 4 grupos com seus respectivos modos de corrente está representado pela Figura 43.

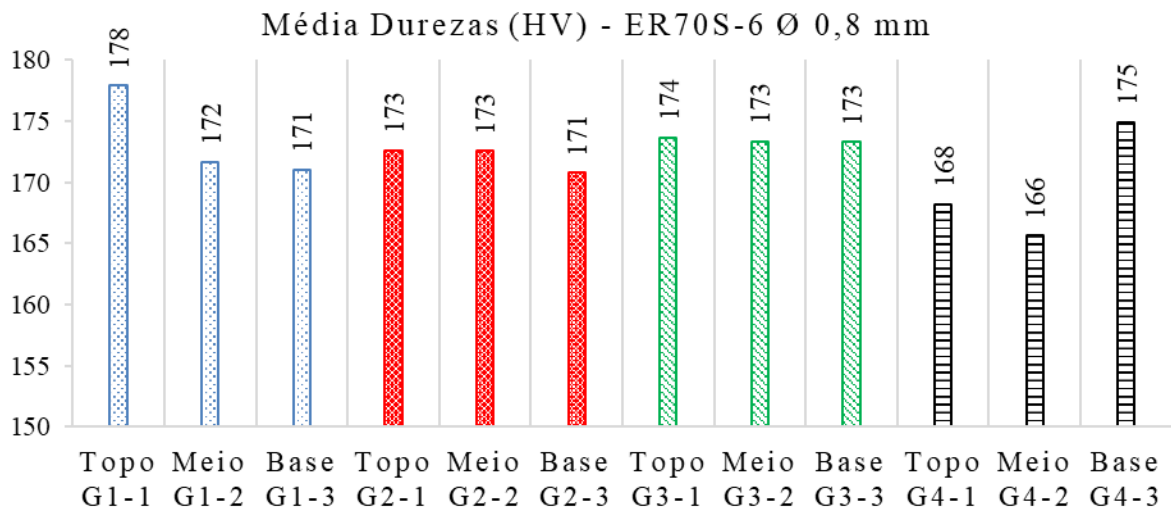


Figura 43 – Média dos valores medidos de dureza (HV). Eletrodo AWS ER70S-6 0,8 mm.

Da Figura 43 se observa que não houve variação significativa de dureza para as diferentes regiões (Topo, Meio e Base) ou entre os grupos G1, G2, G3 e G4 considerando a escala de variação, com valor mínimo de 166 HV e máximo de 178 HV. Portanto, apesar das

variações da microestrutura, com comportamento oscilatório para as diferentes regiões depositadas, não se observou diferença significativa para a dureza e resistência mecânica, Figura 44, obtidos pelo ensaio de tração para o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

A análise da microestrutura e dureza resultante de deposições sem o uso de gás de resfriamento adicional no centro da seção transversal do empilhamento apresentou uma estrutura de grãos grosseiros formada por perlita e ferrita [Henckell et al., 2017]. A dureza apresentou valor médio de 160 HV variando a 50 HV, portanto, com elevada variação ao longo da seção. O uso do gás de resfriamento levou a melhoria da geometria das deposições, microestrutura de grãos refinada e valor homogêneo de dureza de 150 HV. Os valores médios obtidos nesse trabalho para o eletrodo AWS ER70S-6 são próximos a 160 HV, em acordo com os valores obtidos por [Henckell et al., 2017].

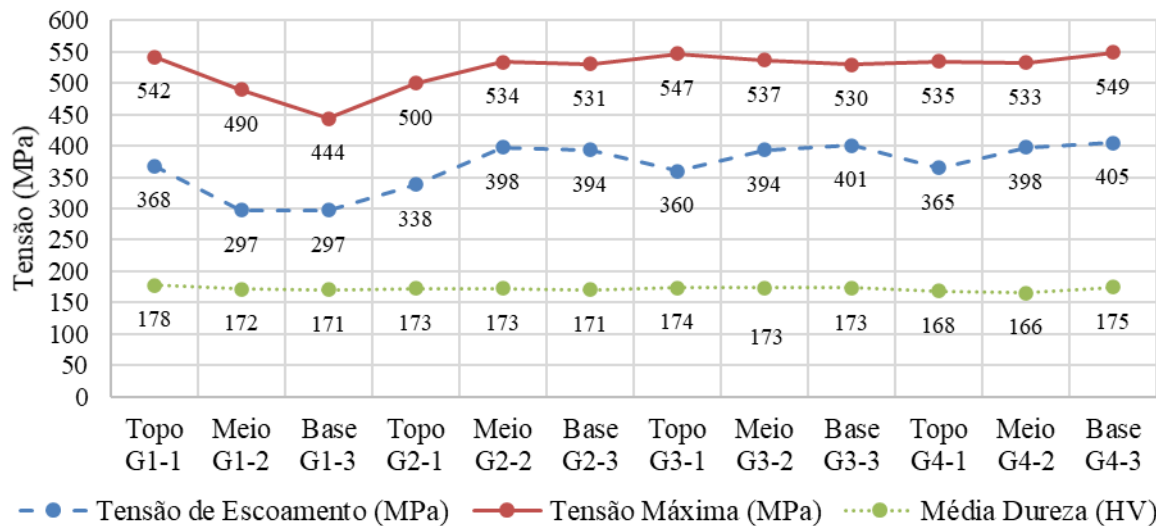


Figura 44 – Tensão de escoamento (MPa) vs Tensão máxima (MPa) vs Dureza (HV). Eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

A comparação dos resultados de máxima tensão (MPa) versus a energia de soldagem (J/mm) para o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro são demonstrados na Figura 45.

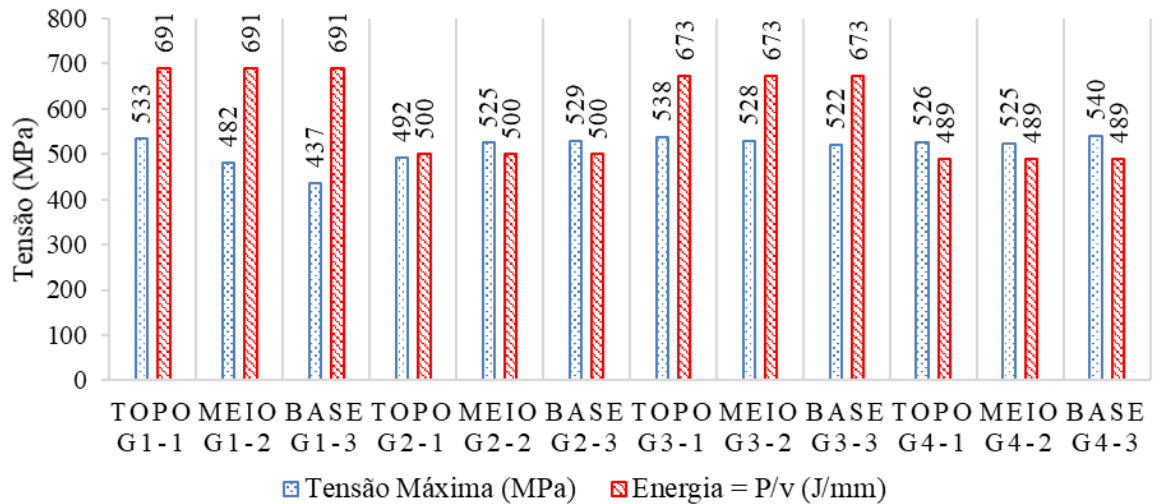


Figura 45 – Máxima tensão (MPa) versus Energia de soldagem (J/mm). Eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.

Através da análise do gráfico da Figura 45 não foi possível inferir estatisticamente variações diretas ou significativas entre os diferentes níveis de energia avaliados e os valores de tensão máxima obtidos pelo ensaio de tração.

A Figura 46 (a) ilustra os relógios comparadores posicionados no extremo do metal base após a deposição dos cordões no modo pulsado sinérgico G5. O corpo final com os 25 cordões depositados com o modo pulsado sinérgico se mostra na Figura 46 (b), com detalhe nos 4 termopares tipo-K utilizados para aquisição de temperatura no metal base. Eletrodo AWS ER110S-G.



Figura 46 – AWS ER110S-G. (a) Figura ilustrativa dos relógios comparadores no metal base após a deposição dos cordões. (b) 25 cordões depositados o modo pulsado sinérgico com indicação dos termopares no metal base.

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos para os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo de corrente pulsado sinérgico G5 para o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm de diâmetro estão no APÊNDICE E.5. Os ensaios de tração foram realizados com

velocidade de deslocamento de 1,0 mm/min para o eletrodo AWS ER110S-G. Os depósitos para o pulsado sinérgico com os corpos de prova antes e após o ensaio de tração são demonstrados na Figura 47 (a) e (b), respectivamente.

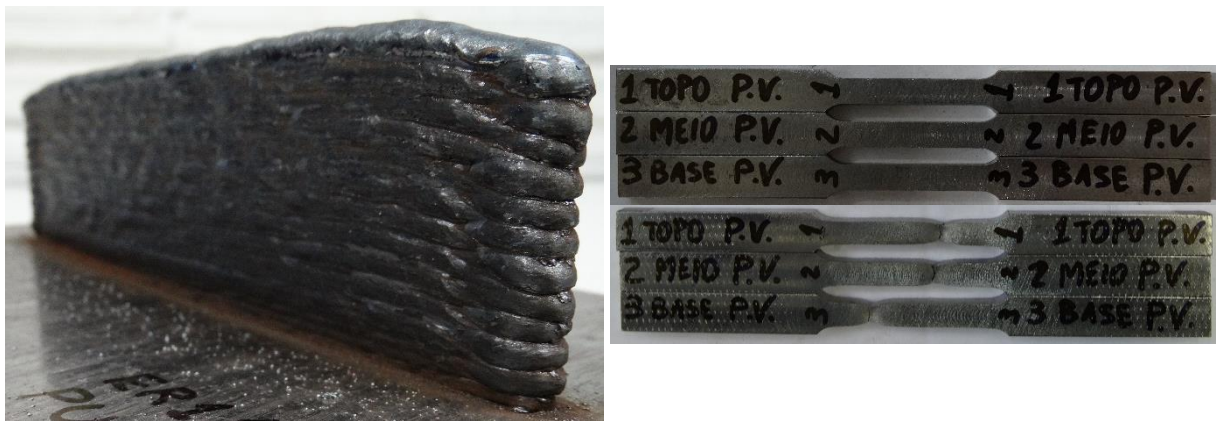


Figura 47 – (a) 25 depósitos, pulsado sinérgico G5 AWS ER110S-G. (b) Corpos de prova antes e após o ensaio de tração.

O gráfico de tensão versus deformação obtidos no ensaio de tração para o pulsado sinérgico G5 com o eletrodo AWS ER110S-G estão demonstrados na Figura 48.

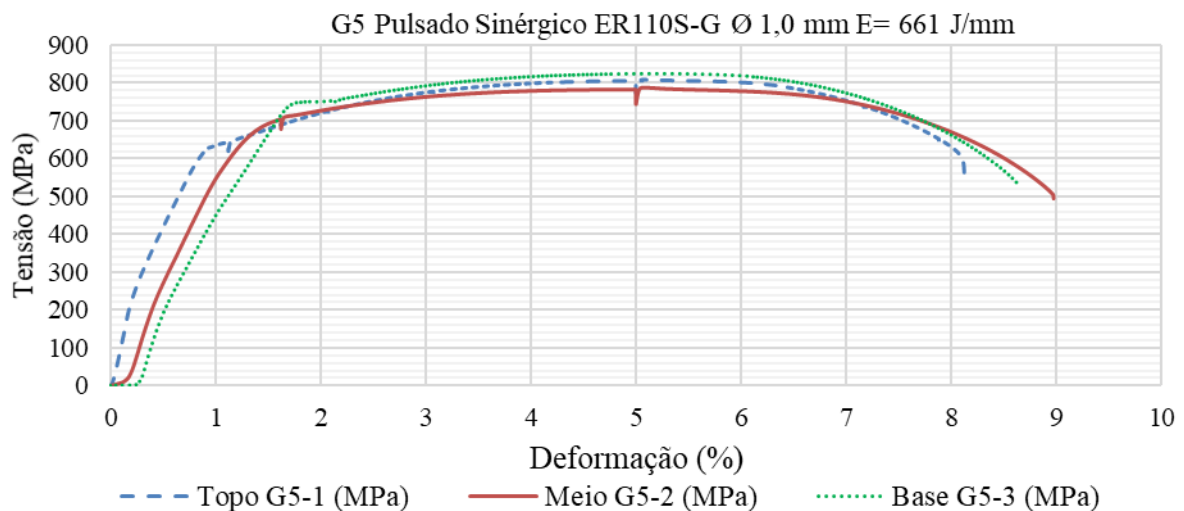


Figura 48 - Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER110S-G. G5 Pulsado Sinérgico.

Os resultados do ensaio de tração com o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm de diâmetro com modo de corrente pulsado sinérgico G5 estão no APÊNDICE D.2. Observa-se o incremento nos valores de tensão escoamento no sentido topo, meio e base. Esse comportamento foi diferente para a tensão máxima e de ruptura, que tiveram incremento na ordem meio, topo e então base.

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos com os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo sinérgico G6 para o eletrodo AWS ER110S-G estão no APÊNDICE E.6. O gráfico de tensão versus deformação para o sinérgico G6 com o eletrodo AWS ER110S-G é representado no APÊNDICE H.4.

Os resultados do ensaio de tração com o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm de diâmetro com modo de corrente sinérgico G6 são mostrados no APÊNDICE D.2. Os resultados obtidos para todas as tensões com o sinérgico G6 foram menores que aqueles obtidos pelo pulsado sinérgico G5 para o mesmo metal de adição. A energia de soldagem para o G5 foi de 661 J/mm, para o G6 a energia foi de 656 J/mm, portanto a diferença na resistência ao escoamento, máxima e de ruptura não pode ser creditada a energia de soldagem. Nesse caso se teve o indicativo que o modo de transferência do metal por curto-circuito apresentou menor resistência quando comparado ao por projeção (pulsado), em média na ordem de 20 MPa.

O aspecto final do corpo de prova com as 25 deposições para o modo de corrente Sinérgico G6 com o eletrodo AWS ER110S-G está representado na Figura 49 (a). Os corpos de prova para o ensaio de tração retirados desse corpo nas regiões da base, meio e topo são ilustrados pela Figura 49 (b) antes do ensaio e (c) após o ensaio. Nota-se a fratura na região central dos corpos de prova, com as deformações e ângulo de 90°.



Figura 49 – Sinérgico G6. AWS ER110S-G. (a) 25 cordões depositados. (b) Corpos de prova para ensaio de tração antes e depois do teste, separados em topo, meio e base.

Os oscilogramas de tensão e corrente obtidos para os parâmetros utilizados nos depósitos com o modo de corrente polaridade variável G7 para o eletrodo AWS ER110S-G são ilustrados na Figura 50.

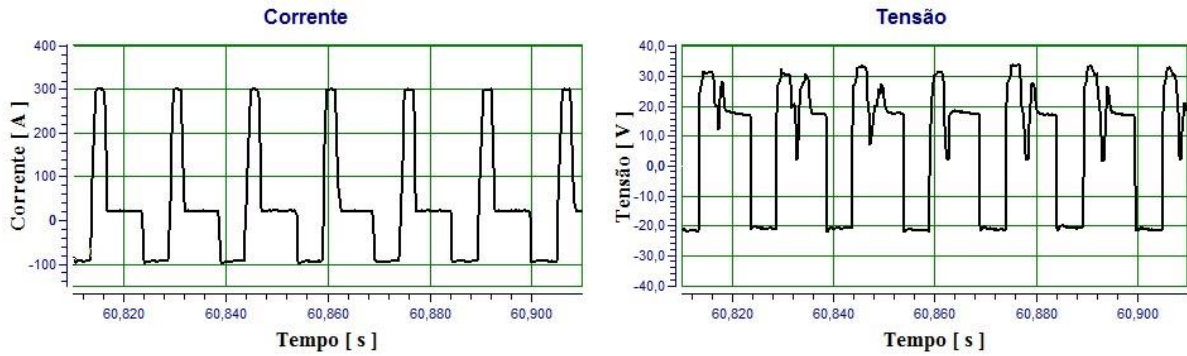


Figura 50 - Oscilogramas de corrente e tensão. Polaridade Variável. AWS ER110S-G.

Os oscilogramas de corrente para a polaridade variável representam a característica do pulso que se obteve em geral durante as deposições. É possível distinguir claramente os 6 parâmetros do pulso de corrente em cada período (I_p , t_p , I_b , t_b , I_n , t_n). Ainda, a velocidade de alimentação do eletrodo W foi ajustada manualmente durante a deposição de cada cordão até se obter a melhor estabilidade do arco para aquela combinação de parâmetros. A tensão do arco foi determinada automaticamente pela fonte de soldagem. Os parâmetros selecionados para a deposição com esse processo foram determinados pelo projeto de experimentos Box-Behnken, considerando a geometria do cordão e a estabilidade da transferência do metal. O corpo final com os 25 depósitos e 50 mm de altura está representando na Figura 51.

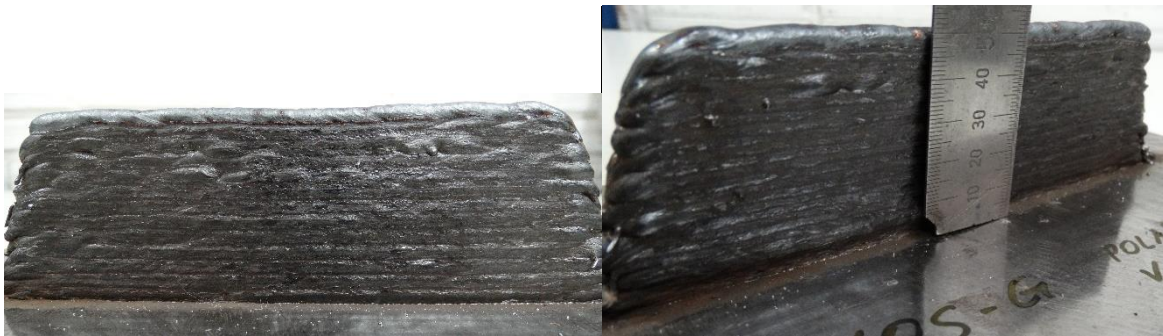


Figura 51 – Deposições com polaridade variável. Eletrodo AWS ER110S-G. (a) Vista lateral. (b) Indicação da altura média de 50 mm para 25 cordões depositados.

O gráfico do ensaio de tração para modo de corrente polaridade variável G7 está representado na Figura 52. Os resultados são para as amostras retiradas do topo, meio e base dos depósitos.

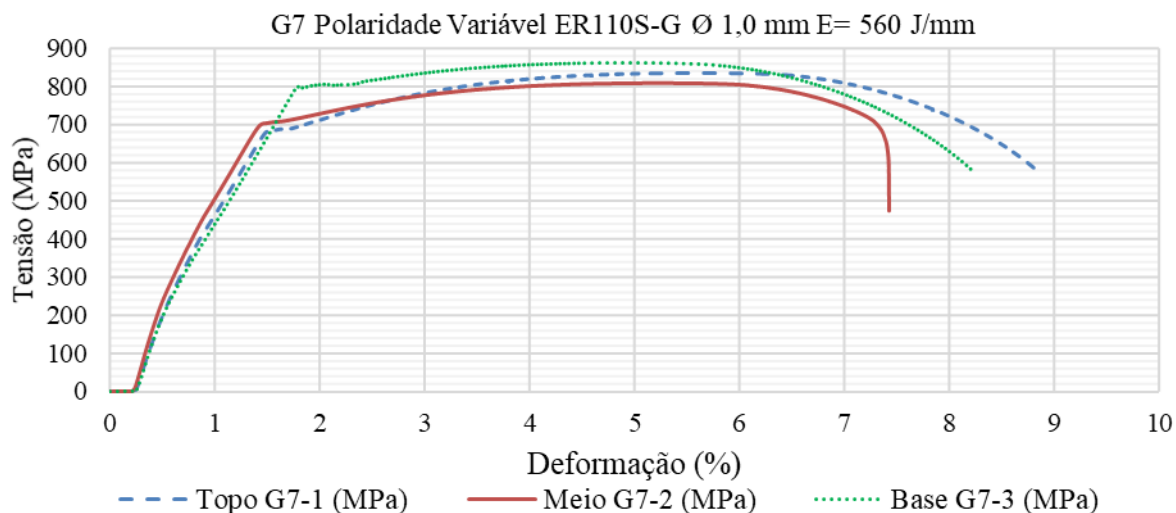


Figura 52 – Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER110S-G. G7 Polaridade Variável.

Os resultados do ensaio de tração com o eletrodo AWS ER110S-G de 1,0 mm de diâmetro com modo de corrente polaridade variável corrente alternada estão no APÊNDICE D.2. Em comparação com os demais grupos G5 e G6, a resistência à tração foi maior para o modo de corrente polaridade variável G7 para as tensões de escoamento, máxima e de ruptura.

As amostras retiradas do meio e base do corpo depositado com PV para o ensaio de tração, Figura 53 (a), apresentaram evidentes descontinuidades na região da fratura. O início da fratura, ou a nucleação e propagação da trinca, parecem ter ocorrido a partir da porosidade apresentada, Figura 53 (b) e (c). É possível verificar no gráfico de tração para esse modo de transferência que a amostra do meio G7-2 apresentou menor tensão de ruptura e deformação plástica que as demais, nesse caso, o poro apresentou tamanho elevado. No caso da amostra da base G7-3 também se pode observar porosidade na região da fratura. Uma possível explicação para o fato de a tensão máxima não ter sofrido notáveis alterações pode ser devido o coalescimento de descontinuidades, como microporosidades, que levou a aceleração da ruptura do corpo de prova. Essas descontinuidades podem ser ligadas à instabilidade apresentada esporadicamente pelo modo de transferência polaridade variável. Mesmo após a utilização do projeto de experimentos Box-Behnken para a determinação dos parâmetros de soldagem que apresentaram a maior estabilidade do arco e geometria do cordão adequada para faixa de valores avaliada, os resultados obtidos pelo ensaio de tração demonstram que ainda não se obteve a qualidade esperada para a produção de uma peça com propriedades mecânicas adequadas e isenta de descontinuidades.

A estabilidade da transferência do metal pelo modo polaridade variável depende de no mínimo sete parâmetros: corrente de pico, tempo de pico, corrente de base, tempo de base, corrente de negativo, tempo de negativo e velocidade de alimentação do eletrodo. Além desses, são regulados a velocidade de deposição, gás de proteção e distância bico-de-contato-peça. A principal justificativa de se utilizar essa modulação da corrente de soldagem, seria a menor transferência de calor do arco para a peça devido aos pulsos positivos e principalmente ao pulso negativo, invertendo a polaridade e assim a concentração de calor da peça para o eletrodo. Assim se teria a aproximação das características do processo utilizado para manufatura aditiva ao arco elétrico “*Cold Metal Transfer*”. Resultando em menor deformação da peça e microestrutura com maior refino, então, melhores propriedades mecânicas. O gráfico de deformação da Figura 55 comprova parte dessa teoria, pois a deformação medida foi menor utilizando a polaridade variável. Devido às descontinuidades encontradas nos corpos de prova pelo ensaio de tração, optou-se por não realizar a análise das demais propriedades como dureza e microestrutura para esse modo de transferência pois não poderia ser utilizado na prática como um componente mecânico.

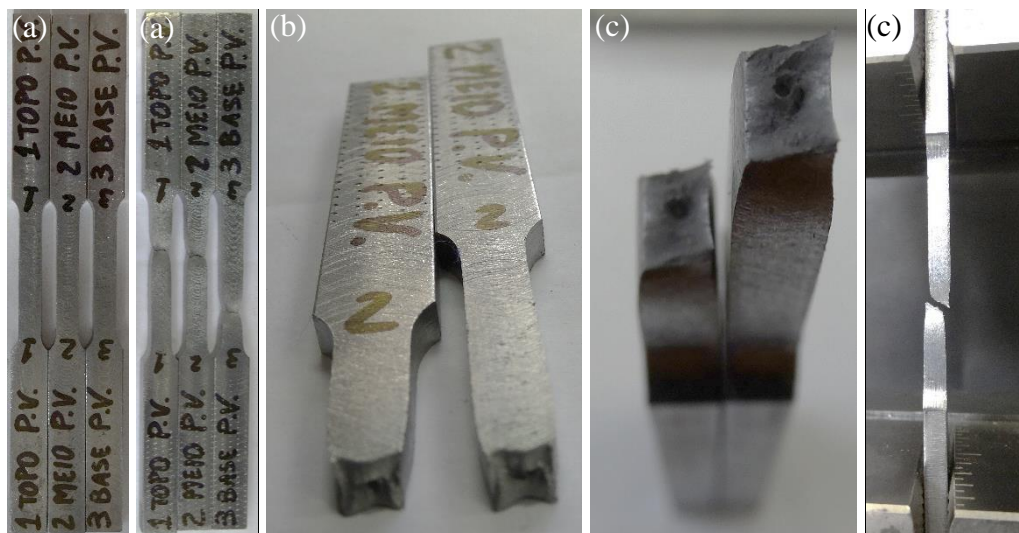


Figura 53 – Ensaio de tração Polaridade Variável. (a) Corpos de prova antes e depois do ensaio. (b) Corpo de prova 2 (meio) indicando porosidade. (c) Fratura inclinada.

O comportamento com plano inclinado na região da fratura, próximo aos 45°, foi apresentado apenas pelos corpos de prova do ensaio de tração para o modo polaridade variável AC com o eletrodo AWS ER110S-G, Figura 53 (d). Os demais ensaios apresentaram ruptura a 90°, com comportamento dúctil e formação do cone e taça na região da fratura.

O alongamento para os ensaios de tração com o eletrodo AWS ER70S-6 apresentaram deformação média entre 10 % e 11 % antes de ocorrer a ruptura. O alongamento para o eletrodo AWS ER110S-G foi em geral entre 8 % e 9 %. A diferença entre os valores de tensão de ruptura e tensão máxima foram menores para o eletrodo de maior resistência AWS ER110S-G quando comparados ao AWS ER70S-6. Esses comportamentos estão de acordo com valores sugeridos para os consumíveis avaliados, devido às diferenças nas propriedades mecânicas e com os valores de referência dos fabricantes. Em geral o comportamento apresentado pelo digrama tensão-deformação foi de um material dúctil para todos os modos de corrente usados e os dois consumíveis avaliados. Exclui-se as amostras ensaiadas de maneira incorreta, como a G1-2.

A Figura 54 ilustra a deposição dos cordões com o eletrodo AWS ER110S-G e o aparato experimental para aquisição de temperatura e deformação.



Figura 54 – Deposição dos cordões com o eletrodo AWS ER110S-G. Aparato experimental para aquisição de temperatura e deformação.

A deformação medida no extremo do metal base com dois relógios comparadores a 10 mm da borda da chapa está ilustrada na Figura 55 para o eletrodo AWS ER110S-G. Foram medidos para os grupos G5, G6 e G7. A espessura do metal base foi de 12,7 mm com a outra extremidade da chapa presa por dois fixadores na mesa de soldagem. O valor apresentado no gráfico é a média dos valores obtidos pelos dois relógios comparadores.

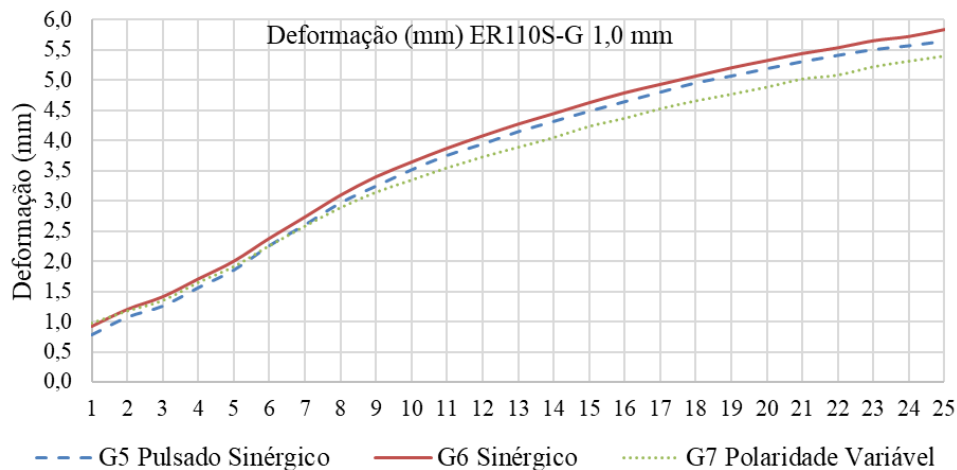


Figura 55 – Deformação medida pelos relógios comparadores. Eletrodo AWS ER110S-G. Pulsado Sinérgico G5; Sinérgico G6; Polaridade Variável G7.

O gráfico da Figura 55 demonstra a média das deformações medidas por dois relógios comparadores durante a deposição dos 25 cordões na chapa de 12,7 mm de espessura. O modo de corrente Sinérgico apresentou a maior deformação, seguida pelo modo pulsado sinérgico e polaridade variável. A tendência de deformação apresentada foi coerente com o nível de calor transferido pelos diferentes modos, sendo o modo de transferência por curto-circuito (sinérgico) o nível mais elevado, seguido pelas formas de onda pulsado e polaridade variável.

O gráfico com as temperaturas máximas medidas pelo termopar 4 a cada cordão, a 10 mm do centro do cordão no metal base são mostrados na Figura 55. A temperatura de interpasse foi de 50 °C. As temperaturas são relativas aos grupos G5, G6 e G7 para o eletrodo AWS ER110S-G. O eixo horizontal do gráfico da Figura 56 representa o número do cordão depositado.

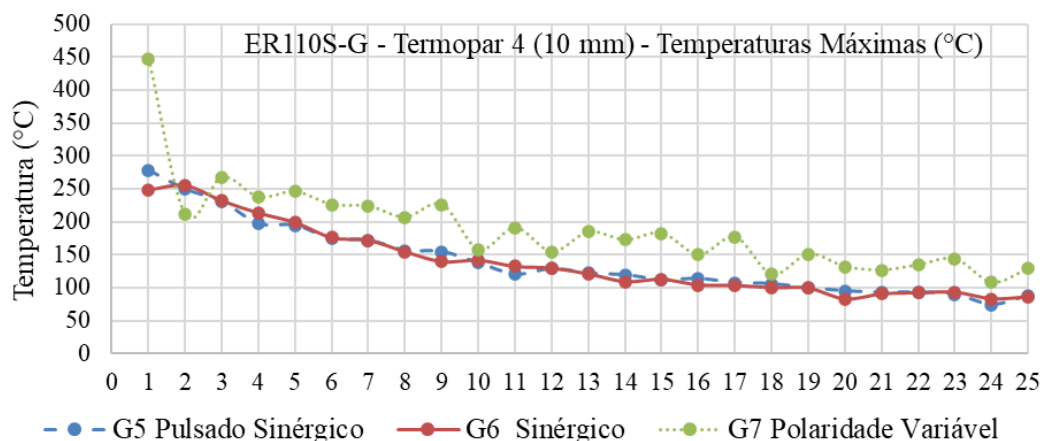


Figura 56 – Gráfico com temperaturas máximas para os grupos G5, G6 e G7. Eletrodo AWS ER110S-G. Termopar a 10 mm do centro do cordão.

Da Figura 56 não se observa diferença significativa nos valores para o G5 pulsado sinérgico e G6 sinérgico. As maiores temperaturas e o comportamento oscilatório ocorreram para a polaridade variável.

Os resultados do ensaio de tração para o eletrodo AWS ER110S-G estão resumidos no gráfico da Figura 57.

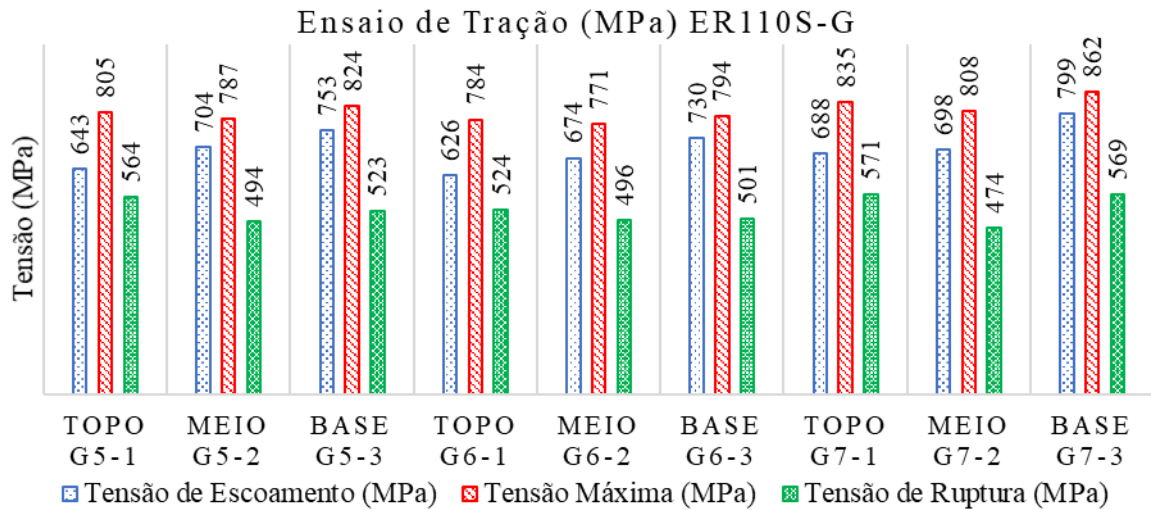


Figura 57 – Gráfico comparativo das tensões obtida no ensaio de tração. AWS ER110S-G.

Da Figura 57 se pode notar a mesma tendência de comportamento para cada uma das tensões. A tensão de escoamento teve incremento na respectiva sequência: topo, meio e base para os três grupos G5, G6 e G7 do eletrodo AWS ER110S-G. Já a tensão máxima apresentou o mesmo comportamento para os três grupos com o incremento no valor de tensão na ordem: meio, topo e base. Ainda, a tensão de ruptura teve outra tendência para o incremento da tensão, que foi o seguinte: meio, base e topo.

A média geral das tensões entre os grupos G5, G6 e G7 para o eletrodo AWS ER110S-G segue na Figura 58.

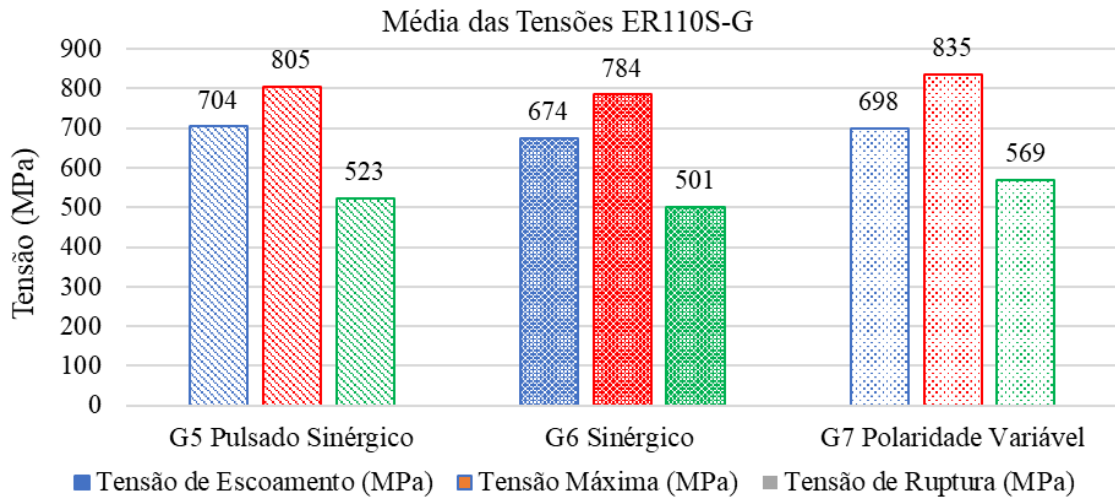


Figura 58 – Média das tensões para o eletrodo AWS ER110S-G.

Do gráfico com a média das tensões para o eletrodo AWS ER110S-G da Figura 58 se pode observar a tendência de aumento da resistência de tração na seguinte ordem: sinérgico G6, pulsado sinérgico G5 e polaridade variável G7. Em geral esse padrão se repetiu para tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura. Essa mesma sequência foi a que apresentou menor deformação no metal base. A ordem dos modos de corrente com a maior para a menor transferência de calor para a peça foi o sinérgico, pulsado e polaridade variável, respectivamente. Esses resultados contribuem para comprovar o efeito benéfico de se utilizar modos de corrente com menor aporte térmico na peça, resultando diretamente em melhorias nas propriedades mecânicas como a resistência à tração.

O gráfico com o mapa de dureza medida para cada deposição para o modo pulsado sinérgico G5 está ilustrado na Figura 59.

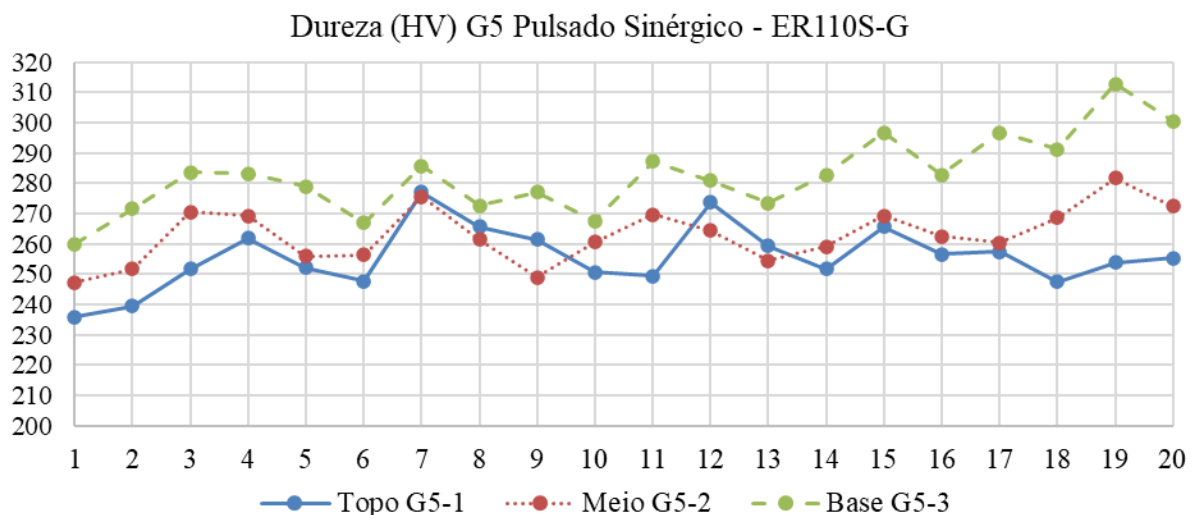


Figura 59 – Gráfico com durezas para o modo pulsado sinérgico G5.

O valor médio de dureza para a região do Topo I do modo pulsado sinérgico G5 foi de 255 HV e máximo de 277 HV. Se observa no gráfico da Figura 59 o comportamento oscilatório da dureza ao longo da seção transversal da amostra. A Figura 60 representa as microestruturas com aumento de 50 X para os valores médios e máximos para o Topo I – G5 relativos aos pontos 10 e 7, respectivamente. As microestruturas para os valores mínimos foram próximas das apresentadas pelo valor médio de dureza, porém com tamanho de grãos maiores, maior proporção de ferrita e menor de ferrita acicular.

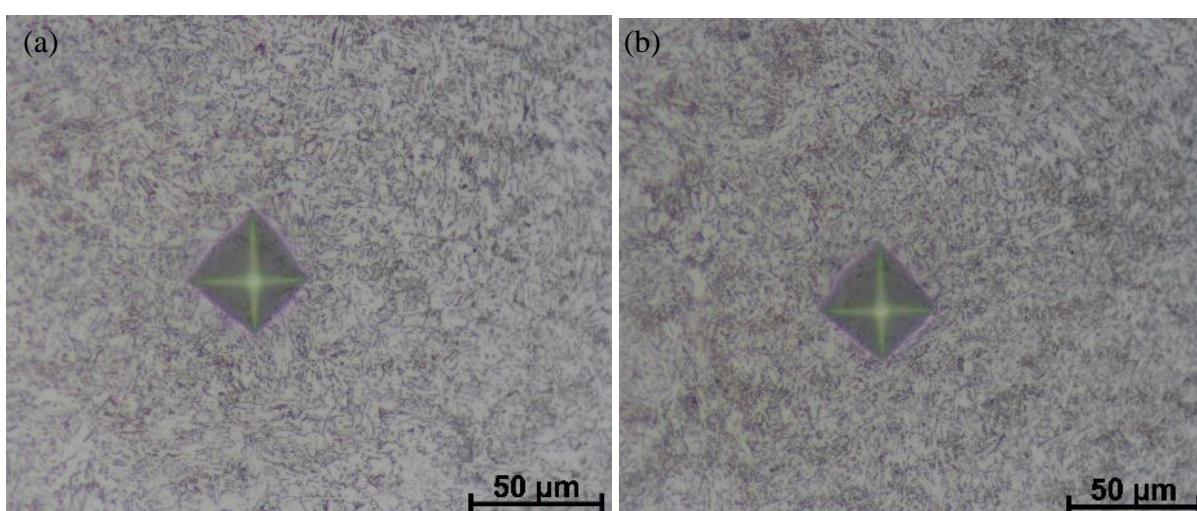


Figura 60 – Microestruturas com 50 X para o Topo I G5 Pulsado Sinérgico. (a) Ponto 10 – 250,7 HV. (b) Ponto 7 – 277,1 HV.

Se observa da Figura 60 o aumento do refino da microestrutura com o aumento da dureza. A microestrutura apresentada para o ponto 10, Figura 60 (a), apresentou predominância de ferrita, ferritas de contorno de grão dispersas e algumas regiões com ferrita acicular. O ponto 7, Figura 60 (b), com maior dureza de 277,1 HV apresentou a microestrutura mais refinada com predominância de ferrita acicular, ferrita de contorno de grão menores e com maior espaçamento. Também se nota pequenos veios de perlita, mais escuros.

O valor médio de dureza para a região do Meio II, modo pulsado sinérgico G5 foi de 262 HV e máximo de 281,8 HV. As microestruturas com aumento de 50 X para os valores médio e máximo, relativos aos pontos 10 (260,7 HV) e 19 (281,8 HV), respectivamente, estão no APÊNDICE F.3. O valor médio de dureza para a região da Base III foi de 283 HV e máximo de 312,7 HV. As microestruturas com aumento de 50 X para os valores médio e máximo da Base III – G5 relativos aos pontos 14 e 19, estão no APÊNDICE F.2.

O valor médio de dureza para a região do Topo I do modo sinérgico G6 foi de 258 HV e máximo de 268,7 HV. Se observa no gráfico da Figura 61 o comportamento oscilatório da dureza ao longo da seção transversal da amostra. A Figura 61 representa as microestruturas com aumento de 50 X para os valores médios e máximos para o Topo I – G6 relativos aos pontos 13 e 9, respectivamente. Os gráficos com as durezas medidas para o G6 Sinérgico estão no APÊNDICE I.4.

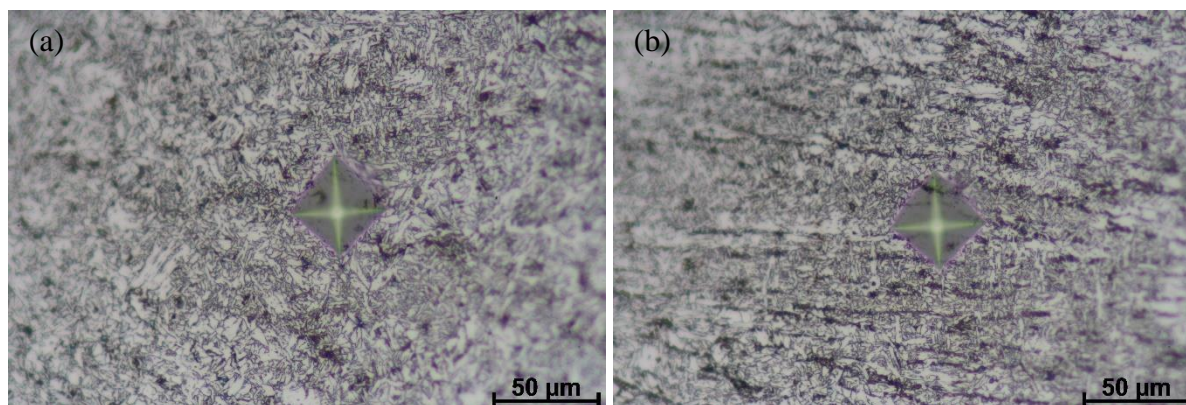


Figura 61 - Microestruturas com 50 X para o Topo G6 Sinérgico. (a) Ponto 13 – 260,0 HV. (b) Ponto 9 – 265,9 HV.

Para o modo sinérgico com o eletrodo AWS ER110S-G o ponto 13, Figura 61 (a), com dureza de 260,0 HV representa a microestrutura para os valores médios de dureza. Apresentou-se predominância de ferrita e perlita, algumas regiões com pequenas ferritas de contorno de grão e ferritas aciculares. A microestrutura do ponto 9 com dureza de 265,9 HV mostrada na Figura 61 (b) mostra refino comparada a anterior. Também veios definidos de perlita e ferrita de contorno de grão, ainda, a ferrita acicular se apresenta em maior proporção.

O valor médio de dureza para a região do Meio II - G6 foi de 262 HV e máximo de 285,2 HV. As microestruturas com aumento de 50 X para os valores médios e máximos para o Meio II - G6 relativos aos pontos 13 e 11, respectivamente, estão no APÊNDICE F.4. Para a região da Base III - G6, o valor médio de dureza foi de 275 HV e máximo de 310,7 HV. As microestruturas com aumento de 50 X para os valores médios e máximos para Base III - G6 relativos aos pontos 5 e 12, respectivamente, se encontram no APÊNDICE F.5.

Com o aumento da dureza se pode observar que de maneira geral ocorre o aumento do refino da microestrutura, aumenta-se a proporção de ferrita acicular, as ferritas de contorno de grão aleatórios dão lugar para veios com menor tamanho médio do grão e também a perlita tende a formar finos veios no lugar da dispersão aleatória. Essas transformações podem ser

associadas aos ciclos térmicos de aquecimento-resfriamento-reaquecimento que ocorre a cada depósito subsequente, alterando o tamanho dos grãos e modificando a sua microestrutura, dureza e resistência à tração. Essas alterações foram menos significativas para o metal de adição AWS ER70S-6, independente do modo de corrente de soldagem utilizado. Esses resultados são coerentes pois o metal de adição AWS ER70S-6 não possui elementos de liga ou elevado carbono, que são os principais agentes dessas alterações. Também apresenta menores valores de propriedades mecânicas quando comparado ao AWS ER110S-G.

A média das durezas HV para o metal de adição AWS ER110S-G com 1,0 mm de diâmetro para os grupos G5, G6 está demonstrada na Figura 62, a média é relativa aos valores do Topo, Meio e Base.

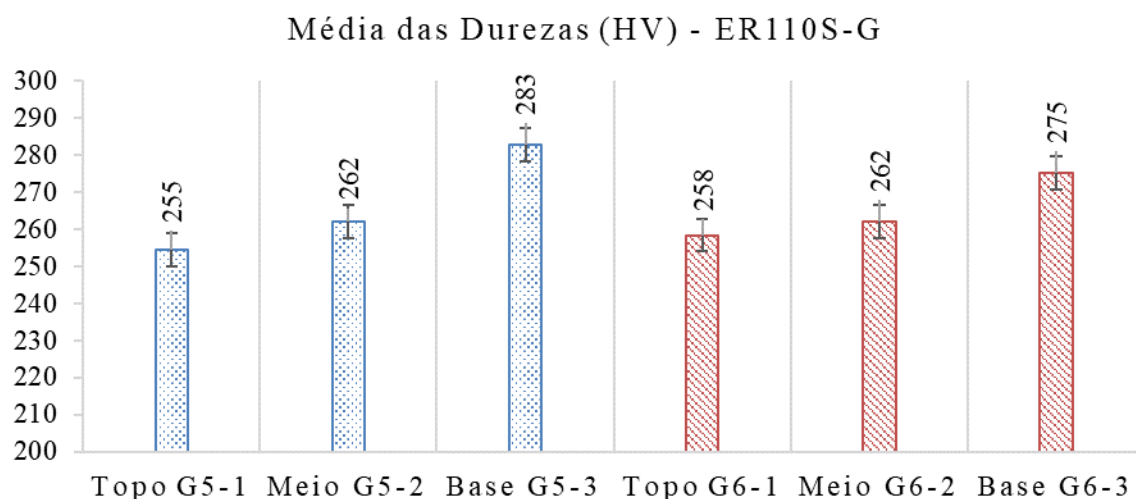


Figura 62 - Valores médios de dureza (HV) para topo, meio e base. AWS ER110S-G.

Os gráficos com as médias de dureza para topo, meio e base da Figura 62 demonstram a tendência de aumentar a dureza na respectiva sequência: topo, meio e base. Esse comportamento se apresentou para os modos de transferência Pulsado Sinérgico (G5) e Sinérgico (G6) com o eletrodo AWS ER110S-G. A mesma tendência pode ser observada para os valores de tensão de escoamento para o eletrodo e modos de transferência citados.

5.3 Propriedades mecânicas AISI H13

O calor transferido nos processos WAAM é um importante fator para a qualidade e produtividade do processo. O controle apropriado do calor transferido pode aperfeiçoar a fusão dos cordões entre camadas depositadas, reduzir discontinuidades, distorções, tensões residuais

e modificações na geometria dos cordões devido aos relativos ciclos térmicos. Neste trabalho, três formas de corrente de soldagem foram comparados com o objetivo de avaliar a influência nos dados obtidos da fonte de potência (corrente, tensão do arco e energia) e nas propriedades mecânicas. Testes foram realizados com o eletrodo do metal AISI H13 com CMT[®], LSC[®] e PS. Os resultados desse trabalho buscam contribuir para a área de pesquisa relacionada a WAAM, como uma nova tecnologia para construir ou reparar componentes metálicos nos quais diferentes tipos de ligas metálicas, fontes de potência e modos de transferência são utilizados.

As dimensões do depósito (altura e largura) são apresentadas na Figura 63. Para o modo CMT, a altura dos depósitos apresentou um valor aproximado de 71 mm, enquanto 65 mm para o LSC e 62 mm para o PS. O modo CMT também mostrou um valor mais alto para a largura, cerca de 9 mm, e para o LSC e PS, cerca de 8,0 mm e 8,3 mm, respectivamente. Durante os depósitos, as camadas inferiores são mantidas a uma temperatura mais alta, o que ajuda a atenuar a tendência de trincas a frio devido à redução na taxa de resfriamento e ao efeito do “pré-aquecimento”.

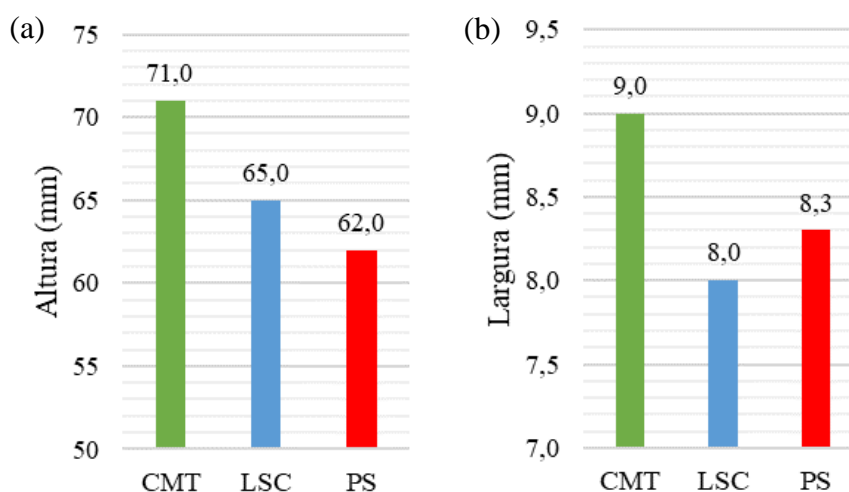


Figura 63 - Dimensão dos depósitos. (a) Altura. (b) Largura.

Os resultados maiores de altura e largura para o CMT podem estar relacionados ao movimento intrínseco do eletrodo sincronizado com a forma de onda, que permite que o metal fundido esfrie e reduza a fusão entre a camada já depositada e a camada em depósito. Esses fenômenos favorecem um aumento no volume camada a camada e também uma maior produtividade e eficiência do processo de deposição. Como enfatizado por [Rodrigues et al., 2019] o calor transferido desempenha um papel crítico no controle da poça de fusão. A mesma configuração para todas as comparações e os mesmos parâmetros de processo foram aplicados,

assim apenas a seleção de diferentes modos de transferência é responsável pela alteração na geometria do cordão. O aumento na transferência de calor também evita ou reduz a troca/dissipação de calor para as camadas inferiores e substrato, esses efeitos implicam em irregularidades na geometria do cordão. Assim, é importante notar que a altura para o modo LSC apresentou um valor intermediário, nas próximas seções será mostrado que os ciclos térmicos do LSC foram os que apresentaram a temperatura média mais baixa. Isso implica que a forma de onda da corrente CC adotada é responsável pela alteração na temperatura e geometria do cordão.

Os valores médios medidos para corrente (A), tensão do arco (V) e energia (J/s) são mostrados na Figura 64. O desvio padrão, na Figura 64, representa o grau de dispersão (população) dos valores medidos pelo sistema de aquisição de corrente e tensão da fonte de potência "logbook" em relação ao valor médio (a média) dos valores adquiridos nos 30 depósitos. Os desvios padrão para CMT, LSC e PS foram, respectivamente: corrente 2,3; 1,12; 7,8 - tensão do arco 0,2; 0,3; 0,6 - energia 9,3; 6,0; 32,5.

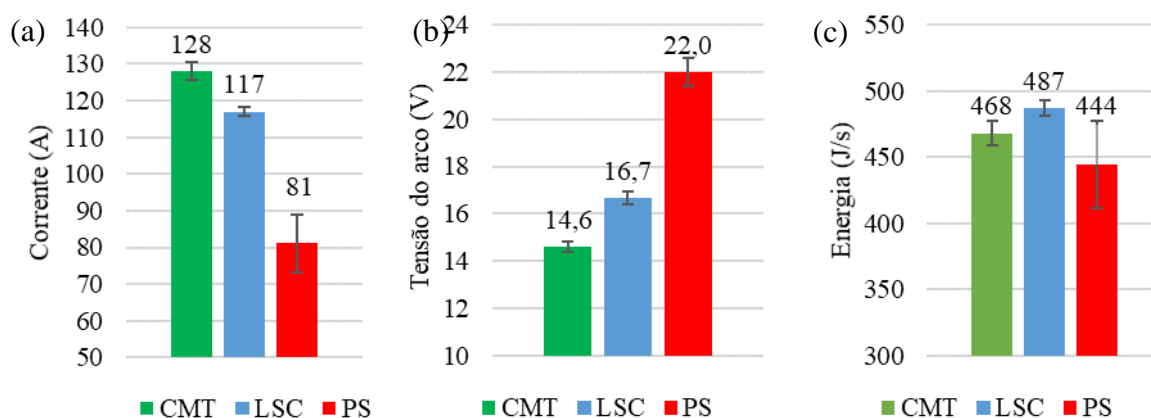


Figura 64 - Média dos valores de potência para CMT, LSC e PS. (a) Corrente (A). (b) Tensão do arco (V). (c) Energia (J/s).

De acordo com a Figura 64, os resultados para a corrente de deposição, CMT (128 A) e LSC (117 A) apresentaram um valor semelhante, enquanto PS apresentou um valor menor (81 A). Em relação à tensão do arco, CMT possui o valor mais baixo de 14,6 V próximo ao do LSC de 16,7 V, enquanto para o PS é 22,0 V. Considerando a tensão do arco e a corrente, CMT e LSC têm resultados comparáveis. Portanto, era de se esperar que as principais diferenças entre CMT/LSC e PS fossem devidas ao calor transferido e aos ciclos térmicos relacionados. Considerando as diferentes regiões como base, meio, e topo, os parâmetros do processo adquiridos em cada depósito não implicaram em uma correlação direta com as propriedades

mecânicas. Como mostram os resultados na sequência, não implicou em uma mudança significativa na dureza, teste de tração ou microestrutura.

Os gráficos da Figura 65 mostram a tendência na corrente de deposição e tensão do arco à medida que o número de camadas aumenta para os três modos de transferência analisados.

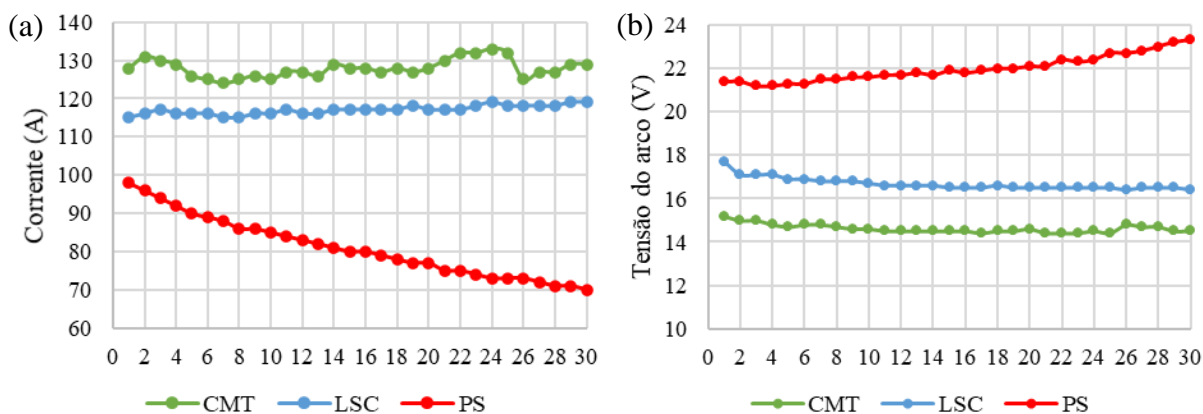


Figura 65 - Comportamento da corrente (A) e tensão do arco (V) enquanto novas camadas são depositadas.

O modo PS apresentou uma diminuição nos valores médios da corrente de deposição à medida que mais camadas foram depositadas. A camada 1 mostrou um valor de 98 A, a camada 17 de 79 A e a camada 30 de 70 A. Uma diminuição da camada 1 a 30 de cerca de 28,6 %. A velocidade de alimentação do arame é constante durante os depósitos. A tendência inversa foi apresentada pela tensão do arco, passando de 21,4 V na camada 1 a 23,3 V na camada 30, mantendo a energia quase constante. O movimento de incremento da tocha na direção vertical foi mantido constante (3,5 mm) para todas as deposições devido às medições iniciais do cordão, uma pequena diferença cumulativa na distância entre o bico de contato e a peça poderia ter contribuído para essa alteração. As modificações na geometria e na estabilidade do arco podem ser uma consequência desse fenômeno. A tendência de diminuir a corrente para o modo PS à medida que mais camadas são depositadas, não resultou em uma diferença relevante nos valores médios da dureza, com 748 HK, 749 HK e 769 HK, para as amostras da base, meio, e topo, respectivamente. Enquanto a resistência à tração máxima diminuiu de 1516 MPa para 1438 MPa e 1329 MPa para a base, meio, e topo, respectivamente. Tendência semelhante foi encontrada no modo CMT, onde os valores de corrente e tensão do arco permaneceram estáveis durante as deposições, portanto, não é possível inferir que a diferença nos resultados da resistência à tração máxima sejam consequência da redução da corrente e do aumento da tensão do arco para o modo PS.

A Figura 66 apresenta os ciclos térmicos medidos com o termopar 1 para os modos CMT, LSC e PS. Cada pico de temperatura representa um novo depósito.

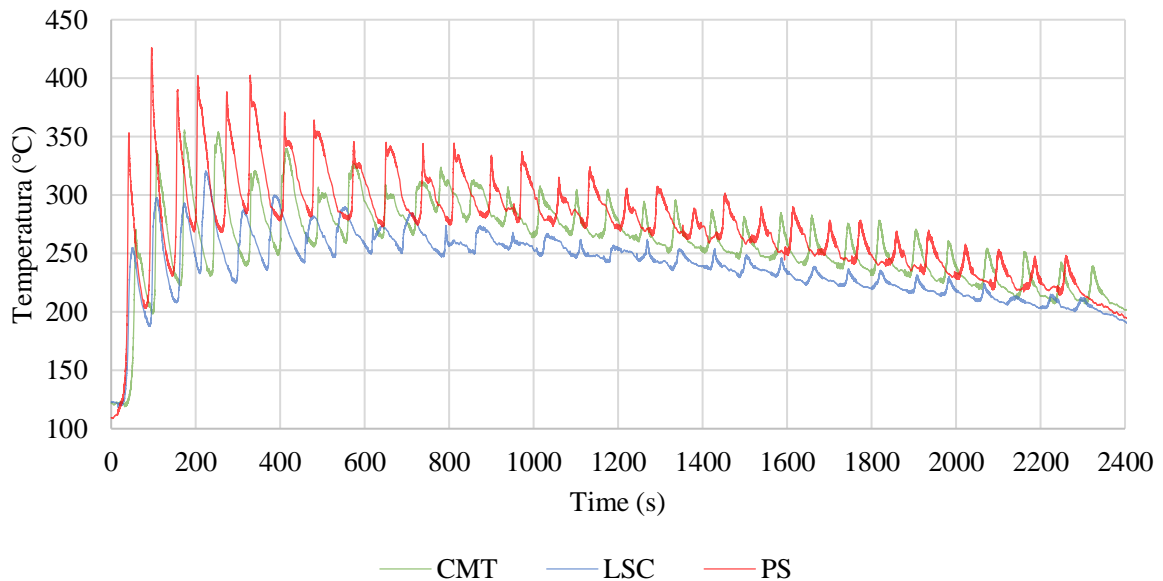


Figura 66 - Ciclos térmicos para CMT, LSC e PS.

O padrão nos ciclos térmicos indicados na Figura 66 mostram que cada passagem reaquece a camada inferior. Na Figura 66, fica claro que a temperatura média para o modo PS é a mais alta, enquanto para o LSC é a menor. Considerando a posição do termopar no substrato, o gráfico pode mostrar mais claramente a flutuação de temperatura nas primeiras camadas, enquanto nas superiores o efeito de amortecimento devido ao aumento da capacidade térmica diminui a precisão da comparação. Como apontado por [Li et al., 2019b] a camada superior gera um efeito de pós-aquecimento na camada inferior, mas a camada inferior também funciona como um efeito de pós-aquecimento na camada superior. Este mecanismo resulta em um alívio de tensão na camada inferior pela camada superior [Li et al., 2019b]. Entre as fontes de energia testadas por [Dutra et al., 2016], o processo CMT forneceu a menor transferência de calor.

A tendência detalhada das temperaturas máximas é mostrada na Figura 67. A temperatura máxima para cada ciclo é mais elevada para o PS, as temperaturas intermediárias são observadas no modo CMT e as temperaturas mais baixas foram geradas no modo LSC.

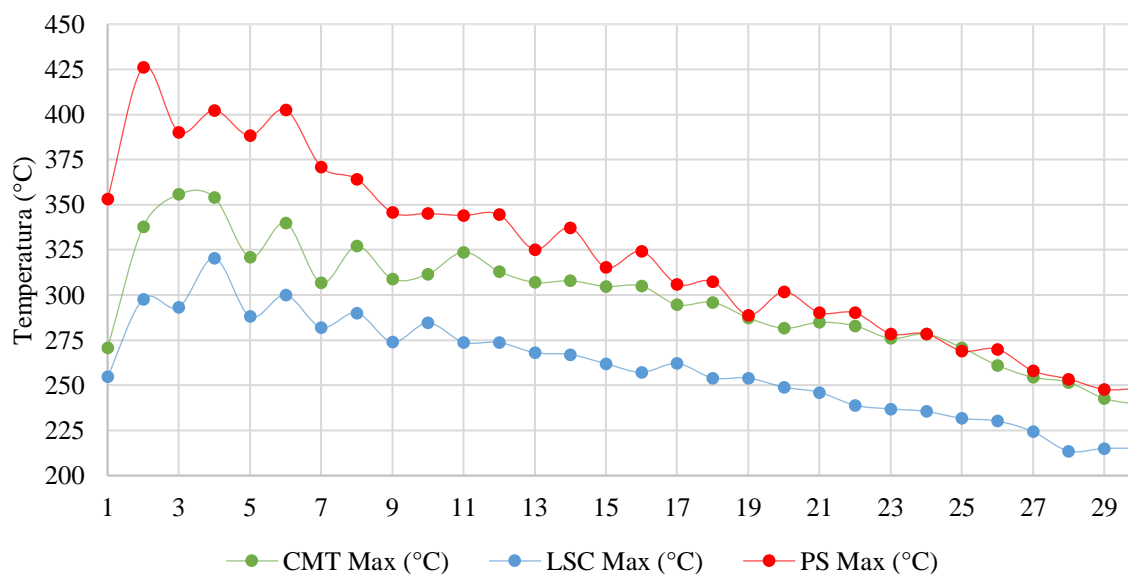


Figura 67 - Temperaturas máximas para cada camada de acordo com CMT, LSC e PS.

A obtenção de alta produtividade para deposição de componentes é um fator importante quando parâmetros de processo são selecionados, e aqui as características físicas como os ciclos térmicos (taxa de resfriamento) desempenham um papel importante. A Figura 67 mostra de forma clara a tendência para a temperatura máxima de pico para cada ciclo térmico apresentado anteriormente na Figura 66. A comparação entre as temperaturas máximas suporta a tomada de decisão dos modos de transferência, que devem ser selecionados para evitar a transferência de calor excessivo para materiais sensíveis. Geralmente, em aço ligado como o H13, procura-se evitar a precipitação de constituintes de martensita-austenita, que levam à formação de zonas frágeis e a propriedades com baixa tenacidade.

O resultado do ensaio de tração para o material AISI H13 utilizando o modo CMT é demonstrado na Figura 68 (a), onde as amostras são relativas às regiões de base, meio e topo do depósito. Os gráficos do ensaio de tração para os modos PS e LSC com o material AISI H13 estão no APÊNDICE J.1 e J.2, respectivamente. O valor médio das amostras testadas (base, meio, topo) para a resistência à tração máxima ao comparar os diferentes modos de transferência, CMT, LSC e PS são apresentados na Figura 68 (b). As amostras construídas não revelaram trincas, porosidade, falta de fusão ou outras discontinuidades.

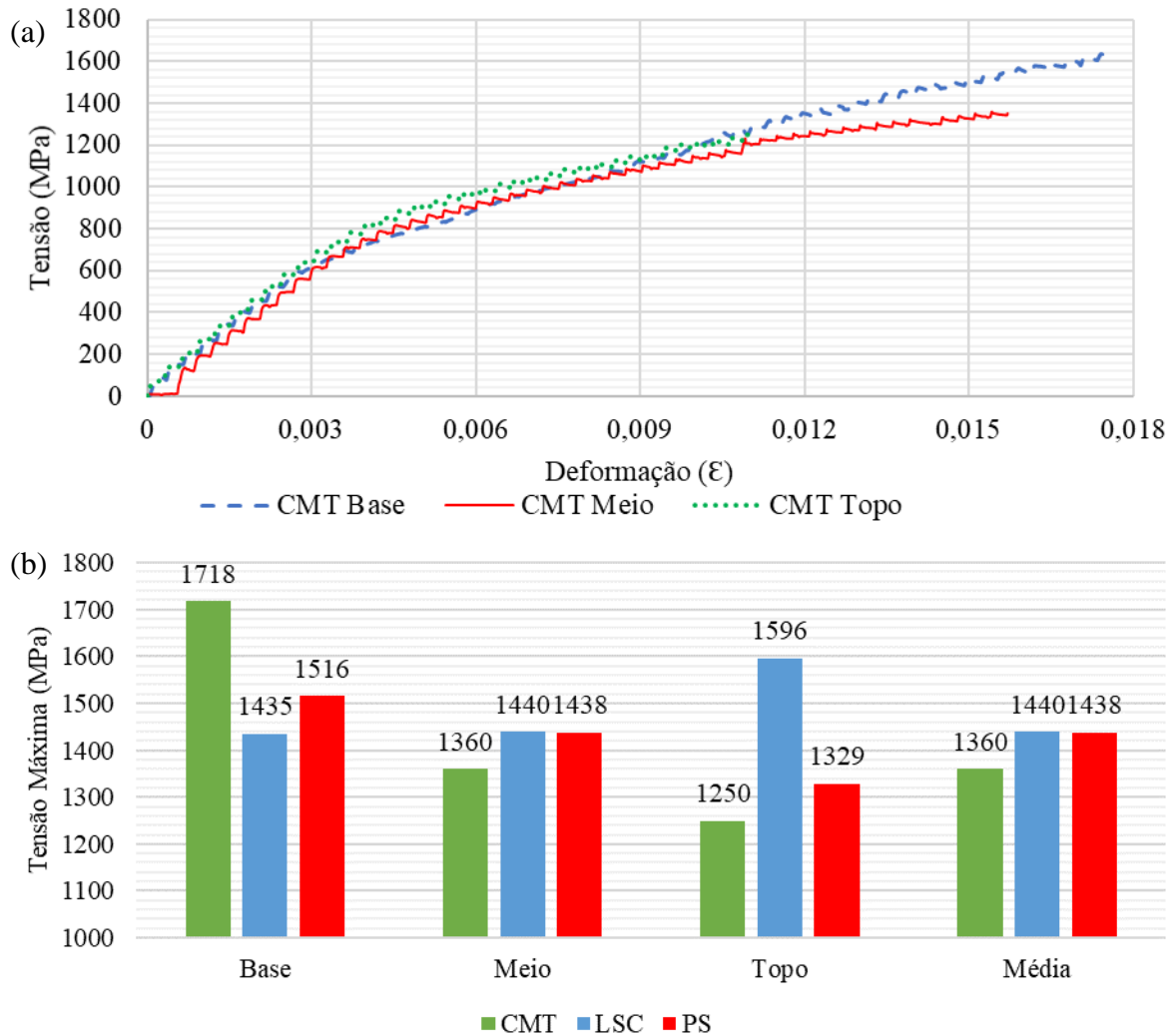


Figura 68 – (a) Ensaio de tração para o modo CMT com AISI H13. (b) Média da tensão de tração máxima com H13 para CMT, LSC e PS.

Os resultados da resistência à tração máxima demonstrados na Figura 68 são semelhantes para os modos LSC de 1435 MPa e PS 1438 MPa; o modo CMT mostrou um valor mais baixo de 1360 MPa. As amostras não apresentaram o efeito de estiramento (formação de pescoço) na região da fratura, indicativo de fraturas frágeis e também todas fraturadas na região central do corpo de prova. [Prado-Cerqueira et al., 2018] encontraram um valor médio menor para a resistência à tração máxima com CMT de 470 MPa em comparação com GMAW-padrão de 581 MPa na deposição de aço de baixo carbono. [Fang et al., 2018] realizaram o teste de tração para CMT, CMT avançado e CMT pulsado; os resultados foram aproximadamente de 290 MPa, sem grandes diferenças para a liga de alumínio 5183. [Shassere et al., 2019] encontraram propriedades mecânicas consistentes uma vez que um estado quase-estacionário das condições térmicas é alcançado. As amostras foram removidas de uma região de

estabilidade do arco elétrico, e representam o valor médio das partes base, meio e topo. Os corpos de prova após o ensaio de tração para o AISI H13 estão representados no APÊNDICE L. As amostras para a mesma forma de onda apresentaram resultados semelhantes, com um valor ligeiramente mais alto para a base e mais baixo para o topo em comparação com a amostra do meio.

Os perfis de dureza usando o teste Knoop são mostrados na Figura 70 (a), onde foram medidos 55 pontos para os três modos de transferência na parte central das amostras. As medições são distribuídas no sentido do substrato para o topo da parede depositada, conforme mostrado na Figura 16 e Figura 17 (c). A partir da macro análise da amostra, é possível encontrar três zonas diferentes de grãos que se alternam entre cada camada, Figura 69. As zonas sugeridas são baseadas em regiões comumente encontradas na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) em juntas soldadas multipasse [Kou, 2002; Shassere et al., 2019] (grãos refinados, grãos parcialmente refinados e de grãos grosseiros). Em geral, os menores valores de dureza foram encontrados na região refinada com predominância da forma equiaxial, o aumento subsequente foi relacionado à zona grãos parcialmente refinados e, finalmente, a zona grosseira. As zonas grosseiras apresentaram grandes grãos colunares. A zona parcialmente refinada de grãos não foi explorada neste trabalho, sendo uma sugestão para estudos mais aprofundados da microestrutura. A Figura 69 representa a região repetidamente encontrada em todas as amostras depositadas, como exemplos, a Figura 69 (a) ilustra a microestrutura com 50 X de aumento para o modo CMT com 755 HK nessa região. Enquanto a Figura 69 (b) ilustra para o modo LSC com 756 HK.

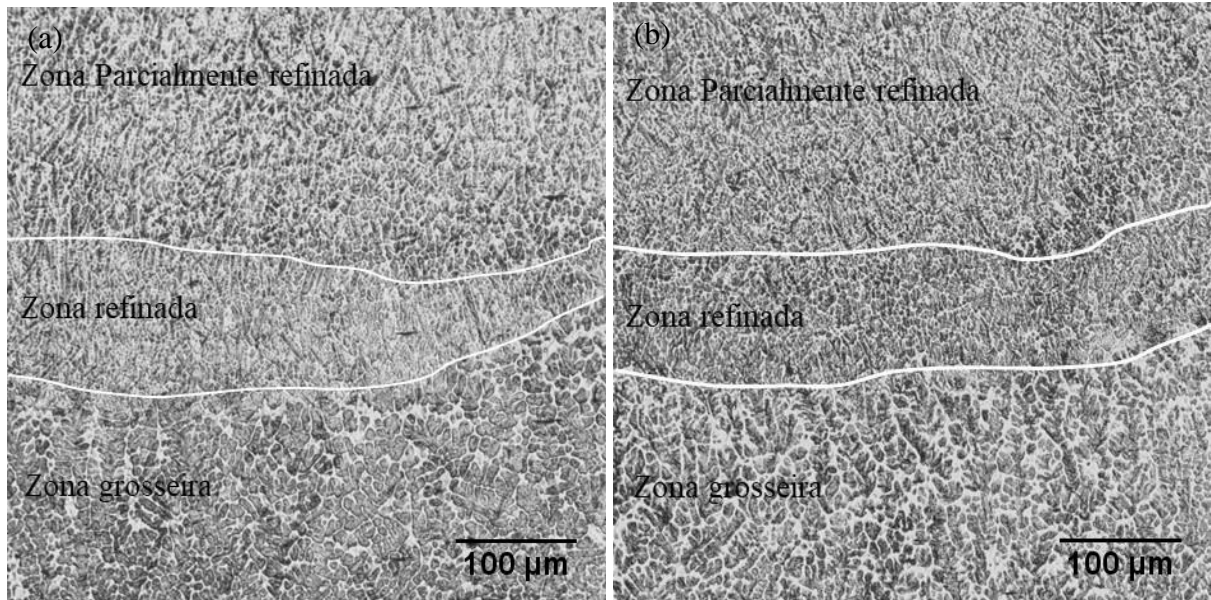


Figura 69 - Três regiões macro características (Grosseira, parcialmente refinada e refinada). (a) CMT Topo ponto 13 – 755 HK (50 X). (b) LSC meio ponto 17 – 756 HK (50 X).

Essas zonas estão relacionadas à oscilação da dureza, Figura 70, na qual novas camadas depositadas criam novas zonas com microestruturas específicas devido ao resfriamento do material. Esses mecanismos são comuns em manufatura aditiva de peças metálicas, onde a energia transferida pela fonte de potência e o resfriamento desempenham uma influência fundamental na microestrutura final. Por exemplo, como mostrado na Figura 70, para o modo PS a indentação de número 24 tem uma zona mais grosseira e dureza de 757 HK, para a indentação 25 uma região refinada com 746 HK e um refinamento parcial na indentação 26 com 749 HK.

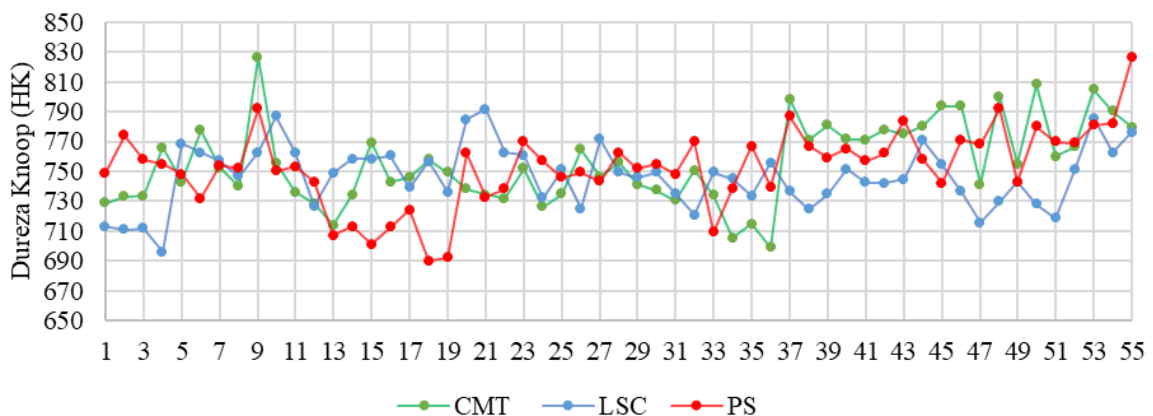


Figura 70 - (a) Perfil de dureza Knoop para CMT, LSC e PS.

Os valores médios encontrados no presente trabalho utilizando o teste de dureza Knoop, com carga de 3 N, estão apresentados na Figura 71. Apesar das diferenças encontradas nos

ciclos térmicos e na resistência à tração máxima para o CMT, o valor médio da dureza medido na seção transversal não apresentou forte diferença entre os modos CMT, LSC e PS testados para os depósitos com H13. O perfil de dureza da Figura 70 mostra a oscilação dos valores ao longo da seção transversal na direção vertical da deposição, o padrão representa a mudança entre a zona de grãos finos, a zona de grãos parcialmente refinados e a zona de grãos grosseiros, característico de depósitos WAAM não tratados termicamente. Na sequência, uma visão geral da microestrutura será abordada. O perfil do gráfico na Figura 70 representa a heterogeneidade dos tamanhos de grãos e da microestrutura. A região com maior homogeneidade no perfil de dureza também é aquela em que é atingido o estado de quase-equilíbrio do fluxo de calor [Shassere et al., 2019]. Os valores de dureza aumentaram à medida que atingiram as últimas camadas, esse mesmo padrão foi encontrado neste trabalho. [Reddy et al., 2019b] propuseram uma estratégia de resfriamento controlado para obter propriedades homogêneas para o AWS ER70S-6, mas o aspecto prejudicial foi o “amolecimento” da peça. A redução da dureza ou resistência de materiais como AISI H13 não é aceitável devido aos campos de aplicação, como material para revestimento ou reparo em matriz de estampagem. Os tratamentos térmicos apresentam aspectos positivos como a redução da estrutura não uniforme de grãos, como segregações, zonas de grãos colunares e equiaxiais, e a mistura de regiões de grãos grosseiros e finos. Porém, quando aplicado a componentes criados por WAAM pode resultar em custos de produção mais altos pela adição de uma etapa adicional na produção, devido ao grande tamanho de alguns componentes, aos custos adicionais de tratamento térmico e possivelmente redução da dureza/resistência do material.

Os espécimes retirados dos depósitos foram classificados como base, meio e topo. Os resultados da dureza do Knoop de acordo com a posição na direção vertical são apresentados na Figura 71. O valor de referência foi a média, mínimo e máximo. Uma variação considerável da dureza é observada nas regiões próximas ao substrato e nas camadas superiores devido à alta taxa de resfriamento no caso do primeiro e a um menor número de ciclos térmicos efetivos no caso do último. A porção intermediária que não está na proximidade térmica do substrato e sofre ciclos térmicos suficientes possui taxas de resfriamento uniformes.

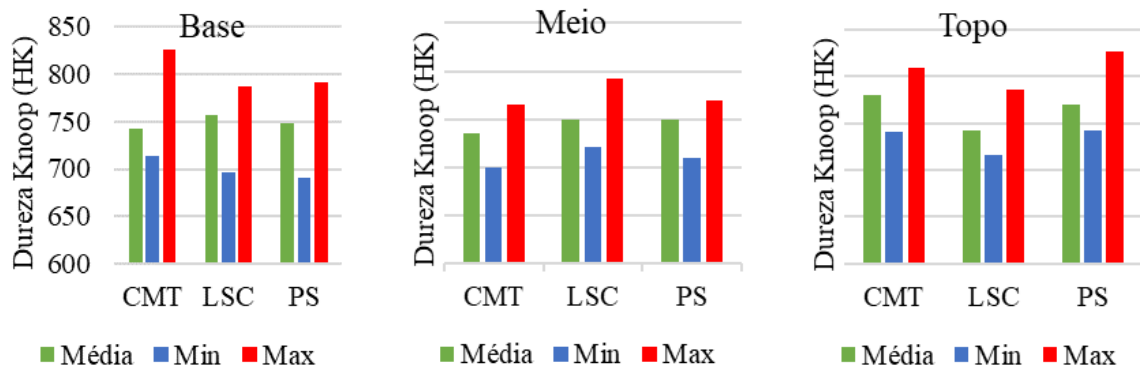


Figura 71 - Resultados de Dureza Knoop para as amostras da base, meio e topo. Valores médios, mínimos e máximos para CMT, LSC e PS.

Comparando os resultados da Figura 71, indica-se um valor médio semelhante para as medições da média, mínima e máxima de aproximadamente 752 HK, 695 HK e 815 HK, respectivamente. Nas regiões específicas, a base mostrou uma dispersão maior, o meio apresentou valores ligeiramente mais altos para o LSC e topo não apresentou uma clara diferença entre os modos de transferência. A maior diferença, de 112 HK, foi encontrada no modo CMT, com máximo de 826 HK e mínimo de 714 HK. Para os modos CMT, LSC e PS, não foi encontrado uma clara tendência ou diferença pela análise de dureza que pudesse destacar um dos modos considerando-se os parâmetros de processo e material analisados neste trabalho. As amostras de H13 de [Wang et al., 2018] usando arco submerso SAW mostraram valores de microdureza para o substrato em torno de 276 HV e 356 HV para o depósito (aproximadamente 288 HK e 362 HK, respectivamente), alegou-se que o incremento se devia à alta concentração de martensita fina e carbonetos dispersos nos limites de grão.

A Figura 72 demonstra a microestrutura no ponto de indentação realizada para a dureza Knoop nas zonas refinadas com aumento de 500 X. As microestruturas mostradas na Figura 72 são: (a) CMT, (b) LSC e (c) PS. Na Figura 72, as referências numéricas se referem a sequência de dureza e valores medidos, por exemplo, CMT meio 28 – 756 HK, respectivamente.

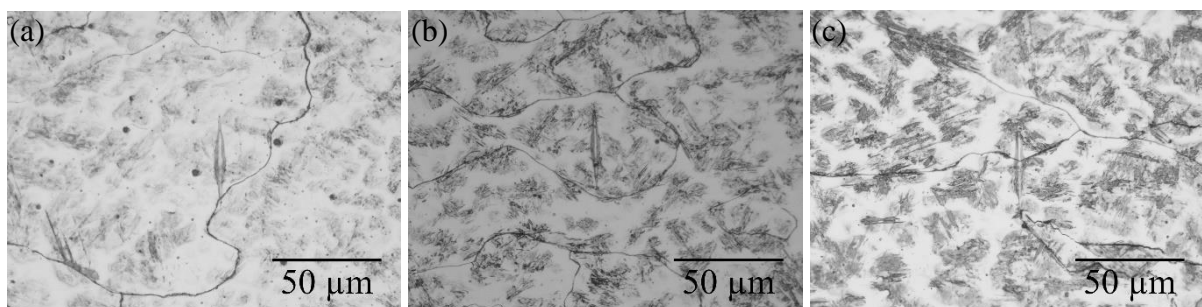


Figura 72 - Zona de grãos refinados. (a) CMT meio 28 – 756 HK. (b) LSC meio 10 – 746 HK. (c) PS meio 10 – 752 HK. 500 X.

A zona de grão refinado é representada na Figura 72 para (a) CMT, (b) LSC e (c) PS. Os valores de dureza relacionados às microestruturas em específico foram 756 HK para CMT, 746 HK para LSC e 752 HK para o modo PS. Foram escolhidas micrografias com valores de dureza semelhantes para isolar o efeito da forma de onda da corrente na microestrutura. É perceptível o incremento de fases mais “duras” “*hard phases*” do modo CMT para o PS. Para o CMT (a), o tamanho de grão é maior, com incremento de precipitados e indicação de pequenas ilhas de perlita baseadas em uma matriz predominante de ferrita. A precipitação de carboneto pode ser formada no H13 por elementos como Cr e Mo. Mesmo que o modo CMT não tenha apresentado o ciclo térmico com as menores temperaturas ou taxas de resfriamento, conforme indicado na Figura 67 e Figura 74, respectivamente. Para o modo LSC (b), o tamanho do grão diminui quando comparado ao CMT e se torna com formato colunar, o número de precipitações diminui e pequenas ilhas de fases mais duras aumentam. Considerando o material AISI H13, as prováveis fases são perlita, ferrita acicular e bainita. O modo pulsado (c) indica uma estrutura mais grosseira, potencialmente com ripas de martensita e austenita retida.

Para uma liga de cobre-alumínio, [Queguineur et al., 2018] encontraram que o crescimento de grãos levou a uma diminuição nas propriedades mecânicas em comparação com os valores nominais devido ao aumento no calor transferido para o modo pulsado quando comparado ao CMT. Os resultados de [Shassere et al., 2019] indicam que a resistência ao escoamento diminui com o aumento do tamanho de grão, que por sua vez aumenta com a altura depositada. Comportamento semelhante foi encontrado no presente estudo, o modo CMT com maior tamanho de grão (Figura 72) apresentou a menor resistência à tração máxima em comparação com LSC e PS. De acordo com [Wu et al., 2017b] como resultado do controle da temperatura de resfriamento para os materiais depositados em posição sem suporte de Ti6Al4V, é que taxas de resfriamento mais altas resultaram em taxas de nucleação mais altas. Considerando os diferentes materiais, no referido trabalho o modo pulsado foi utilizado para reduzir o calor imposto, verificou-se uma melhora na resistência final e de escoamento. Os achados deste trabalho estão de acordo com [Wu et al., 2017b] em relação a possíveis ajustes das propriedades de tração pelo controle do calor transferido, desenvolvendo o mecanismo de controle do crescimento dos grãos para o mesmo material através de diferentes de modos de transferência.

As zonas grosseiras são apresentadas na Figura 73. É mostrado a região da amostra do meio com os respectivos valores de dureza, na qual para CMT 747 HK, LSC 749 HK e PS 748 HK com aumento de 500 X.

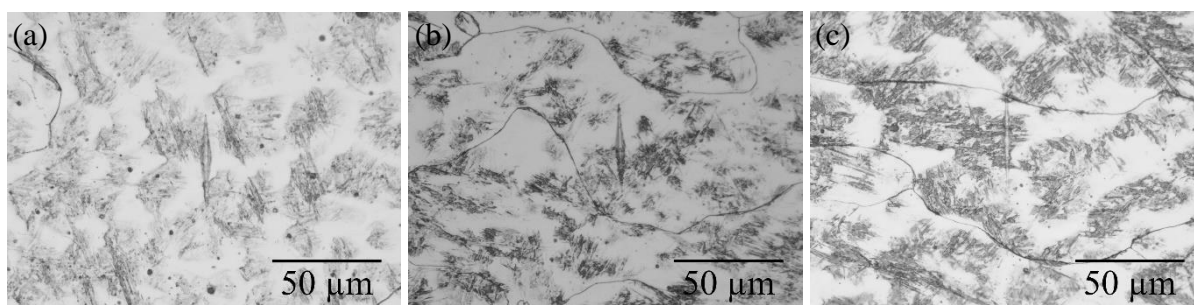


Figura 73 - Zona de grãos grosseiros, amostras do meio. (a) CMT 27 – 747 HK. (b) LSC 11 – 749 HK. (c) PS 12 – 748 HK.

A diferença de dureza encontrada está nas microrregiões das amostras. Para a comparação na Figura 73, foi escolhida a zona de grãos mais grosseiros. Quando a área em geral da seção transversal dos depósitos é considerada, os valores médios dos resultados da dureza são semelhantes, como apresentado na Figura 71, mas existem diferenças localizadas, como mostrado na oscilação da Figura 70. Se comparados os modos de transferência em específico, uma microestrutura mais grosseira é apresentada na Figura 73 que na Figura 72 com grãos refinados, menores e equiaxiais. A principal diferença das três zonas é o tamanho do grão. O modo CMT para ambas regiões, Figura 72 (a) e Figura 73 (a), apresentou a menor diferença entre todas as micro zonas com uma microestrutura com maior homogeneidade, tamanho e formato de grão. Além disso, o CMT tem a maior precipitação de carbonetos. A microestrutura mais grosseira foi apresentada pelo modo PS com uma diferença mais clara no formato dos grãos, colunares e maiores. A microestrutura gerada pelo modo LSC se apresentou intermediária entre os modos, grãos levemente mais colunares para a zona grosseira, com poucas e pequenas precipitações de carbonetos para as regiões refinada e grosseira e, finalmente, um número menor de fases duras quando comparado com o PS, mas maior que no modo CMT. A microestrutura encontrada nas amostras não foi majoritariamente ferrita acicular, geralmente desejada para melhorar a tenacidade, mas apresentou uma matriz homogênea dos constituintes referidos acima. Para fins ilustrativos e de complementação, exemplos das microestruturas do metal de adição AISI H13 com ampliações de 50 X e 500 X para a base e topo são mostradas no APÊNDICE M, formas de onda pulsado, LSC e CMT.

Tamanho de grãos maiores foram encontrados para aportes térmicos mais elevados por [Rodrigues et al., 2019] em um material HSLA, o tamanho aumenta ao longo da direção de construção enquanto a dureza diminui, esses resultados estão de acordo com este trabalho. Isso é possível devido à menor taxa de resfriamento nessas regiões, devido ao pré-aquecimento imposto nas camadas anteriores. Depois que o substrato e as primeiras camadas atingem uma temperatura de regime, se alcança uma temperatura quase constante, na qual o depósito de camadas subsequentes tem um tamanho e microestrutura semelhantes de grãos, até que mude novamente nas últimas camadas depositadas. Neste estudo, as taxas de resfriamento usaram-se como referência um termopar fixado no metal base para todos os depósitos, portanto as temperaturas estão relacionadas a este ponto. As taxas de resfriamento para o CMT, LSC e PS são apresentadas na Figura 74. Para fins comparativos, foram considerados resultados intercalados da camada 1 a 10.

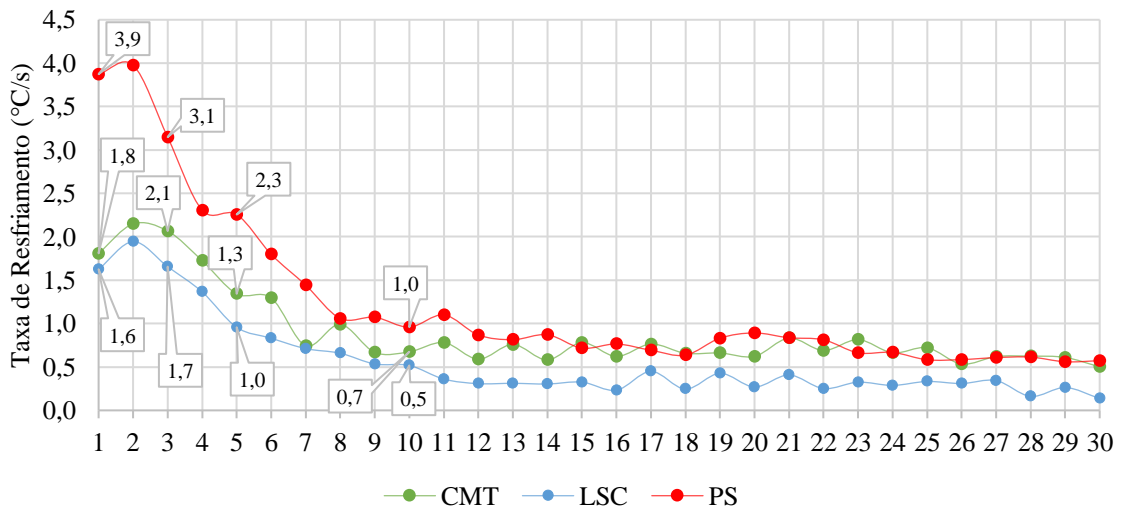


Figura 74 - Taxas de resfriamento para CMT, LSC e PS.

O modo PS apresentou a maior taxa de resfriamento em comparação com o CMT e o LSC, como mostra a Figura 74. À medida que os depósitos aumentam, a distância entre a poça de fusão e o termopar também aumenta, levando a uma estimativa da taxa de resfriamento que considera o material depositado. Devido à maior entrada/transferência de energia do modo LSC, a poça de fusão e entornos atinge temperaturas mais elevadas, o que reduz a taxa de solidificação e suporta a geração de uma microestrutura mais grosseira, como mostra a Figura 73. O padrão dos ciclos térmicos está de acordo com o resultados de [Reddy et al., 2019b]. A taxa de resfriamento estimada de 800 °C a 500 °C gerada pela simulação se torna estável após a camada de número 10, e o tempo de deposição para cada camada é de cerca de 13 s para um cordão de

comprimento de 180 mm. Práticas de resfriamento do substrato podem levar à falta de homogeneidade, principalmente nas primeiras camadas. O motivo, conforme discutido, é o efeito de dissipação de calor do substrato. Prevê-se que, se o substrato for mantido em temperaturas mais altas o resfriamento pode ser retardado, então estruturas e propriedades com maior uniformidade podem ser obtidas. Os resultados obtidos por [Guo et al., 2016] sobre os efeitos da frequência de pulso mostram uma modificação na taxa de resfriamento e nas oscilações da poça de fusão, levando à alteração do tamanho e formato do grão. O aumento da frequência de pulso resulta em uma taxa de resfriamento mais baixa, elevando a temperatura e a transferência efetiva de calor. O modo PS deste trabalho apresentou resultados em acordo com [Guo et al., 2016] quando comparados com CMT e LSC. Em uma junta soldada, o modo de transferência de calor é geralmente por condução em 2 ou 3 dimensões e radiação pela superfície. Em WAAM, para depósitos de “paredes” verticais com um cordão de largura, o modo de transferência de calor após o pré-aquecimento das primeiras camadas muda para principalmente radiação, pois a condução reduz seu efeito na extração de calor, esse fenômeno também foi encontrado por [Shassere et al., 2019]. Dentro da poça de fusão, o principal mecanismo de transferência de calor é por convecção, [Ou et al., 2018]. O grau de superaquecimento da poça de fusão é menor para a combinação de menor transferência de calor e a velocidade de solidificação é mais rápida [Wang et al., 2019]. A porção do componente que está na região de intensidade térmica mais elevada do substrato, comparativamente, sofre uma taxa de resfriamento mais alta, resultando em granulometria e ripas mais finas. Embora, dependendo da entrada de calor e do material, o crescimento de grãos devido ao aquecimento repetido e dos ciclos de resfriamento pode ser desenvolvido. As camadas superiores não sofrem repetidos ciclos térmicos e, portanto, apresentam grãos menores. A variação na microestrutura pode ser corroborada com a variação da dureza ao longo da direção da construção.

5.4 Resultados: resfriamento com jato de ar versus convecção natural em WAAM

As amostras foram fabricadas de acordo com os procedimentos descritos na seção 4.3, sem a ocorrência de colapso dos depósitos ou a presença de defeitos visíveis ao olho nú. Esta seção apresenta o resultado das análises, discutindo primeiro as temperaturas obtidas e depois a geometria das superfícies.

Os resultados das medições de temperatura do substrato são avaliados a seguir. Como mencionado na seção 2, as dez primeiras camadas foram depositadas com 120 s de tempo de inatividade (espera) entre camadas e sem resfriamento para todos os testes. Então testes com

resfriamento via jato de ar e convecção natural com os tempos de 30 s e 10 s foram realizados, conforme a Tabela 10. Os resultados do termopar TC2 foram analisados por ser o mais próximo dos cordões depositados, para os demais termopares foram encontradas tendências de resfriamento semelhantes. A Figura 75 (a) mostra os resultados das experiências 1, 3 e 5, relacionadas aos depósitos realizados sem o resfriamento por jato de ar. Os experimentos com resfriamento por jato de ar foram realizados utilizando o mesmo arranjo de tempos de inatividade usados nos testes sem resfriamento forçado ou com ar comprimido. A Figura 75 (b) compara os resultados das experiências usando o resfriamento por jato de ar, ou seja, os testes 2, 4 e 6. Destaca-se que no teste realizado com jato de ar e 10 s de tempo ocioso, a linha de tendência da temperatura fica abaixo de 250 °C, muito abaixo do valor do mesmo teste realizado usando o resfriamento por convecção natural. Isso é claramente destacado na Figura 76 (b), que compara os resultados dos testes 5 e 6.

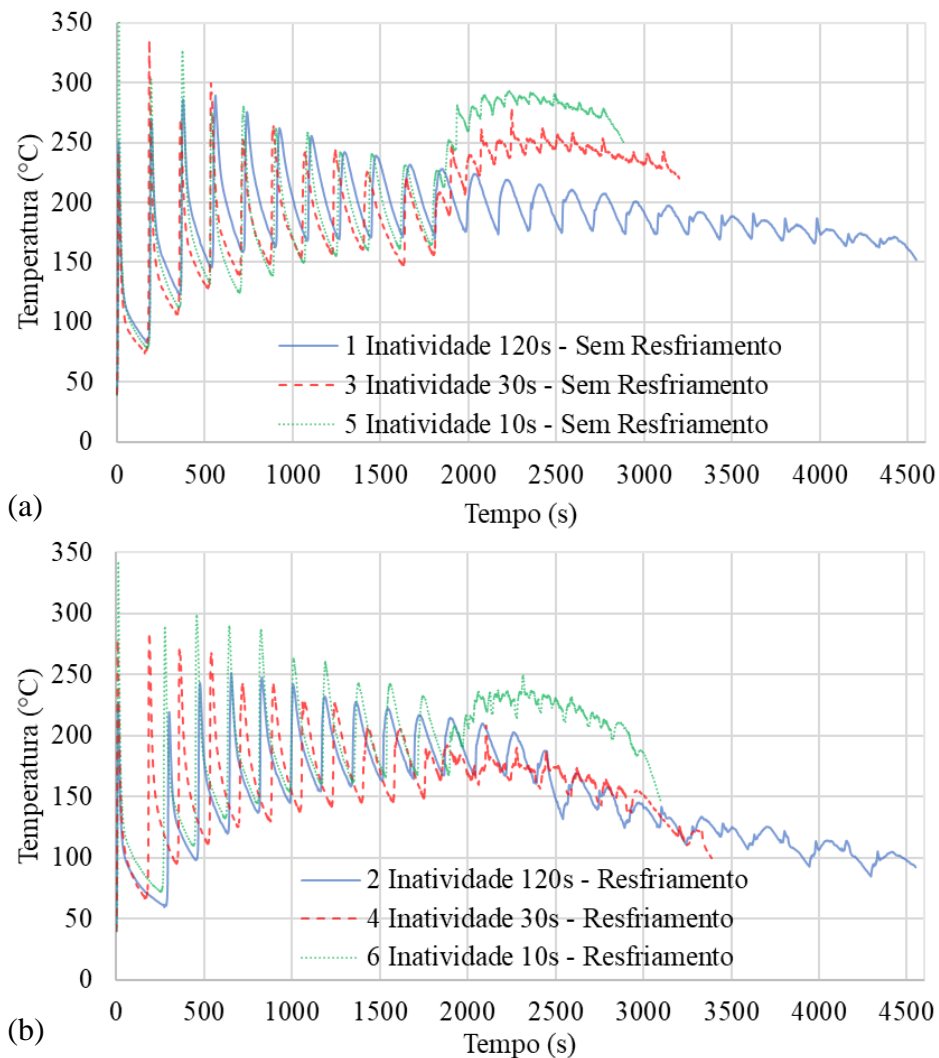


Figura 75 - (a) Camadas depositadas sem resfriamento. 1 - 120 s. 3 - 30 s. 5 - 10 s. (b) Tempos ociosos para depósitos resfriados. 2 - 120 s. 4 - 30 s. 6 - 10 s.

Para todos os testes, as curvas de temperatura mostram um padrão cíclico típico devido às passagens repetidas da tocha de deposição. No entanto, as temperaturas do substrato mostram padrões diferentes para diferentes tempos de inatividade entre depósitos. Em seu valor mais elevado, 120 s, o processo mostra uma tendência de uma ligeira diminuição dos gradientes máximos de temperatura em cada ciclo, isto é, experimentam uma diminuição progressiva. Esses resultados estão de acordo com o efeito dos tempos ociosos nos ciclos térmicos encontrados por [Lei et al., 2018] e a diminuição da temperatura geral ao passo que camadas são depositadas [Lundbäck; Lindgren, 2011; Wu et al., 2019]. Esse comportamento se deve ao aumento da massa de metal e área superficial da peça para cada camada depositada, que acaba por aumentar, respectivamente, a capacidade calorífica geral e a extração de calor por convecção e radiação. Portanto, tempos de inatividade mais longos permitem que esses fatores dominem o problema da transferência de calor, em relação à redução do fluxo de calor por condução, devido ao aumento da altura da peça de trabalho. No entanto, a adoção de tempos de inatividade mais longos tem o efeito negativo de diminuir a produtividade. Por esse motivo, tempos de inatividade menores de 30 s e 10 s foram testados, como mostrado na Figura 75 (a). Ambos os testes mostram um aumento significativo da temperatura média após a diminuição dos tempos de inatividade. Espera-se que esta tendência da temperatura do substrato resulte em um aumento significativo da temperatura entre depósitos nas camadas superiores. Essas regiões mais quentes podem causar efeitos negativos na geometria dos cordões, na qualidade superficial e nas propriedades do material.

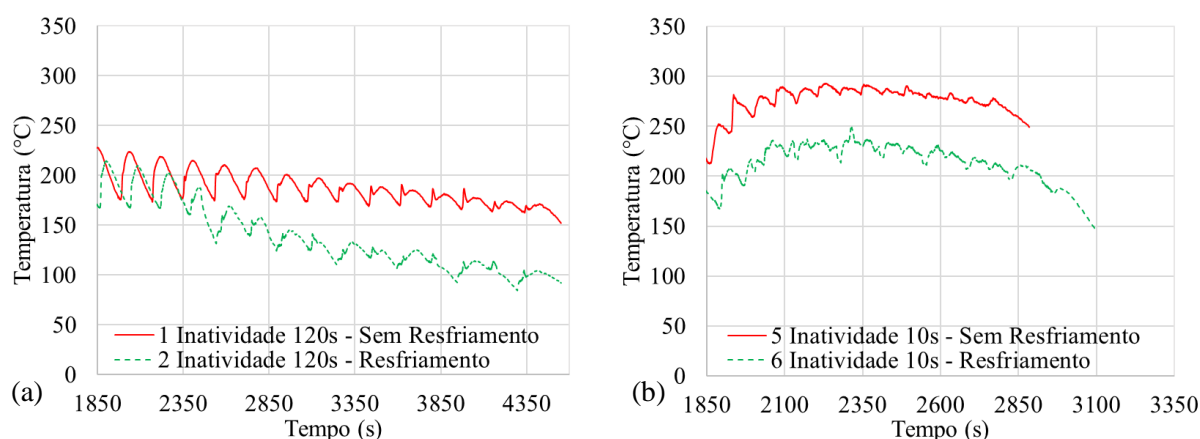


Figura 76 - Comparação entre o resfriamento padrão e com jato de ar. (a) Inatividade de 120 s. (b) Inatividade de 10 s.

Como mostrado na Figura 76 (b), apesar do uso do resfriamento por jato de ar, a adoção do tempo de inatividade de 10 s não impede o aumento repentino da temperatura do substrato.

No entanto, a Figura 76 (a), que compara os resultados com e sem resfriamento a ar, usando um tempo ocioso de 120 s, destaca que neste caso o uso de resfriamento resulta em uma diminuição mais acentuada da temperatura média do substrato. Uma tendência semelhante ocorre para o tempo de 30 s (Figura 75 (b), teste 4), em que a temperatura do substrato sofre uma redução significativa após a ativação do jato de ar. Além disso, além das semelhanças nas tendências, os testes 2 e 4 mostram valores pontuais e próximos após a ativação do jato de ar. Esse é um resultado interessante, pois, diferentemente dos testes de resfriamento por convecção natural, ao usar jato de ar, aumentar o tempo inativo entre camadas acima de 30 s não resulta em nenhuma redução significativa da temperatura do substrato. Portanto, aumentar o tempo de inatividade resultaria apenas em uma perda na eficiência de fabricação. Para o caso de teste específico, reduzir o tempo ocioso de 120 s para 30 s reduziria o período inativo do processo para as camadas produzidas com resfriamento a jato de ar em 75%. Considerando que o jato é realizado usando ar comprimido, o custo de operação é baixo, sendo balanceado pelo aumento de produtividade e resultando em um saldo positivo para a estratégia de resfriamento ativo. É importante notar que o ar comprimido pode ser usado apenas para materiais pouco reativos, como aço carbono, enquanto que para materiais altamente sensíveis, como o Ti6Al4V, é necessário o uso de um gás inerte no jato de fluido refrigerante.

Em relação à seleção do tempo de inatividade, conforme mostrado nos resultados do teste 6, seu valor não pode ser reduzido a zero mesmo se for utilizado jato de ar. Existe uma condição limite para o tempo de inatividade para uma determinada combinação de parâmetros do processo, geometria, tamanho da peça, material e variáveis do jato de ar. Isso destaca como o resfriamento forçado por jato de ar não é, por si só, capaz de garantir uma extração de calor tão alta quanto o necessário para evitar o problema do acúmulo de calor, principalmente em componentes pequenos e médios nos quais a contribuição de um tempo de inatividade, mesmo se reduzido, se faz necessária. São casos em que a fonte de calor completa uma camada e inicia a seguinte com velocidade maior que a capacidade de trocar calor do componente, mesmo com resfriado forçado, dificultando o atendimento a uma faixa determinada de temperatura entre passes.

O comportamento dos ciclos térmicos está resumido na Figura 77, que apresenta os sinais do TC2, Figura 19, termopar mais próximo dos cordões depositados. A Figura 77 compara as temperaturas dos ciclos térmicos com resfriamento por convecção natural e com resfriamento pela imposição do jato de ar. A Figura 77 (a) ilustra os testes com tempo de inatividade (espera) entre depósitos de 30 s e a Figura 77 (b) de 10 s.

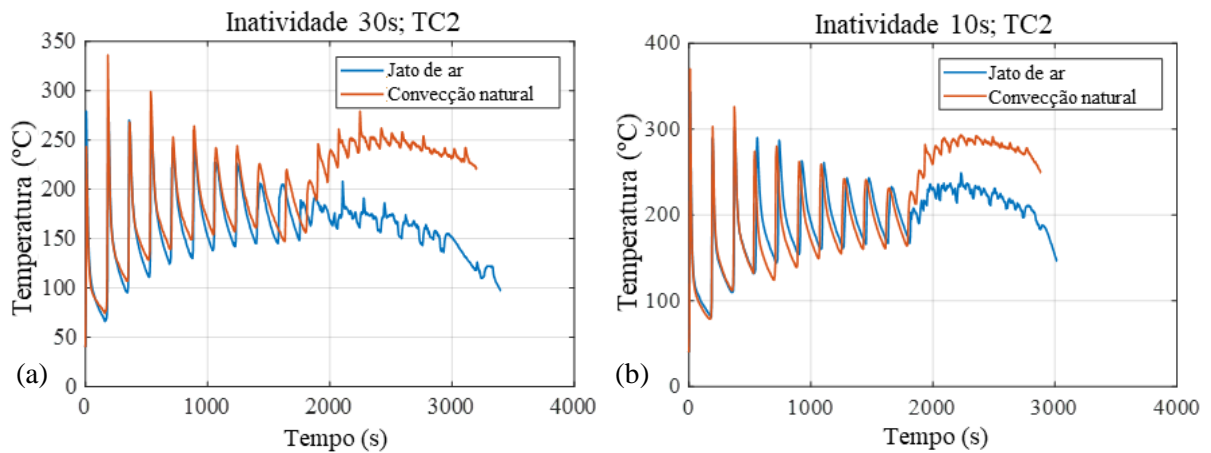


Figura 77 – Comparação: Resfriamento com jato de ar – Convecção natural. (a) 30 s. (b) 10 s.

Em ambos os casos, os sinais de temperatura têm o padrão cíclico típico, devido ao movimento de ida e vinda da tocha. Na convecção natural, para ambos os testes, a temperatura do substrato sofreu um aumento repentino quando o tempo de espera é modificado, indicando a ocorrência do acúmulo de calor [Lundbäck; Lindgren, 2011]. O jato de ar imposto na superfície evita esse aumento de temperatura ao usar o tempo de espera de 30 s, indicando um efeito positivo com a redução do acúmulo de calor. No lado oposto, ao utilizar o tempo de espera de 10 s, o jato de ar reduz a magnitude do aumento de temperatura, mas não modifica a tendência ou inclinação da curva de temperatura como ocorre para 30 s. Isso indica que para um determinado conjunto de materiais, parâmetros de soldagem, posicionamento e vazão do jato de ar, há um limite para a eficácia do jato de ar na prevenção do acúmulo de calor.

As métricas de comparação de superfície apresentadas na seção de materiais e métodos, ou seja, a eficiência de deposição, a altura da parede depositada e o desvio aritmético médio são apresentadas nas Figura 78 (a), (b) e (c), respectivamente.

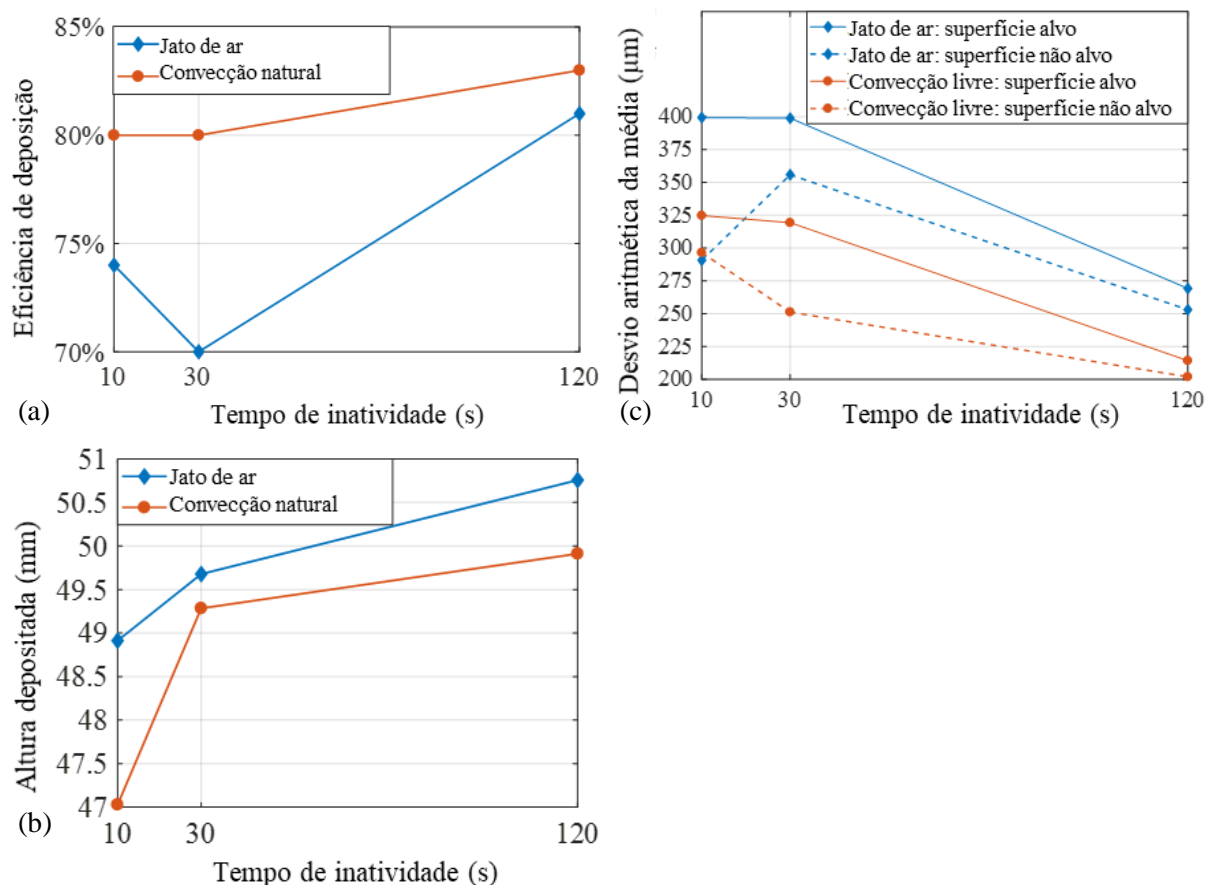


Figura 78 - Resultados da análise superficial: (a) Eficiência de deposição. (b) Altura da parede depositada. (c) Desvio aritmético médio.

Figura 78 (a) destaca que o jato de ar imposto para resfriamento na superfície leva a uma redução na eficiência de deposição em comparação com a convecção natural para cada um dos tempos de espera testados. Esse efeito é mais pronunciado nas amostras com tempo de espera de 30 s, em que o uso do jato de ar reduz a eficiência de deposição em 10 %. Em relação à altura da parede, Figura 78 (b) destaca que o jato de ar leva a um aumento da altura média entre 0,4 mm (30 s) e 2 mm (10 s). O desvio aritmético médio (Figura 78 (c)) mostra uma tendência semelhante à eficiência de deposição: para a superfície que recebeu o jato de ar, o desvio é maior nas amostras com jato de ar do que nas de convecção natural; nas superfícies não submetidas ao jato de ar essa tendência ainda está presente, exceto para a amostra de 10 s. A investigação experimental deve ser ampliada em termos de tempo de espera entre depósitos e de repetições para se obter uma melhor compreensão sobre esse resultado.

O padrão de dados apresentados é uma evidência da efetividade da imposição de jato de ar na prevenção do acúmulo de calor. A extração de calor mais elevada causada pelo jato de ar resulta no aumento da taxa de resfriamento e no tamanho da poça de fusão. Isso aumenta a taxa

de solidificação do depósito, resultando em uma molhabilidade reduzida. As consequências são o aumento da altura das camadas depositadas e do aumento da diferença entre picos e vales na superfície (desvio aritmético médio) em relação ao resfriamento por convecção natural. Isso explica a diminuição da eficiência da deposição, uma vez que elevadas ondulações superficiais resultam em uma maior diferença entre a largura total e efetiva dos depósitos.

Os resultados das simulações em EF do efeito do resfriamento por jato de ar são analisados na sequência. Os resultados apresentados estão relacionados às simulações dos testes 1 e 2, que utilizam um tempo de inatividade entre camadas de 120 s. A Figura 79 apresenta a comparação dos resultados das simulações com os termopares 2 (TC 2) e 4 (TC 4), uma vez que esses termopares são os mais próximos e os mais afastados da parede, respectivamente. A comparação foi realizada extraindo o histórico temperatura dos nós localizados na posição mais próxima dos termopares.

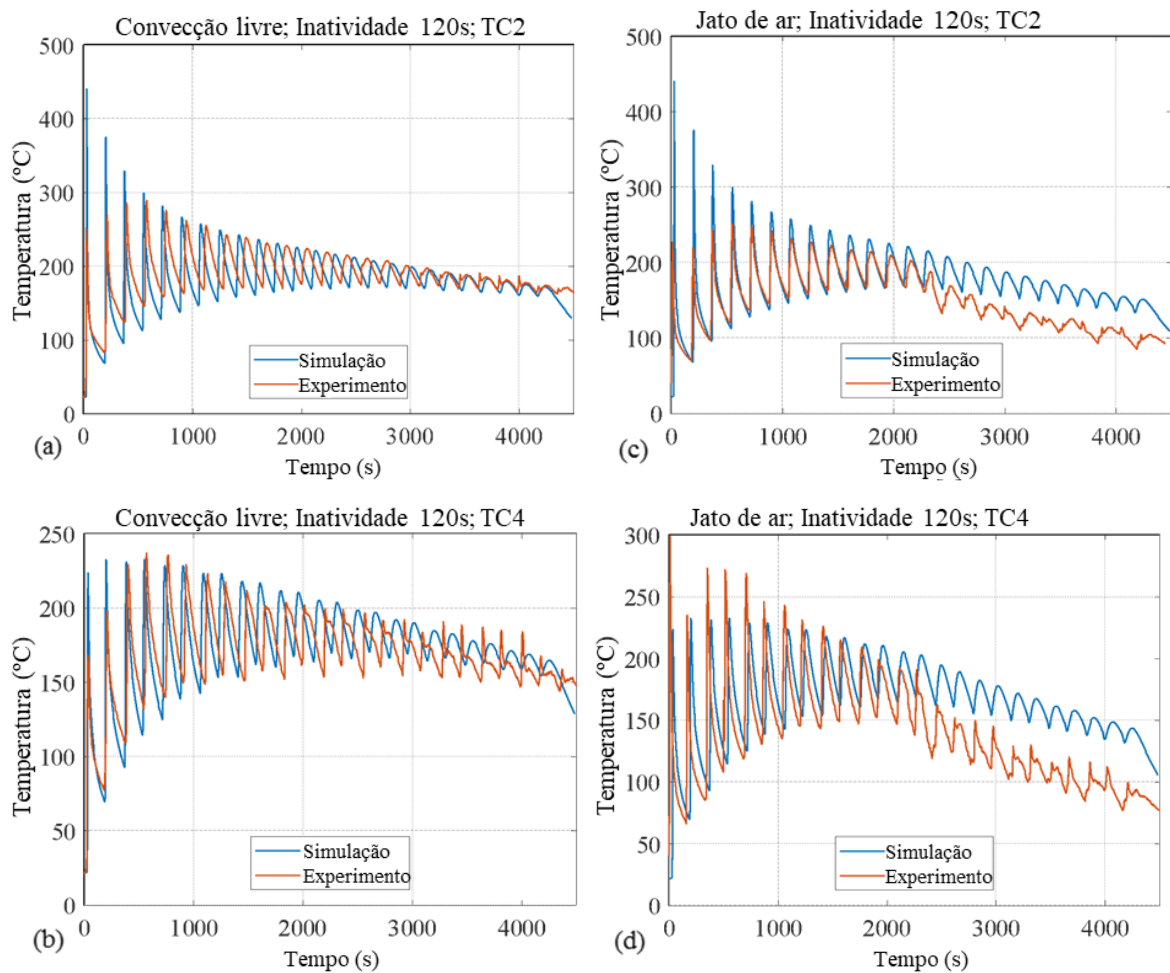


Figura 79 - Comparação dos resultados de simulação e experimentais para inatividade de 120 s (a) TC 2, convecção natural. (b) TC 4, convecção natural. (c) TC 2, jato de ar. (d) TC 4, jato de ar.

A Figura 79 (a) e Figura 79 (b) apresentam os dados relacionados ao teste 1, realizado na condição de resfriamento por convecção natural. A comparação destaca uma concordância geral entre os padrões de temperatura medidos e simulados. O modelo de EF se mostrou capaz de prever a tendência tanto da temperatura mínima por ciclo quanto das amplitudes de pico a vale. Para o TC 2, o modelo de EF superestima os primeiros picos de temperatura. O motivo desse excesso pode estar relacionado às incertezas inerentes ao posicionamento dos termopares. Isso tem um impacto significativo, uma vez que o TC 2 é o mais próximo da poça de fusão e, durante a deposição da primeira camada, está localizado em uma área de gradiente de temperatura altamente sensível.

A Figura 79 (c) e Figura 79 (d) apresentam os resultados da comparação para o teste 2, com imposição do jato de ar. Como no caso do teste 1, os dados apresentados destacam que o modelo de EF prevê a tendência geral das curvas de temperatura, incluindo o efeito do resfriamento pelo jato de ar. No entanto, o modelo de EF não está perfeitamente de acordo com os dados experimentais com relação à taxa de diminuição da temperatura média por ciclo após a ativação do jato de ar. A razão para isso pode ser uma subestimação dos coeficientes de transferência de calor pelo jato de ar. A correlação de [Goldstein; Franchett, 1988] foi realmente desenvolvida estudando jatos de ar colidindo com uma superfície lisa. As condições de contorno do jato de ar incluem apenas a superfície alvo da parede vertical. No entanto, o fluxo de ar também é desviado na superfície superior do substrato, na qual a transferência de calor por convecção é modelada como convecção livre, pois é difícil quantificar o correto coeficiente de transferência de calor. Isso leva a uma extração de calor mais baixa do que nos experimentos. Além disso, as peças em WAAM apresentam uma leve ondulação na superfície, o que poderia favorecer a turbulência do fluxo e, conseqüentemente, afetar os coeficientes de transferência de calor.

Embora seja difícil quantificar precisamente os coeficientes de transferência de calor, as simulações mostraram uma boa concordância com os dados experimentais em relação às tendências gerais de temperatura dos ciclos térmicos, tornando-os adequados para uma análise do efeito do jato de ar no padrão (tendência) das temperaturas entre camadas depositadas. Um conjunto de pontos de controle foi definido, localizado no ponto central da superfície superior de cada camada depositada. Para cada ponto de controle, os primeiros mínimos locais no histórico do tempo de temperatura foram considerados como a temperatura entre camadas, uma vez que era a mínima temperatura associada ao ponto de controle atual após a deposição da

camada. A Figura 80 apresenta os resultados da comparação de temperatura entre camadas e a localização dos pontos de controle para 120 s de tempo inativo entre depósitos.

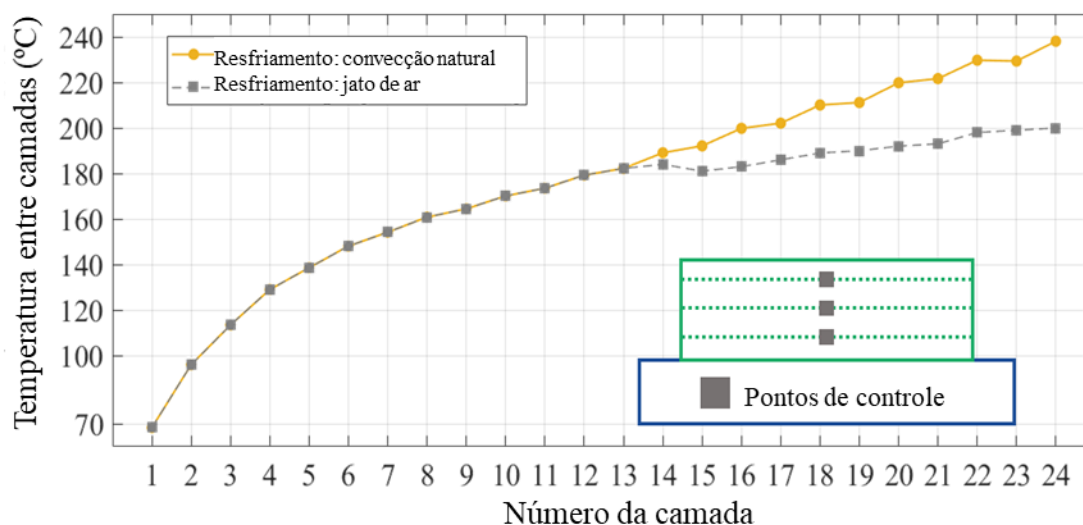


Figura 80 - Comparação da simulação das temperaturas entre camadas para convecção natural e jato de ar com 120 s de inatividade.

Nas duas curvas, a temperatura entre camadas aumenta ao longo do processo de deposição. No entanto, a curva relacionada à simulação do jato de ar mostra uma mudança significativa na inclinação da curva após a ativação do resfriamento com jato de ar. Isso confirma que a redução da temperatura do substrato observada nos dados do termopar indica que o impacto do jato pode limitar o forte aumento da temperatura entre camadas. Além disso, considerando os resultados apresentados na Figura 79 (c) e Figura 79 (d), o efeito do jato pode ser subestimado na simulação de EF. Isso pode resultar em uma diminuição adicional da inclinação da curva de temperatura entre camadas usando jato de ar. Em acordo com [Wu et al., 2019], o potencial de tempo-economia na construção e redução de custos devido ao resfriamento entre passagens foi demonstrado neste trabalho.

A principal perspectiva da pesquisa apresentada é investigar o efeito do jato de ar nas propriedades e microestrutura de materiais sensíveis ao acúmulo de calor, como o Inconel 625. Diferentes tempos de inatividade e parâmetros do jato de ar devem ser testados para avaliar se, sob condições específicas, o resfriamento forçado por jato pode ter um efeito positivo nas propriedades mecânicas do material depositado. Essa otimização pode ter como suporte o modelo em EF, apoiando a seleção de parâmetros do jato de ar e tempos de inatividade que visam atingir temperaturas adequadas entre camadas para uma dada geometria da peça, material e parâmetros do processo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manufatura aditiva via WAAM é viável com a prévia determinação dos parâmetros do processo, modo de transferência do metal, material e extração/transferência de calor do componente durante a deposição. A correção dos parâmetros durante a deposição gera a alteração da geometria do cordão. No caso de multicamadas, esse efeito pode levar a defeitos como falta de fusão entre cordões, acabamento superficial inadequado, ou acúmulo excessivo de calor no componente. Como evidenciado pelos resultados apresentados nesse trabalho, esse último resulta em alterações das propriedades mecânicas, como microestrutura, dureza e resistência à tração. O aporte térmico excessivo no componente também leva ao colapso da poça de fusão e da estabilidade geométrica dos cordões sequencialmente depositados. A literatura destaca que os aspectos térmicos em WAAM são críticos para a viabilidade do processo e podem causar, por exemplo, a não homogeneidade das propriedades mecânicas. Nesse contexto, se realizou a validação da simulação macro de um modelo do processo relacionado a transferência de calor. Com isso, se propôs a possibilidade de prever as regiões com concentração de calor e também servir de base para estratégias de resfriamento.

Inicialmente, uma adequada estratégia de deposição pode aprimorar a troca de calor com o substrato e prévios depósitos. Em um segundo momento, a taxa de troca de calor, principalmente por condução para o substrato e por radiação e convecção com o meio, pode ser ampliada através do uso de jato de ar ou tempos de inatividade entre depósitos a fim de manter o componente com a temperatura de interpasse indicada. O terceiro passo, que também foi objeto da pesquisa desse trabalho, é a otimização da forma de onda de corrente, o qual se insere no contexto de transformações de fases do material devido a mudança no calor transferido e, portanto, em suas propriedades mecânicas.

A estabilidade da poça de fusão depende fortemente da forma de onda da corrente devido à capacidade de modificar a velocidade de transição entre líquido-sólido nos modos PS, sinérgico, convencional, PV, CMT e LSC. A complexidade geométrica do componente, que exige a inclinação da tocha de soldagem ou da mesa no caso de máquinas CNC 5-eixos é sensível à estabilidade de solidificação da poça de fusão em condições inclinadas.

7 CONCLUSÕES

7.1 Geometria do cordão e propriedades mecânicas AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G

Através da análise dos resultados obtidos para a determinação da geometria do cordão para depósitos e propriedades mecânicas devido às variações da forma de onda de corrente para o processo GMAW (pulsado sinérgico, sinérgico, convencional e polaridade variável) aplicados à manufatura aditiva para os eletrodos AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G foi possível delinear as seguintes conclusões:

- A otimização do ângulo do cordão e área do reforço não foi satisfatória através do projeto de experimentos Box Behnken para a faixa de valores escolhidos, os valores medidos não foram semelhantes aos previstos. Porém através da análise direta, visual, dos resultados se pode determinar parâmetros adequados. A abordagem de se realizar duas análises para maior e menor área de reforço, simultâneas, para o mesmo diâmetro de arame mostrou-se ineficiente.
- Não houve variação significativa de dureza para as diferentes regiões (Topo, Meio e Base) ou entre os grupos G1, G2, G3 e G4 considerando a escala de variação, com valor mínimo de 166 HV e máximo de 178 HV. Portanto, apesar das variações da microestrutura, com comportamento oscilatório para as diferentes regiões depositadas, não se observou diferença significativa para a dureza e valores de tensão obtidos pelo ensaio de tração para o eletrodo AWS ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro.
- As amostras retiradas do meio e base do corpo depositado para o ensaio de tração com polaridade variável apresentaram evidentes defeitos na região da fratura. Indicando a elevada sensibilidade desse modo de corrente ao ajuste dos parâmetros e altura dos depósitos pela alteração do DBCP.
- A tensão de escoamento teve incremento na respectiva sequência: topo, meio e base para os três grupos G5, G6 e G7 do eletrodo AWS ER110S-G. Já a tensão máxima apresentou o mesmo comportamento para os três grupos com o incremento no valor de tensão na ordem: meio, topo e base. Ainda, a tensão de ruptura teve outra tendência para o incremento da tensão, que foi o seguinte: meio, base e topo.
- A resistência mecânica dos depósitos obtidos com o eletrodo AWS ER110S-G apresentou a tendência de aumento da resistência à tração na seguinte ordem: sinérgico G6, pulsado sinérgico G5 e polaridade variável G7. Em geral esse padrão se repetiu para tensão de escoamento, tensão máxima e tensão de ruptura. Essa mesma sequência foi a que apresentou

menor deformação no metal base. A ordem das formas de onda com a maior para menor transferência de calor para a peça foi sinérgico, pulsado sinérgico e polaridade variável, respectivamente.

- As médias de dureza para topo, meio e base demonstraram a tendência de aumentar a dureza na respectiva sequência: topo, meio e base. Esse comportamento se apresentou para os modos de transferência Pulsado Sinérgico e Sinérgico com o eletrodo AWS ER110S-G.

7.2 Propriedades mecânicas AISI H13

As conclusões relativas ao efeito dos modos de transferência CMT, LSC e Pulsado Sinérgico nas propriedades mecânicas e ciclos térmicos da liga AISI H13 aplicados a “*Wire Arc Additive Manufacturing*” com base nos resultados experimentais e análises, foram as seguintes:

- A manufatura aditiva via WAAM aplicada a liga de aço AISI H13 se provou viável com diferentes modos de transferência de metal, como CMT, LSC e PS. Todos os modos de transferência geraram depósitos sem defeitos ou descontinuidades.
- Em relação aos parâmetros de potência, os modos LSC e CMT apresentaram valores semelhantes de energia, tensão e corrente de arco (ambos transferidos por Curto-Circuito). O modo PS apresentou o menor nível de energia, baseado em uma maior tensão do arco e menor corrente. Além disso, o modo PS apresentou as temperaturas mais altas nos ciclos térmicos e taxas de resfriamento mais altas, seguidas pelo CMT e LSC, respectivamente.
- Comparando as três formas de onda de corrente estudadas neste trabalho, para os mesmos parâmetros de processo, não se encontrou uma forte diferença nas propriedades mecânicas avaliadas nas amostras finais. Depósitos com maior largura e altura foram observados para o modo CMT. Os resultados para a dureza Knoop apresentaram uma faixa de valores semelhante. Os resultados para o ensaio de tração foram ligeiramente inferiores para o modo CMT. O modo CMT exibiu grãos maiores e equiaxiais, enquanto para o modo PS, grãos mais grosseiros com forma colunar.
- Devido aos elevados aportes térmicos em WAAM, calor em excesso pode ser gerado no componente. A otimização da troca de calor com o substrato e deposições prévias pode ser aprimorada com o modo adequado de transferência de metal e a otimização dos parâmetros do processo.

7.3 Resfriamento com jato de ar versus convecção natural em WAAM

A primeira conclusão desta seção é relativa à análise sobre a eficácia do jato de ar como uma estratégia de resfriamento ativa, versátil e econômica para evitar o acúmulo do calor em depósitos por WAAM. Um caso teste foi fabricado usando diferentes tempos de inatividade entre camadas. Diferentes amostras foram fabricadas usando a tradicional convecção natural e o resfriamento por jato de ar.

- Os dados experimentais confirmaram que o método de resfriamento por jato de ar reduziu as temperaturas do substrato em todas as configurações testadas. Nas condições de teste, ao usar o jato de ar ativo, aumentar o tempo ocioso de 30 s para 120 s não resultou em uma diminuição adicional da temperatura do substrato. No entanto, os testes realizados com o tempo ocioso de 10 s destacaram que, nessa condição, o uso de jato de ar não foi capaz de impedir o aumento de temperatura no substrato, mas apenas reduzir sua magnitude. Isso sugere que, para um determinado processo, tamanho da peça e condições do jato de ar, há um limite para a eficácia do resfriamento a ar.

Nesta etapa do trabalho foi realizada a análise do efeito do jato de ar no aspecto superficial das peças fabricadas por WAAM. Várias amostras de um envelope de teste foram construídas usando resfriamento por convecção natural e por jato de ar, em diferentes condições e tempos de inatividade entre camadas. As diferentes amostras foram comparadas em termos de temperatura do substrato e geometria da superfície. As seguintes conclusões podem ser delineadas:

- Considerando as medidas dos ciclos térmicos, o jato de ar causou uma diminuição da temperatura do substrato, o que é um efeito positivo na prevenção do acúmulo de calor do componente.
- Ao usar o tempo de espera de 10 s, o impacto do jato de ar atenuou, mas não impediu o aumento da temperatura da peça, indicando que sua eficácia em uma configuração específica (ou seja, componente, parâmetros do processo, tempos de espera) está relacionada ao tempo de espera selecionado.
- Os dados de superfície destacaram que o jato de ar causou um aumento da altura da parede depositada entre 0,5 mm e 2,0 mm e uma diminuição da eficiência da deposição em até 10 %, causada por uma maior ondulação da superfície. Essas tendências podem ser consideradas como um efeito do resfriamento por jato de ar. Isso sugere que a investigação deve

ser ampliada para avaliar os parâmetros do jato, permitindo impedir a acumulação de calor e mantendo uma eficiência de deposição elevada.

Finalmente, a eficácia do método por jato de ar foi avaliada usando um método numérico-experimental híbrido, no qual as temperaturas medidas do substrato foram comparadas com os resultados da simulação por EF. Os dados de simulação validados foram então utilizados para extrair a temperatura entre camadas durante o processo de deposição:

- As simulações por EF previram com precisão a tendência geral da temperatura no substrato. A análise dos resultados indicou que a tendência decrescente da temperatura do substrato resultou em um aumento significativamente mais lento da temperatura entre camadas. Isso confirma que o jato de ar pode ser uma abordagem eficaz para controlar a temperatura entre camadas sem um aumento significativo nos tempos de inatividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberti, E. A., Da Silva, L. J., e D'Oliveira, A. S. C. M. Manufatura Aditiva: O papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem e Inspecao**, vol. 19, n. 2, p. 190–198, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1519/0104-9224/SI1902.11>

Ambrogio, G., Gagliardi, F., Muzzupappa, M., e Filice, L. Additive-incremental forming hybrid manufacturing technique to improve customised part performance. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 37, p. 386–391, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.008>

Angelastro, A., Campanelli, S. L., e Casalino, G. Statistical analysis and optimization of direct metal laser deposition of 227-F Colmonoy nickel alloy. **Optics and Laser Technology**, vol. 94, p. 138–145, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.027>

Astarita, A., Campatelli, G., Corigliano, P., e Epasto, G. **Microstructure and mechanical properties of specimens produced using the wire-arc additive manufacturing process**. vol. 0, n. 0, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954406219883324>

AWS. **Welding Handbook - Materials and Applications**. [S. l.]: American Welding Society, 1991. vol. 4E-book.

AWS. **Welding Handbook - Welding Science and Technology**. [S. l.]: American Welding Society, 2001. vol. 1E-book.

AWS. **Welding Handbook- Welding Processes - Part 1**. 9. ed. [S. l.]: American Welding Society, 2004. vol. 2E-book.

Campatelli, G., Montevecchi, F., Venturini, G., Ingarao, G., e Priarone, P. C. Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, vol. 7, p. 1 - 11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00071-y>

Casalino, G., Moradi, M., Moghadam, M. K., Khorram, A., e Perulli, P. Experimental and numerical study of AISI 4130 steel surface hardening by pulsed Nd:YAG laser. **Materials**, vol. 12, n. 19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12193136>

Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T. *et al.* Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 213, n. 10, p. 1782–1791, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012>

Cunningham, C. R., Flynn, J. M.; Shokrani, A., Dhokia, V., e Newman, S. T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, vol. 22, n. June, p. 672–686, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>

Demir, A. G., e Biffi, C. A. Micro laser metal wire deposition of thin-walled Al alloy components: Process and material characterization. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 37, n. October 2018, p. 362–369, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.017>

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., e Li, H. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 31, p. 101–110, 2015 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., e Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1–4, p. 465–481, 2015 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>

Ding, D. **Process planning for robotic wire ARC additive manufacturing**. 2015. - University of Wollongong, Australia, 2015. Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/theses/4613>

Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Almeida, P. M. S. *et al.* Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. **Computational Materials Science**, vol. 50, n. 12, p. 3315–3322, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023>

Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Williams, S., Wang, F. *et al.* A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 70, n. 1–4, p. 227–236, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5261-x>

Dutra, J. C., Silva, R. H. G. e., Marques, C., e Viviani, A. B. A new approach for MIG/MAG

cladding with Inconel 625. **Welding in the World**, vol. 60, n. 6, p. 1201–1209, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0371-3>

Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Dang, X., Huang, K. *et al.* Correlations between microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes. **Materials**, vol. 11, n. 11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11112075>

Fronius International GmbH. **Cold Metal Transfer: The technology**. 2014. <https://www.fronius.com>.

G.P., R., Kamaraj, M., e Bakshi, S. R. Hardfacing of AISI H13 tool steel with Stellite 21 alloy using cold metal transfer welding process. **Surface and Coatings Technology**, vol. 326, p. 63–71, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.050>

Ge, J., Lin, J., Lei, Y., e Fu, H. Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding. **Materials Science and Engineering A**, vol. 715, n. August 2017, p. 144–153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.076>

Ge, J., Ma, T., Chen, Y., Jin, T., Fu, H. *et al.* Wire-arc additive manufacturing H13 part: 3D pore distribution, microstructural evolution, and mechanical performances. **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 783, p. 145–155, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.274>

Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., e Zhang, F. Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 243, p. 40–47, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.027>

Goldstein, R. J., e Franchett, M. E. Heat transfer from a flat surface to an oblique impinging jet. **Journal of Heat Transfer**, vol. 110, n. 1, p. 84–90, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3250477>

Gonzalez, A. R. **Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG / MAG com Corrente Pulsada**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

Gou, J., Shen, J., Hu, S., Tian, Y., e Liang, Y. Microstructure and mechanical properties of as-

built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 42, n. April, p. 41–50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.012>

Guo, J., Zhou, Y., Liu, C., Wu, Q., Chen, X. *et al.* Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: Grain refinement by adjusting pulse frequency. **Materials**, vol. 9, n. 10, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma9100823>

Hackenhaar, W., Mazzaferro, J. A. E., Montevecchi, F., e Campatelli, G. An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 52, n. January, p. 58–65, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.051>

Henckell, P., Günther, K., Ali, Y., Bergmann, J. P., Scholz, J. *et al.* The Influence of Gas Cooling in Context of Wire Arc Additive Manufacturing-A Novel Strategy of Affecting Grain Structure and Size. **TMS 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings**, Cham: Springer International Publishing, p. 147–156, 2017.

Jhavar, S., Jain, N. K., e Paul, C. P. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 214, n. 5, p. 1102–1110, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.016>

Kou, S. **Welding Metallurgy**. John Wiley & Sons, Inc., 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0471434027>

Legesse, F., Kapil, S., Vithasth, H., e Karunakaran, K. P. Additive manufacturing of H13 tooling element with conformal cooling channel using MIG cladding. **International Journal of Rapid Manufacturing**, vol. 7, n. 1, p. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2018.089725>

Lei, Y., Xiong, J., e Li, R. Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 96, n. 1–4, p. 1355–1365, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1699-1>

Levy, G. N., Schindel, R., e Kruth, J. P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. **CIRP Annals -**

Manufacturing Technology, vol. 52, n. 2, p. 589–609, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60206-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6)

Li, F., Chen, S., Shi, J., Zhao, Y., e Tian, H. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. **Applied Sciences** (Switzerland), vol. 8, n. 2, p. 207, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app8020207>

Li, R., Xiong, J., Lei, Y. Investigation on thermal stress evolution induced by wire and arc additive manufacturing for circular thin-walled parts. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, p. 59–67, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.006>

Li, R., Xiong, J., e Lei, Y. Investigation on thermal stress evolution induced by wire and arc additive manufacturing for circular thin-walled parts. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, n. June 2018, p. 59–67, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.006>

Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevicchi, F. *et al.* Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing. **Procedia CIRP**, vol. 62, p. 470–474, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.124>

Lu, X., Zhou, Y. F., Xing, X. L., Shao, L. Y., Yang, Q. X. *et al.* Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 93, n. 5–8, p. 2145–2154, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0636-z>

Lundbäck, A., e Lindgren, L. E. Modelling of metal deposition. **Finite Elements in Analysis and Design**, vol. 47, n. 10, p. 1169–1177, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.05.005>

Marques, P. V., Modenesi, P. J., e Bracarense, A. Q. **Soldagem, fundamentos e tecnologia**. 4. ed., Elsevier, 2017.

Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., e Wang, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 212, n. 6, p. 1377–1386, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>

Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G. *et al.* Tandem metal inert gas

process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. **Additive Manufacturing**, vol. 25, n. July 2018, p. 545–550, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>

MAZAK Corporation. **Hybrid multi-tasking machine INTEGRIX i-400 AM (additive manufacturing)**. <https://www.mazakusa.com/machines/integrix-i-400am/>, 2020, Acesso em: 19-05-2020.

Millon, C., Vanhoye, A., Obaton, A.-F., e Penot, J.-D. Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing. **Welding in the World**, vol. 62, p. 653–661, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0567-9>

Mirkoohi, E., Sievers, D. E., Garmestani, H., Chiang, K., e Liang, S. Y. Three-dimensional semi-elliptical modeling of melt pool geometry considering hatch spacing and time spacing in metal additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 45, n. October 2018, p. 532–543, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.028>

Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., e Campatelli, G. Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process. **Procedia CIRP**, vol. 55, p. 109–114, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.024>

Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., e Campatelli, G. Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing. **Additive Manufacturing**, vol. 18, p. 145–155, 2017 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.010>

Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., e Campatelli, G. Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique. **Additive Manufacturing**, vol. 21, n. April, p. 479–486, 2018 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.007>

Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., e Campatelli, G. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement. **Manufacturing Letters**, vol. 17, p. 14–18, 2018 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.06.004>

Montevecchi, F., Scippa, A., e Campatelli, G. Analysis of air jet impingement cooling applied to wire arc additive manufacturing process. **XIII Convegno dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica**, p. 11–13, 2017 b.

Montgomery, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

Moradi, M., e Golchin, E. Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization. **Latin American Journal of Solids and Structures**, vol. 14, n. 3, p. 464–484, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1679-78253247>

Moradi, M., Meiabadi, S., e Kaplan, A. 3D Printed Parts with Honeycomb Internal Pattern by Fused Deposition Modelling; Experimental Characterization and Production Optimization. **Metals and Materials International**, vol. 25, n. 5, p. 1312–1325, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00272-9>

Mueller, D. H., e Mueller, H. **Experiences using rapid prototyping techniques to manufacture sheet metal forming tools**. ISATA, p. 1 - 9, Dublin, 2000.

Mughal, M. P., Fawad, H., Mufti, R. A., e Siddique, M. Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: Effect of process parameters. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, vol. 13, n. 7, p. 1187–1204, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0965-0393/13/7/013>

Näsström, J., Brueckner, F., e Kaplan, A. F. H. Laser enhancement of wire arc additive manufacturing. **Journal of Laser Applications**, vol. 31, n. 2, p. 022307, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2351/1.5096111>

Norrish, J., e Cuiuri, D. The controlled short circuit GMAW process: A tutorial. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 16, n. 1, p. 86–92, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.08.006>

O'Donovan, T. S., e Murray, D. B. Jet impingement heat transfer - Part I: Mean and root-mean-square heat transfer and velocity distributions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 50, n. 17–18, p. 3291–3301, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.044>

Oliari, S. H., Sofia, A., Monteiro, C., e Schulz, M. Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition. **Soldagem e Inspeção**, vol. 22, n. 4, p. 1–14, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2204.06>

Ou, W., Mukherjee, T., Knapp, G. L., Wei, Y., e DebRoy, T. Fusion zone geometries, cooling

rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 127, p. 1084–1094, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.111>

Petch, M. **3D PRINTING COMMUNITY RESPONDS TO COVID-19 AND CORONAVIRUS RESOURCES.** <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-community-responds-to-covid-19-and-coronavirus-resources-169143/>, 2020, Acesso em: 19-05-2020.

Posch, G., Chladil, K., e Chladil, H. Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries. **Welding in the World**, vol. 61, n. 5, p. 873–882, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0474-5>

Prado-Cerqueira, J. L., Camacho, A. M., Diéguez, J. L., Rodríguez-Prieto, Á., Aragón, A. M. *et al.* Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Materials**, vol. 11, n. 8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11081449>

Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., e Camacho, A. M. Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM). **Procedia Manufacturing**, vol. 13, p. 895–902, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.154>

Qi, Z., Qi, B., Cong, B., Sun, H., Zhao, G. *et al.* Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy components: As-deposited and post heat-treated. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, p. 27–36, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.003>

Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., e Hascoët, J. Y. Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. **Welding in the World**, vol. 62, n. 2, p. 259–266, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0536-8>

Rajeev, G. P., Kamaraj, M., e Bakshi, S. R. Effect of correction parameters on deposition characteristics in cold metal transfer welding. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 0, n. 0, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1628260>

RAMLAB. **World's first class approved 3D printed ship's propeller.** <https://ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/>, 2017, Acesso em: 21-05-2020.

Reddy, S., Kumar, M., Panchagnula, J. S., Parchuri, P. K., Kumar, S. S. *et al.* A new approach for attaining uniform properties in build direction in additive manufactured components through coupled thermal-hardness model. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, p. 46–58, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.007>

Reddy, S., Kumar, M., Panchagnula, J. S., Parchuri, P. K., Kumar, S. S. *et al.* A new approach for attaining uniform properties in build direction in additive manufactured components through coupled thermal-hardness model. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 40, n. August 2018, p. 46–58, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.03.007>

Ren, L., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Li, C. *et al.* Effect of Mg Content on Microstructure and Properties of Al–Mg Alloy Produced by the Wire Arc Additive Manufacturing Method. **Materials**, vol. 12, n. 24, p. 4160, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12244160>

Ríos, S., Colegrove, P. A., Martina, F., e Williams, S. W. Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, vol. 21, n. April, p. 651–657, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.003>

Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M. *et al.* Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. **Additive Manufacturing**, vol. 27, n. February, p. 440–450, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.029>

Scotti, A., e Ponomarev, V. **Soldagem MIG /MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

Shassere, B., Nycz, A., Noakes, M. W., Masuo, C., e Sridharan, N. Correlation of microstructure and mechanical properties of Metal Big Area Additive Manufacturing. **Applied Sciences** (Switzerland), vol. 9, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9040787>

Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Ding, D., e Li, H. Influences of deposition current and interpass temperature to the Fe₃Al-based iron aluminide fabricated using wire-arc additive manufacturing process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 88, n. 5–8, p. 2009–2018, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8935-3>

Somashekara, M. A., e Suryakumar, S. Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, vol.

70, n. 8, p. 2123–2135, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12666-016-1032-3>

Sridhar, M. R., e Yovanovich, M. M. Thermal contact conductance of tool steel and comparison with model. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 39, n. 4, p. 831–839, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00141-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00141-7)

Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Chandrasekhar, U., e Somashekara, M. A. A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, vol. 227, n. 8, p. 1138–1147, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954405413482122>

Syed, W. U. H., Pinkerton, A. J., e Li, L. A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping. **Applied Surface Science**, vol. 247, n. 1–4, p. 268–276, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.01.138>

Takagi, H., Abe, T., Cui, P., e Sasahara, H. Mechanical properties evaluation of metal components repaired by direct metal lamination. **Key Engineering Materials**, vol. 656–657, p. 440–445, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.656-657.440>

Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., e Campatelli, G. Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features. **Procedia CIRP**, vol. 55, p. 95–100, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.043>

Venturini, G., Montevecchi, F., Bandini, F., Scippa, A., e Campatelli, G. Feature based three axes computer aided manufacturing software for wire arc additive manufacturing dedicated to thin walled components. **Additive Manufacturing**, vol. 22, n. May, p. 643–657, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.013>

Wang, J. F., Sun, Q. J., Wang, H., Liu, J. P., e Feng, J. C. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. **Materials Science and Engineering A**, vol. 676, n. October 2017, p. 395–405, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.015>

Wang, S., Gu, H., Wang, W., Li, C., Ren, L. *et al.* Study on Microstructural and Mechanical Properties of an Al–Cu–Sn Alloy Wall Deposited by Double-Wire Arc Additive Manufacturing Process. **Materials**, vol. 13, n. 1, p. 73, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13010073>

Wang, X., Wang, J., Gao, Z., Xia, D. H., e Hu, W. Fabrication of graded surfacing layer for the repair of failed H13 mandrel using submerged arc welding technology. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 262, n. June, p. 182–188, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.040>

Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G. *et al.* Wire + Arc Additive Manufacturing. **Materials Science and Technology**, vol. 32, n. 7, p. 641–647, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>

Wohlers, T., Kowen, J., Diegel, O., e Campbell, I. **Wohlers Report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: Annual Worldwide Progress Report**. Disponível em: <https://wohlersassociates.com/2018report.htm>.

Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. *et al.* Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 250, n. December 2016, p. 304–312, 2017 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H. *et al.* A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 35, p. 127 - 139, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H. *et al.* The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 258, n. March, p. 97–105, 2018 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024>

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., e Li, H. Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, vol. 23, p. 151–160, 2018 c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.004>

Wu, B., Pan, Z., Chen, G., Ding, D., Yuan, L. *et al.* Mitigation of thermal distortion in wire arc additively manufactured Ti6Al4V part using active interpass cooling. **Science and Technology of Welding and Joining**, vol. 24, n. 5, p. 484–494, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1580439>

Wu, Q., Ma, Z., Chen, G., Liu, C., Ma, D. *et al.* Obtaining fine microstructure and unsupported overhangs by low heat input pulse arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, vol. 27, p. 198–206, 2017 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.004>

Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Fan, H., Shi, X. *et al.* Effect of molten pool size on microstructure and tensile properties of wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. **Materials**, vol. 10, n. 7, p. 1–11, 2017 c. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma10070749>

Xiong, J., Li, Y., Li, R., e Yin, Z. Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 252, n. July 2017, p. 128–136, 2018 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>

Xiong, J., Li, R., Lei, Y., e Chen, H. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 251, n. April 2017, p. 12–19, 2018 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.007>

Xiong, J., Lei, Y., e Li, R. Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures. **Applied Thermal Engineering**, vol. 126, p. 43–52, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.168>

Xu, X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 92, n. 5–8, p. 1893–1900, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0300-7>

Yang, Q., Xia, C., Deng, Y., Li, X., e Wang, H. Microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg0.6 aluminum alloy fabricated by wire and arc additive manufacturing based on cold metal transfer (WAAM-CMT). **Materials**, vol. 12, n. 16, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12162525>

Youheng, F., Guilan, W., Haiou, Z., e Liye, L. Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 91, n. 1–4, p. 301–313, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9621-1>

Zhang, Y., Chen, Y., Li, P., e Male, A. T. Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 135, n. 2–3, p. 347–357, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00867-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00867-1)

Zhao, X., Iyer, A., Promoppatum, P., e Yao, S. C. Numerical modeling of the thermal behavior and residual stress in the direct metal laser sintering process of titanium alloy products. **Additive Manufacturing**, vol. 14, p. 126–136, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.10.005>

APÊNDICE A – Testes Preliminares AWS ER70S-6

Resultado dos testes preliminares variando um parâmetro por ensaio e mantendo os demais fixos para o modo pulsado sinérgico - AWS ER70S-6 0,8 mm.

A.1 Tabela Avaliação de descontinuidades variando 1 parâmetro ao mesmo tempo

W (m/min)	Descontinuidades	DBCP (mm)	Descontinuidades	v (mm/s)	Descontinuidades
5,5 m/min	Sim	10	Sim	1	Sim
6,0 m/min	Não	12	Sim	2	Não
6,5 m/min	Não	16	Não	4	Não
7,0 m/min	Não	18	Não	6	Não
7,5 m/min	Não	20	Não	8	Não
8,0 m/min	Sim	22	Sim	10	Não

A.2 Tabela Análise de variância. Área do reforço, pulsado sinérgico. AWS ER70S-6 0,8 mm

Parâmetros	F _{calculado}		F _{tabelado}	p _{calculado}		p _{tabelado}	Significância
W	0,11	<	5,99	0,75	>	0,05	Não Significativo
v	32,32	>	5,99	0,00	<	0,05	Significativo
DBCP	0,07	<	5,99	0,79	>	0,05	Não Significativo
W ²	3,24	<	5,99	0,13	>	0,05	Não Significativo
v ²	908,24	>>	5,99	0,00	<	0,05	Significativo
DBCP ²	1,74	<	5,99	0,24	>	0,05	Não Significativo
W * v	20,33	>	5,99	0,00	<	0,05	Significativo
W * DBCP	1,82	<	5,99	0,24	>	0,05	Não Significativo
v * DBCP	12,08	>	5,99	0,02	<	0,05	Significativo

A.3 Tabela Análise de variância. Média do ângulo de inclinação do cordão. Pulsado sinérgico

Parâmetros	F _{calculado}		F _{tabelado}	p _{calculado}		p _{tabelado}	Significância
W	504,86	>	5,99	0,94	>	0,05	Não Significativo
ν	7021,13	>>	5,99	0,04	<	0,05	Significativo
DBCP	1,12	<	5,99	0,52	>	0,05	Não Significativo
W ²	15,95	>	5,99	0,84	>	0,05	Não Significativo
ν^2	752,20	>>	5,99	0,03	<	0,05	Significativo
DBCP ²	2,31	<	5,99	0,87	>	0,05	Não Significativo
W * ν	1,40	<	5,99	0,90	>	0,05	Não Significativo
W * DBCP	56,37	>	5,99	0,43	>	0,05	Não Significativo
ν * DBCP	342,25	>>	5,99	0,09	<	0,05	Não Significativo

APÊNDICE B – Dureza HV G1 - G6

Valores medidos de dureza HV para os grupos depositados. Carga de 300 gf pelo tempo de 10 s.

B.1 Dureza G1 e G2

AWS ER70S-6 0,8 mm HV	G1 – Pulsado Sinérgico 2- 4			G2 - Pulsado Sinérgico 4 - 6		
	W=7,5 v=3 DBCP=20			W=7,5 v=4 DBCP=18		
	Topo G1-1	Meio G1-2	Base G1-3	Topo G2-1	Meio G2-2	Base G2-3
1	195	178,6	179,5	163,6	175,8	171,2
2	202,5	166,4	171,9	164,2	167,6	166,8
3	188,4	169,6	171,9	164,5	168,7	168,4
4	191,4	168,2	166,3	175,9	170,4	162,0
5	188	170,4	164,6	168,7	173,1	163,9
6	175,8	173,6	169,6	169,5	169,8	172,1
7	178,4	172,6	174,5	172,2	160,3	179,2
8	171,9	173,8	167,0	167,7	172,9	176,6
9	170,4	165,8	170,3	172,5	176,1	169,0
10	177,8	164,9	172,9	177,6	170,6	168,9
11	169,6	171,8	169,1	164,4	176,2	167,8
12	169,7	170,5	171,6	169,4	170,3	165,8
13	178	171,6	173,9	175,4	177,2	174,9
14	183,6	173,6	170,1	172,8	170,5	168,5
15	178,2	169,2	168,0	178,2	172,9	173,1
16	167,6	175,0	170,5	189,8	167,8	178,6
17	178,2	175,8	168,0	206,3	173,8	178,2
18	172,2	167,6	172,3	196,8	172,2	170,4
19	168,8	176,9	177,0	196,8	178,8	182,8
20	175,3	173,2	174,9	196,3	189,5	179,0

B.2 Dureza G3 e G4

AWS ER70S-6 0,8 mm HV	G3 - Sinérgico 2 - 4			G4 - Convencional 4 - 6		
	W=7,5 v=3 DBCP=20			W=7,5 v=4 DBCP=18		
	Topo G3-1	Meio G3-2	Base G3-3	Topo G4-1	Meio G4-2	Base G4-3
1	169,5	175,6	175,6	168,6	169,8	169,9
2	168,1	167,9	165,7	170,5	164,5	174,2
3	169,8	173,6	174,6	162,7	172,2	177,9
4	175,9	173,6	178,3	163,4	160,3	187,2
5	170,6	166,3	166,1	164,3	163,7	179,4
6	182,3	173,0	175,9	156,8	172,2	176,6
7	181,9	173,3	173,0	173,8	165,4	173,2
8	173,5	173,4	160,1	165,0	167,1	172,2
9	167,3	172,7	160,9	159,8	160,0	178,5
10	171,7	161,6	164,7	159,5	176,2	166,8
11	178,3	179,0	170,4	162,3	165,9	162,9
12	172,7	170,1	168,9	167,8	169,2	167,7
13	173,9	171,3	174,3	170,5	160,9	176,0
14	174,2	179,0	172,9	173,0	159,6	173,9
15	171,6	185,9	175,4	164,4	164,8	166,3
16	173,1	166,9	174,1	183,2	161,4	176,1
17	178,9	173,8	181,1	188,1	168,0	175,2
18	188,3	177,7	173,6	191,3	166,1	176,8
19	199,4	172,9	170,4	192,6	165,3	174,6
20	199,0	181,1	179,3	217,1	171,4	175,9

B.3 Dureza G5 e G6

	DUREZA (HV) - AWS ER110S-G 1,0 mm					
	G5 Pulsado Sinérgico			G6 Sinérgico		
	Topo G5-1	Meio G5-2	Base G5-3	Topo G6-1	Meio G6-2	Base G6-3
1	235,8	247,4	259,9	247,6	256,8	279,0
2	239,5	251,7	271,5	240,2	254,6	269,3
3	251,8	270,6	283,6	258,8	266,6	264,3
4	261,9	269,3	283,3	264,0	269,0	268,2
5	252,2	256,0	279,0	268,7	257,2	274,1
6	247,7	256,4	267,0	264,6	267,2	255,6
7	277,1	275,7	285,7	247,0	267,5	264,9
8	265,7	261,4	272,7	263,6	258,6	277,0
9	261,4	249,0	277,0	265,9	257,5	254,1
10	250,7	260,7	267,5	257,6	256,7	261,0
11	249,5	269,6	287,3	250,5	285,2	272,5
12	273,8	264,4	280,9	251,1	271,2	310,7
13	259,3	254,4	273,6	260,0	260,0	285,5
14	251,8	259,2	282,8	258,1	261,4	276,4
15	265,6	269,3	296,7	245,4	283,9	289,1
16	256,7	262,6	282,8	265,7	273,9	283,4
17	257,5	260,3	296,7	262,1	250,9	264,0
18	247,6	268,7	291,3	242,3	259,5	284,4
19	253,8	281,8	312,7	242,9	273,3	291,6
20	255,3	272,4	300,6	260,2	262,9	296,3
Média	255	262	283	258	262	275

APÊNDICE C – Otimização de Parâmetros

C.1 Tabela 1º otimização. Maximizar a área do reforço e inclinação do cordão de 90º

Geometria desejada	Tipo de Otimização	Valor mínimo	Valor Alvo	Valor Máximo	Peso	Importância
Ângulo do Reforço	Valor Exato	80	90	110	1	1
Área do Reforço	Maximizar	20	28	28	1	1
Velocidade do Arame (otimizada)			6,045 m/min			
Velocidade de deslocamento da tocha (otimizada)			2 mm/s			
DBCP (otimizado)			19,99 mm			
Respostas		Valor Previsto	Função “Desirability”	“Composite Desirability”		
Ângulo do Reforço		90,029º	0,9985	0,7377		
Área do Reforço		24,36 mm ²	0,5450			

C.2 Tabela 2º otimização. Obter menor área do cordão e ângulo do cordão de 90º

Geometria desejada	Tipo de Otimização	Valor mínimo	Valor Alvo	Valor Máximo	Peso	Importância
Ângulo do Reforço	Valor Exato	80	90	110	1	1
Área do Reforço	Minimizar	10	10	28	1	1
Velocidade do Arame (otimizada)			7,4687 m/min			
Velocidade de deslocamento da tocha (otimizada)			4,2626 mm/s			
DBCP (otimizado)			17,4949 mm			
Respostas		Valor Previsto	Função “Desirability”	“Composite Desirability”		
Ângulo do Reforço		89,9983º	0,9998	0,8090		
Área do Reforço		16,22 mm ²	0,6546			

C.3 Tabela 3^o otimização. Obter menor área do cordão e ângulo de 90°

Geometria desejada	Tipo de Otimização	Valor mínimo	Valor Alvo	Valor Máximo	Peso	Importância
Ângulo do Reforço	Minimizar	90	-	140	1	1
Área do Reforço	Minimizar	10	-	28	1	1
Velocidade do Arame (otimizada)			6,1515 m/min			
Velocidade de deslocamento da tocha (otimizada)			3,7778 mm/s			
DBCP (otimizado)			16 mm			
Respostas		Valor Previsto	Função “ <i>Desirability</i> ”		“ <i>Composite Desirability</i> ”	
CCÂngulo do Reforço		90,0222°	0,9995		0,8802	
Área do Reforço		14,047 mm ²	0,77516			

C.4 Tabela 4^o otimização. Menor área e ângulo de 90°. Peso e importância variados

Geometria desejada	Tipo de Otimização	Valor mínimo	Valor Alvo	Valor Máximo	Peso	Importância
Ângulo do Reforço	Valor Exato	-	90	-	1	1
Área do Reforço	Valor Exato	-	10	-	2	2
Velocidade do Arame (otimizada)			6,0 m/min			
Velocidade de deslocamento da tocha (otimizada)			4,82828 mm/s			
DBCP (otimizado)			16 mm			
Respostas		Valor Previsto	Função “ <i>Desirability</i> ”		“ <i>Composite Desirability</i> ”	
Ângulo do Reforço		104,553°	0,7089		0,8845	
Área do Reforço		10,108 mm ²	0,9880			

APÊNDICE D – Resultados Ensaio de Tração

Resultados de tensão e deformação obtidos no ensaio de tração para ambos os eletrodos.

D.1 Resultados de tensão e deformação. Eletrodo ER70S-G

AWS ER70S-6: Médias Tensão vs Deformação: Topo, Meio e Base	G1 Pulsado Sinérgico	G2 Pulsado Sinérgico	G3 Sinérgico	G4 Convencional
Tensão de Escoamento (MPa)	297	394	394	398
Deformação de escoamento (%)	0,8	0,6	0,7	0,6
Tensão Máxima (MPa)	490	531	537	535
Deformação Tensão Máxima (MPa)	7,5	7,0	8,0	7,0
Tensão de Ruptura (MPa)	263	320	132	339
Deformação Ruptura (%)	11,3	11,3	11,2	10,8
Energia = P/v (J/mm)	691	500	673	489
Média Dureza (HV)	172	173	173	168

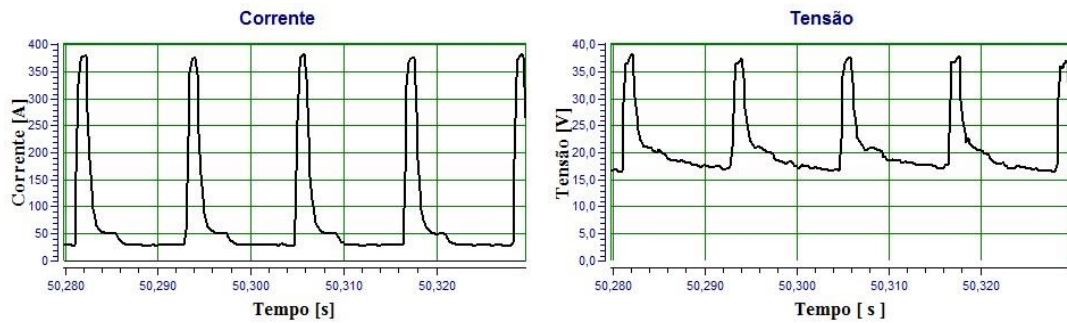
D.2 Resultados de tensão e deformação. Eletrodo AWS ER110S-G

AWS ER110S-G: Médias Tensão vs Deformação: Topo, Meio e Base	G5 Pulsado Sinérgico	G6 Sinérgico	G7 Polaridade Variável
Tensão de Escoamento (MPa)	704	674	698
Deformação de escoamento (%)	1,6	1,5	1,7
Tensão Máxima (MPa)	805	784	835
Deformação Tensão Máxima (MPa)	5,1	5,6	5,6
Tensão de Ruptura (MPa)	523	501	569
Deformação Ruptura (%)	8,6	8,6	8,2
Energia = P/v (J/mm)	661	656	560
Média Dureza (HV)	267	265	

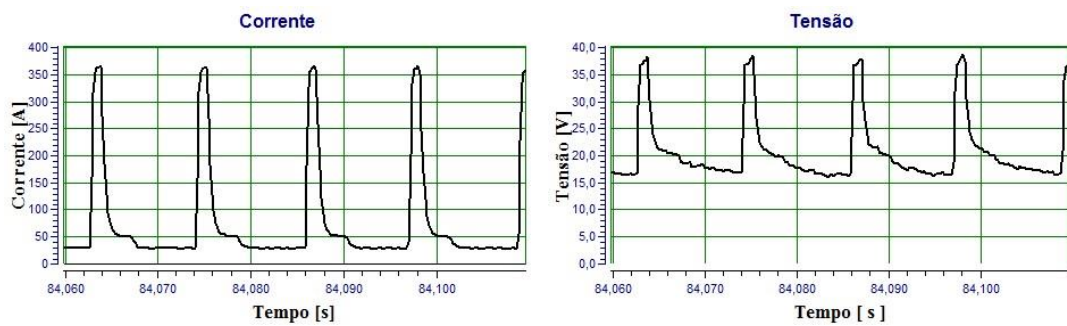
APÊNDICE E – Oscilogramas de Corrente e Tensão do Arco

Oscilogramas ilustrativos de tensão e corrente para os depósitos.

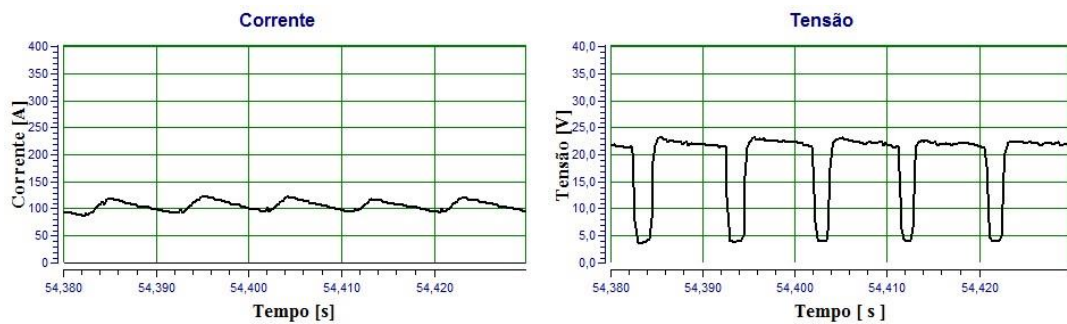
E.1 Pulsado Sinérgico - G1. $W = 7,5$ m/min; $v = 3$ mm/s; DBCP = 20 mm. Depósito 01



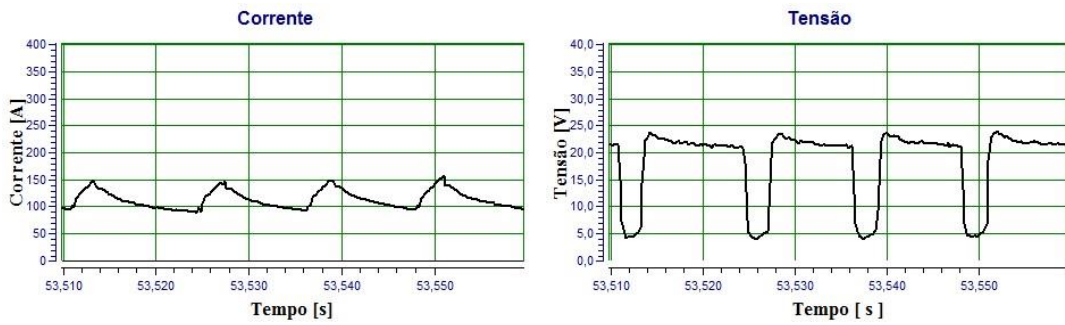
E.2 Pulsado Sinérgico - G2. $W = 7,5$ m/min; $v = 4$ mm/s; DBCP = 18 mm. Depósito 01



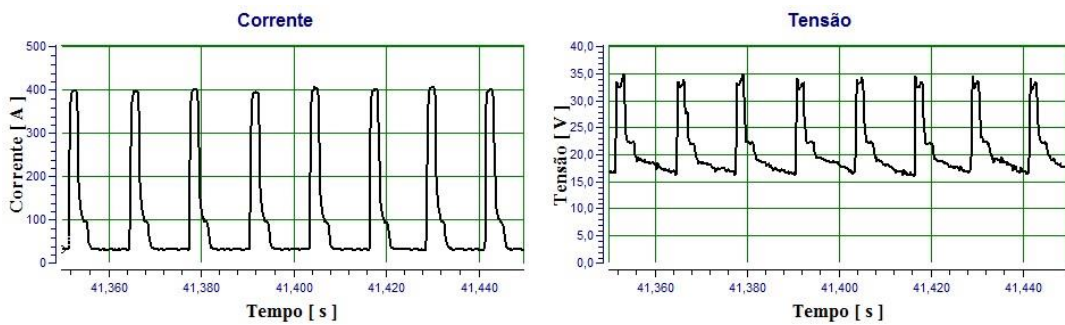
E.3 Sinérgico - G3. $W = 7,5$ m/min; $v = 3$ mm/s; DBCP = 20 mm Depósito 01



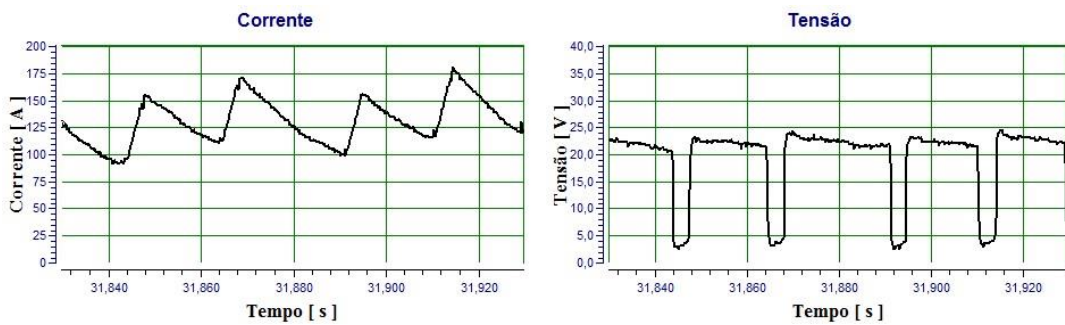
E.4 Conventional-G4. $W=7,5$ m/min; $v = 4$ mm/s; DBCP=18 mm Depósito 01



E.5 Oscilogramas de corrente e tensão. Pulsado Sinérgico G5. AWS ER110S-G



E.6 Oscilogramas de corrente e tensão. Sinérgico G6. AWS ER110S-G

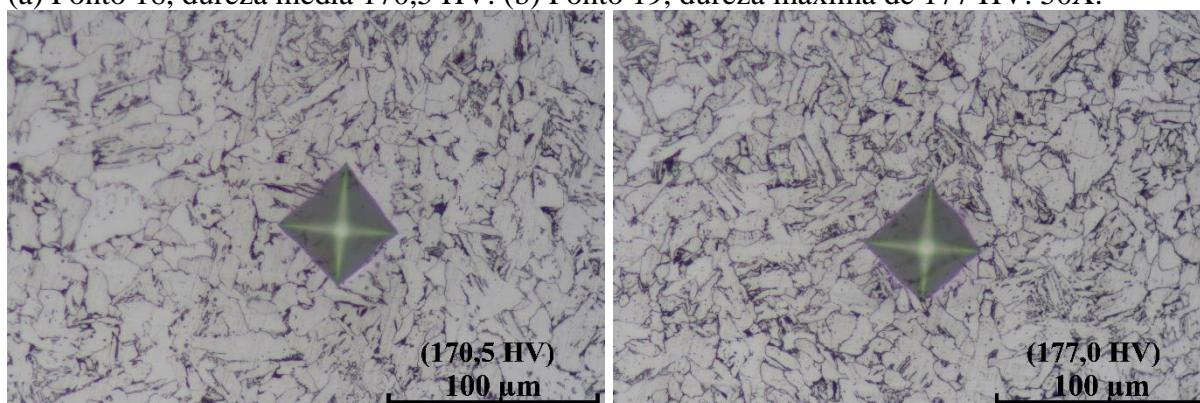


APÊNDICE F - Microestruturas

Exemplos de microestruturas com os respectivos valores de dureza.

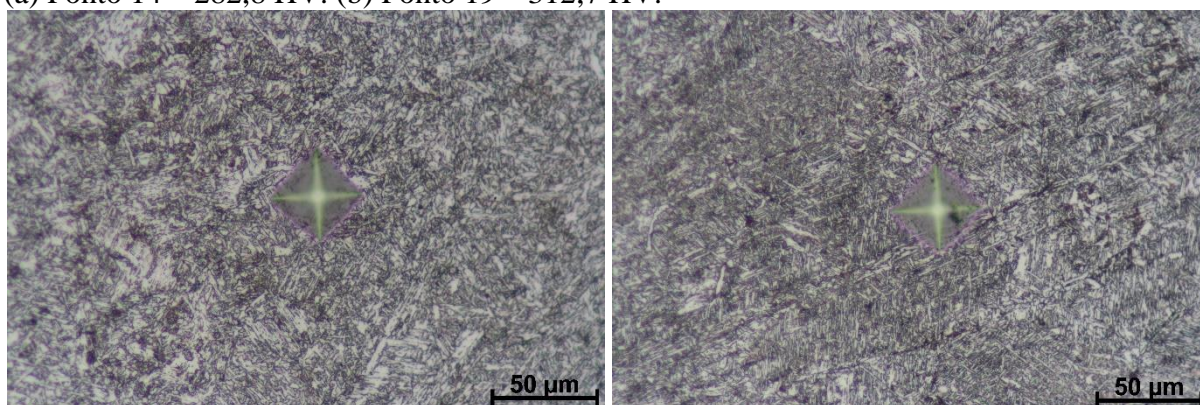
F.1 Microestrutura para o eletrodo AWS ER70S-6 na região da Base G1 Pulsado Sinérgico

(a) Ponto 16, dureza média 170,5 HV. (b) Ponto 19, dureza máxima de 177 HV. 50X.



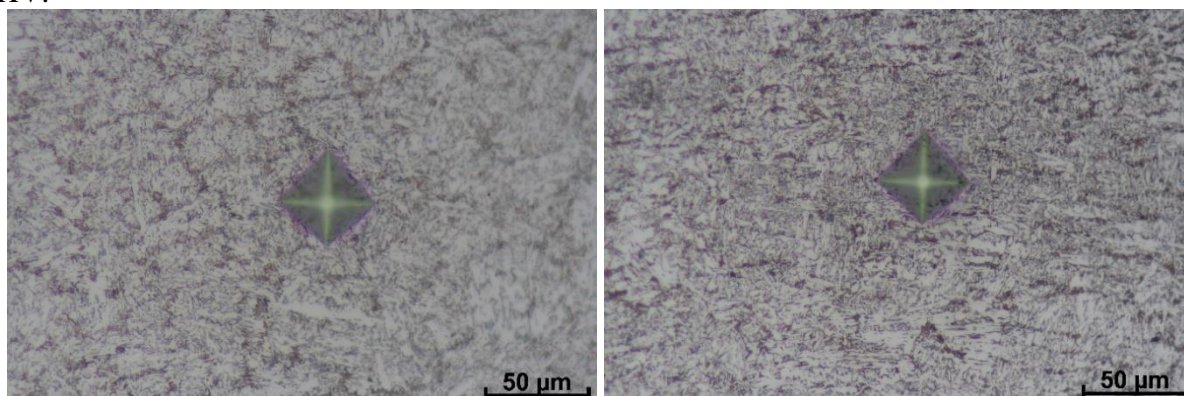
F.2 Microestruturas com 50X para a Base III G5 Pulsado Sinérgico

(a) Ponto 14 – 282,8 HV. (b) Ponto 19 – 312,7 HV.



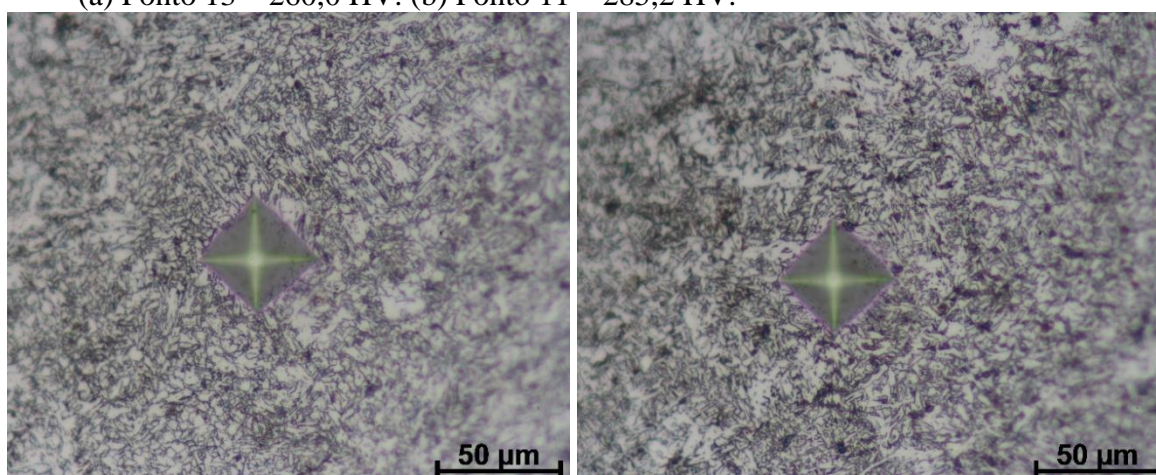
F.3 Microestruturas com 50X para o Meio II G5 Pulsado Sinérgico

(a) Valor médio de dureza Ponto 10 – 260,7 HV. (b) Valor máximo de dureza Ponto 19 – 281,8 HV.



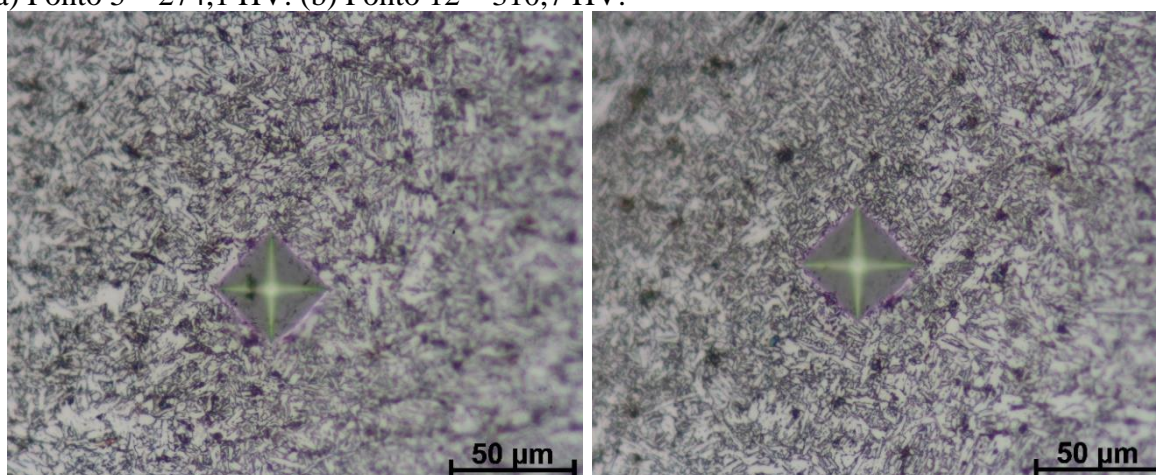
F.4 Microestruturas com 50X para o Meio II G6 Sinérgico

(a) Ponto 13 – 260,0 HV. (b) Ponto 11 – 285,2 HV.



F.5 Microestruturas com 50X para o Base III G6 Sinérgico

(a) Ponto 5 – 274,1 HV. (b) Ponto 12 – 310,7 HV.



APÊNDICE G – Corpos de Prova Ensaio de Tração

Corpos de prova após o ensaio de tração com a macrografia das amostras retiradas de cada região da amostra para a medida da dureza HV.

G.1 Corpos de prova G3

(a) Corpos de prova após o ensaio de tração. G3-1 Topo; G3-2 Meio; G3-3 Base. Convencional, AWS ER70S-6. (b) Amostras para ensaio de microdureza (HV). G3-3 Base, G3-2 Meio e G3-1 Topo, respectivamente.



G.2 Corpos de prova G4

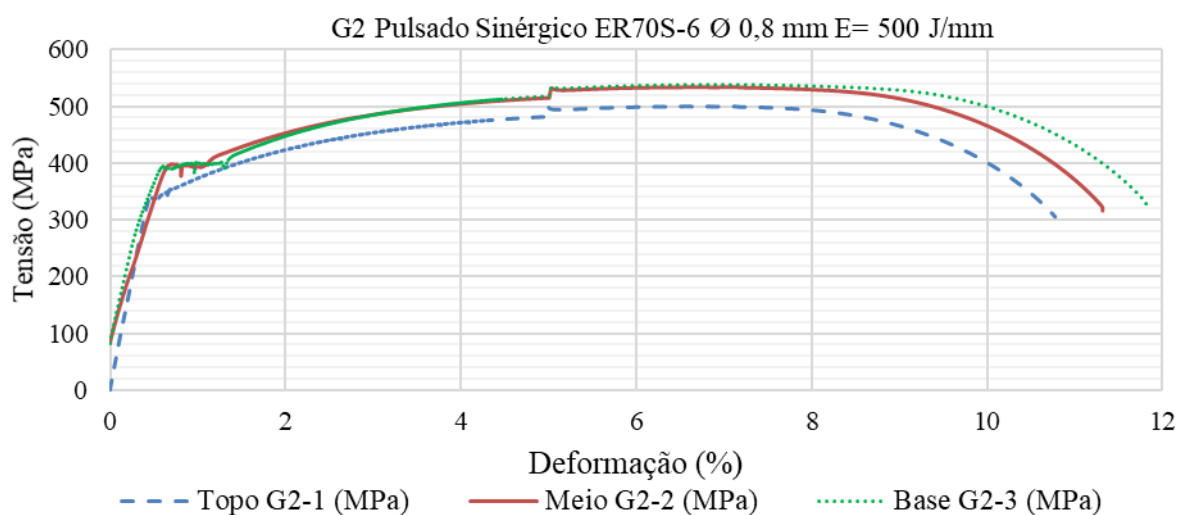
(a) Corpos de prova após o ensaio de tração. G4-1 Topo; G4-2 Meio; G4-3 Base. Convencional, AWS ER70S-6. (b) Amostras perfil de dureza HV. G4-3 Base, G4-2 Meio e G4-1 Topo, respectivamente.



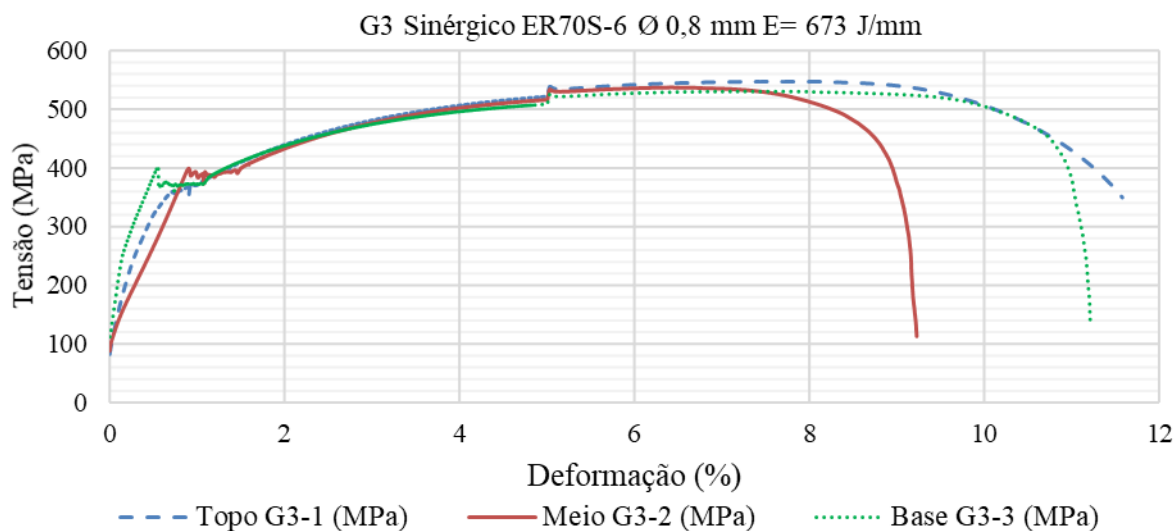
APÊNDICE H – Gráficos de Tensão – Deformação AWS ER70S-6 e AWS ER110S-G

Gráficos de tensão versus deformação.

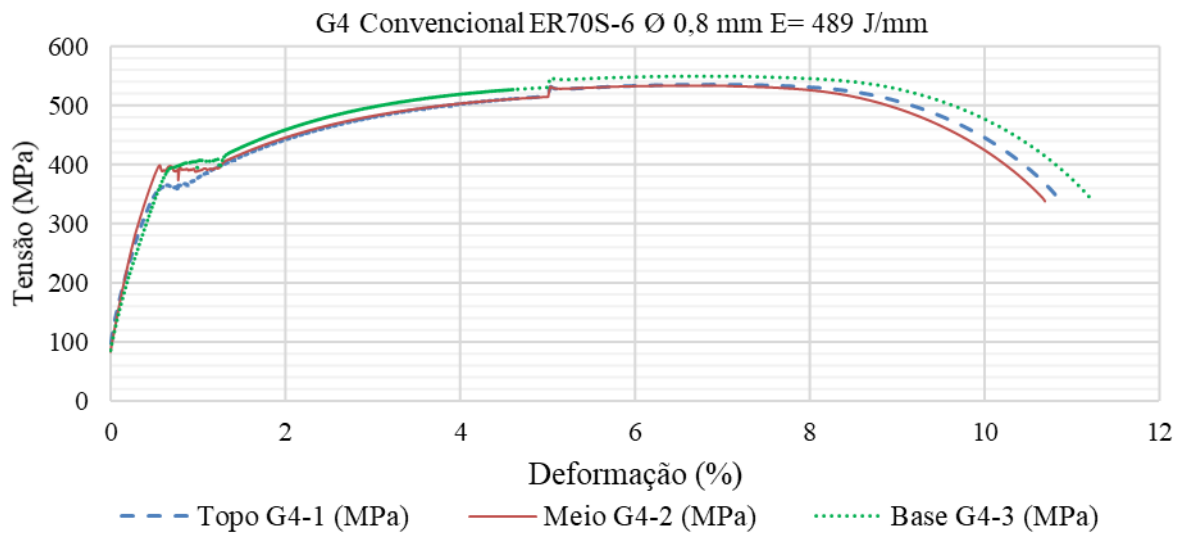
H.1 Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G2 Pulsado Sinérgico



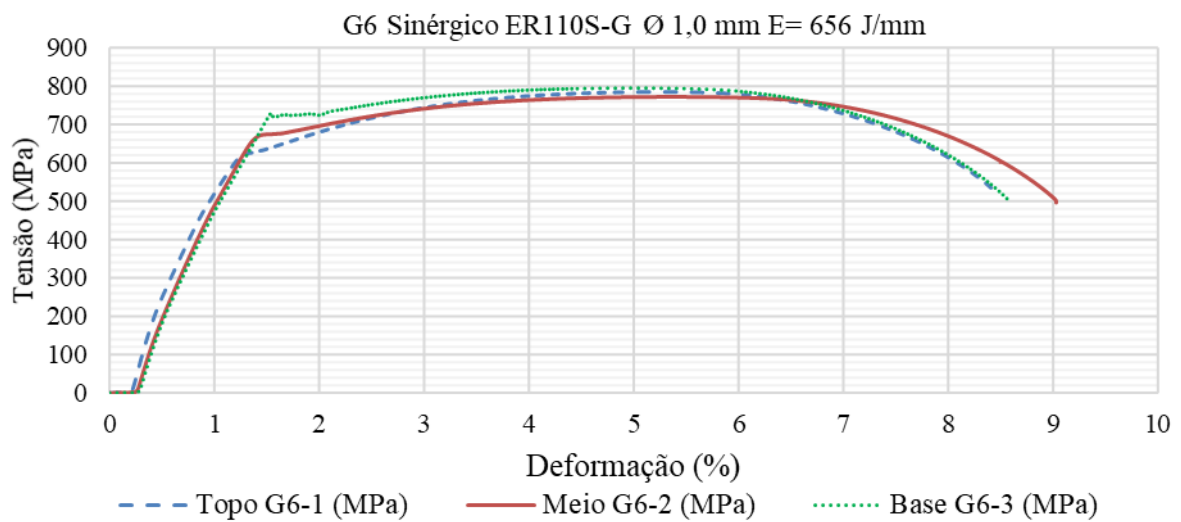
H.2 Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G3 Sinérgico



H.3 Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER70S-6. G4 Convencional



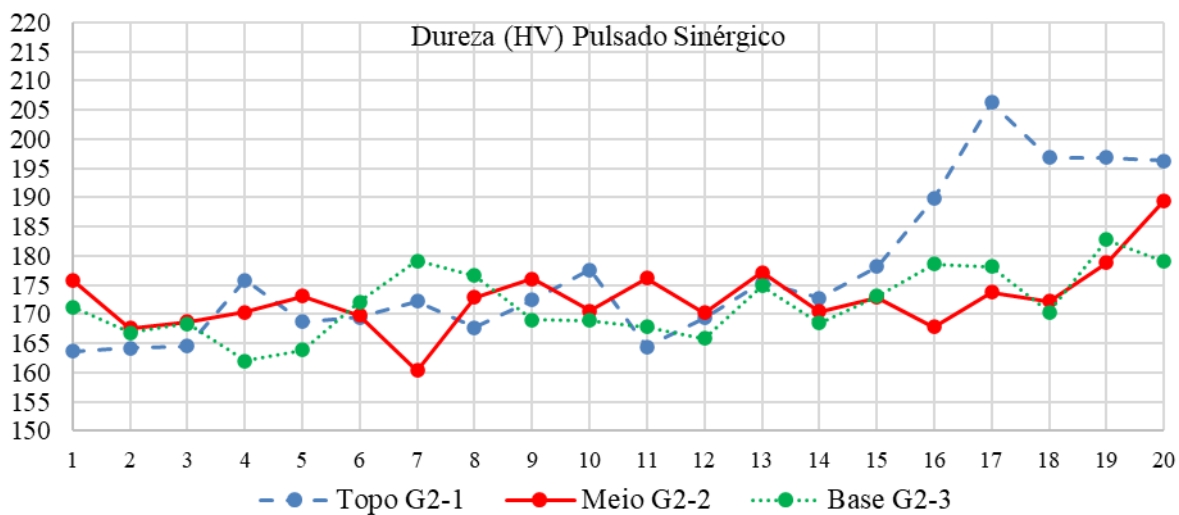
H.4 Gráfico Tensão vs Deformação. Eletrodo AWS ER110S-G. G6 Sinérgico



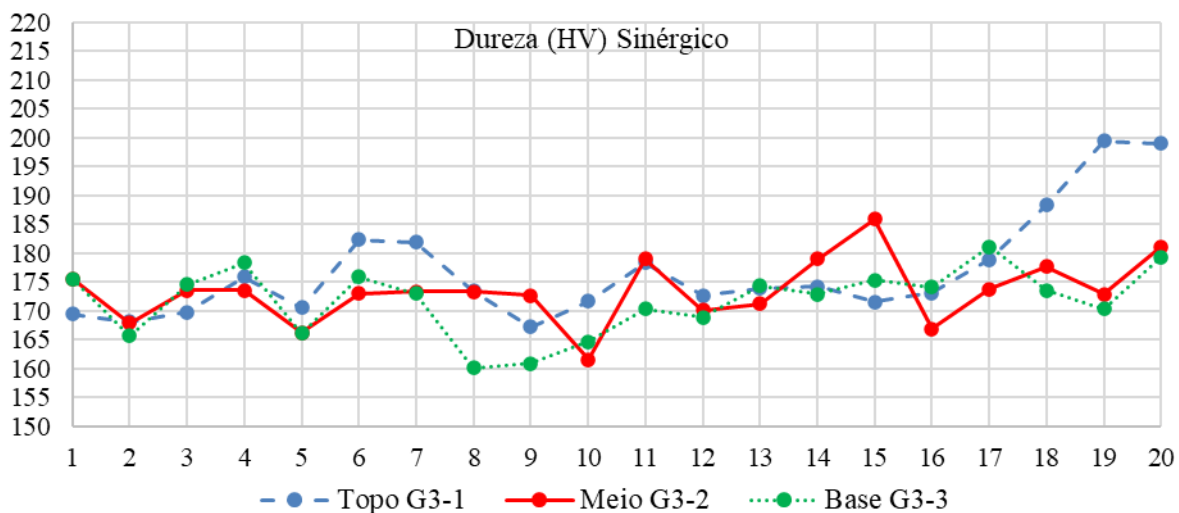
APÊNDICE I – Variação da Microdureza HV

Gráficos com a variação da microdureza HV ao longo da seção das amostras.

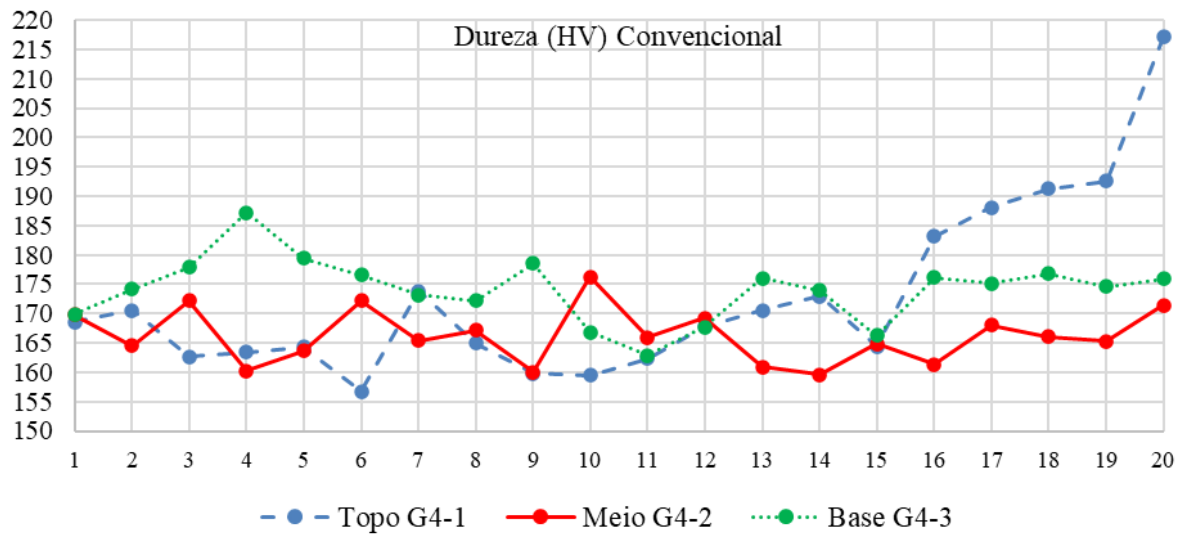
I.1 Variação da microdureza (HV). G2 Pulsado Sinérgico. AWS ER70S-6



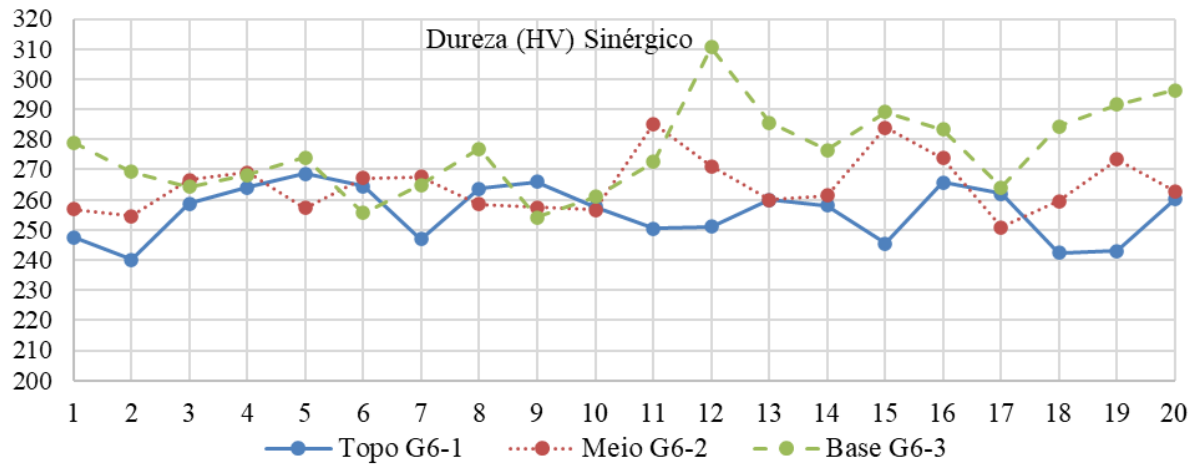
I.2 Variação da microdureza (HV). G3 Sinérgico. AWS ER70S-6



I.3 Mapa de dureza (HV) para o modo Convencional G4



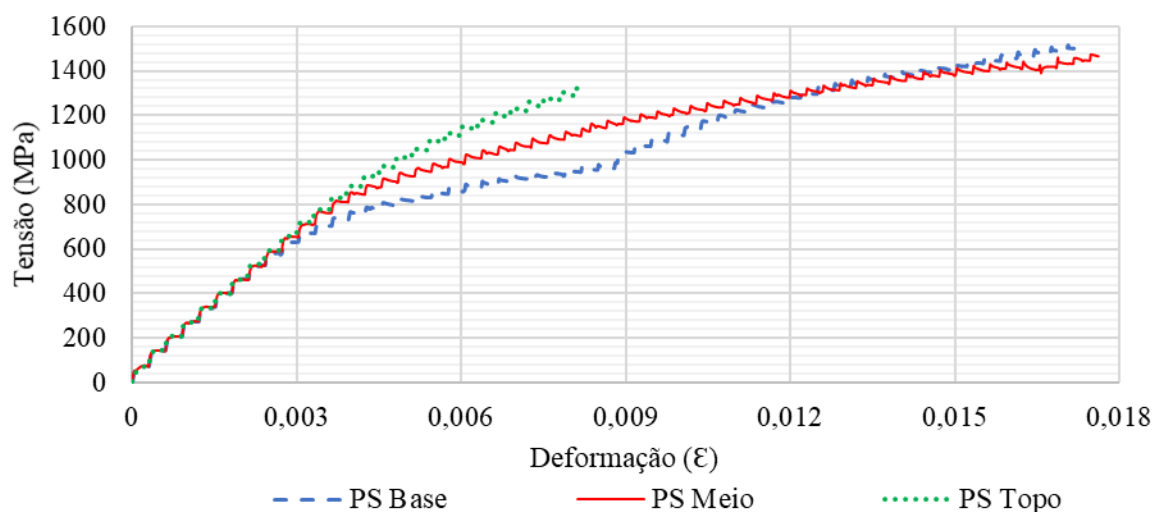
I.4 Gráfico com mapa de durezas para o modo Sinérgico G6



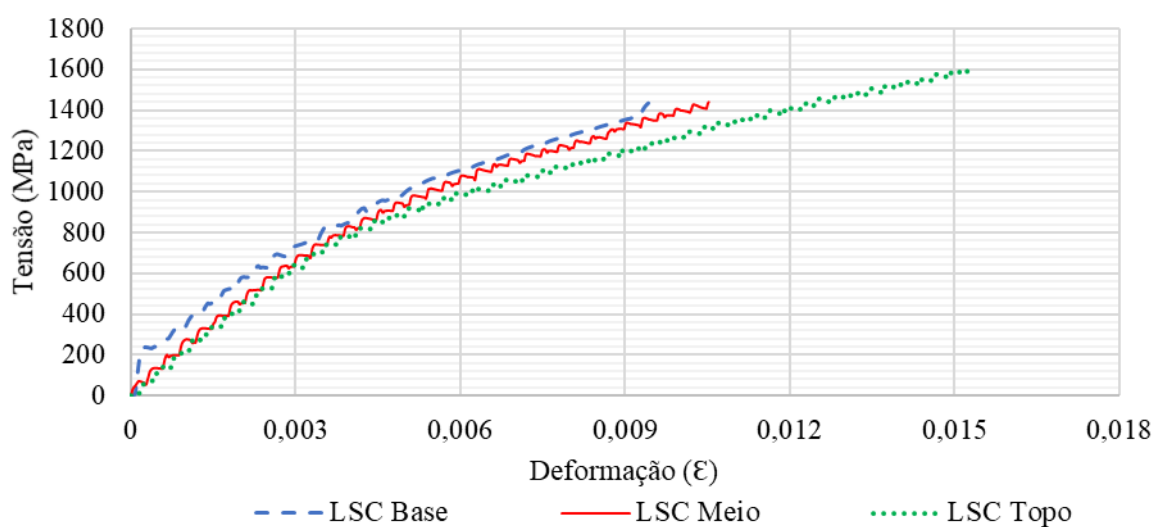
APÊNDICE J – Gráficos de Tensão – Deformação AISI H13

Gráficos de tensão versus deformação para o metal de adição AISI H13.

J.1 Gráfico Tensão vs Deformação. Modo Pulsado Sinérgico (PS). Amostras da Base, Meio e Topo dos depósitos



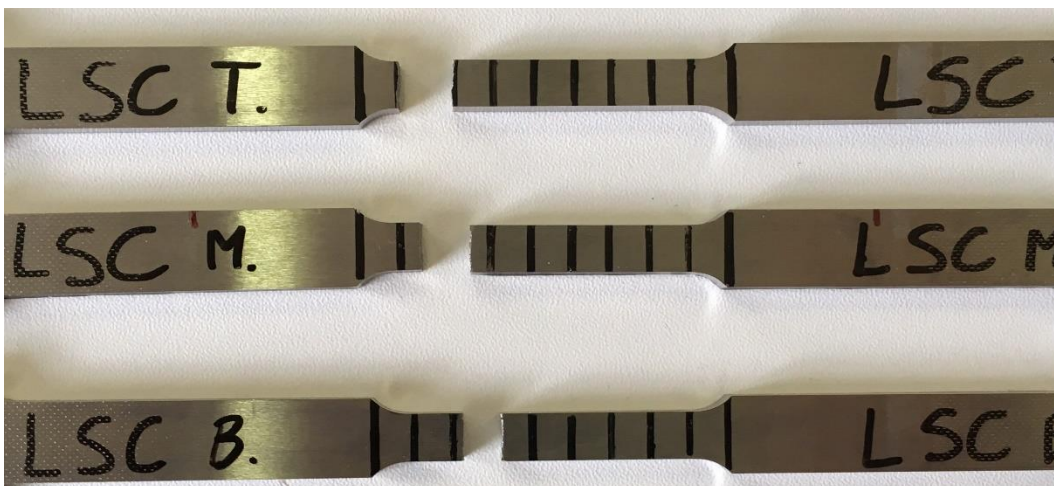
J.2 Gráfico Tensão vs Deformação. Modo “Low Spatter Control” (LSC). Amostras da Base, Meio e Topo dos depósitos



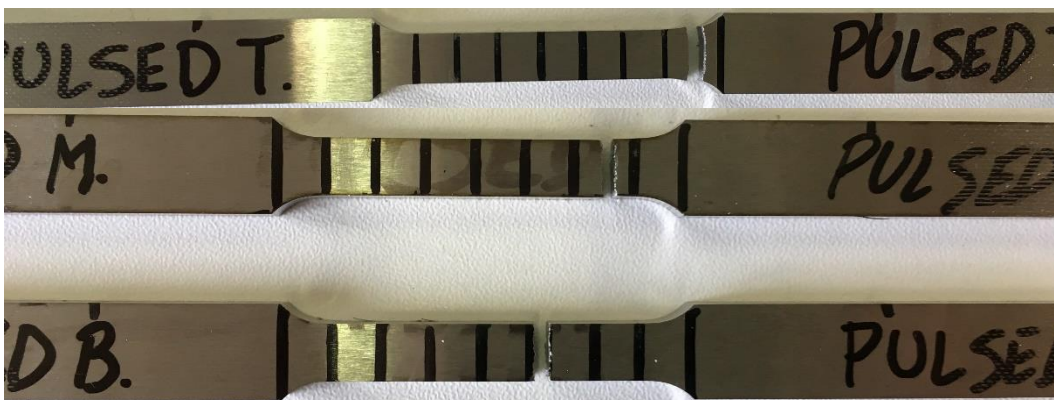
APÊNDICE L – Corpos de Prova Ensaio de Tração AISI H13

Corpos de prova rompidos após o ensaio de tração. Retirados do Topo (T), Meio (M) e Base (B) dos depósitos por WAAM com material de adição AISI H13.

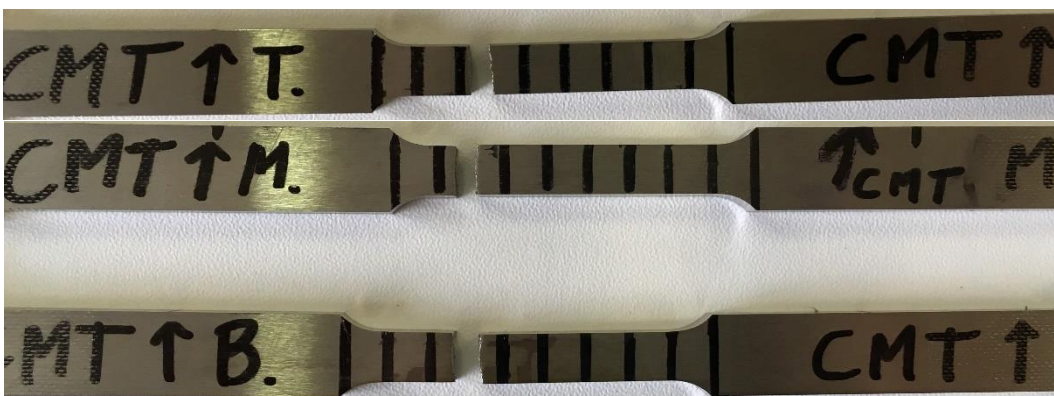
L.1 Forma de Onda LSC



L.2 Forma de Onda Pulsado

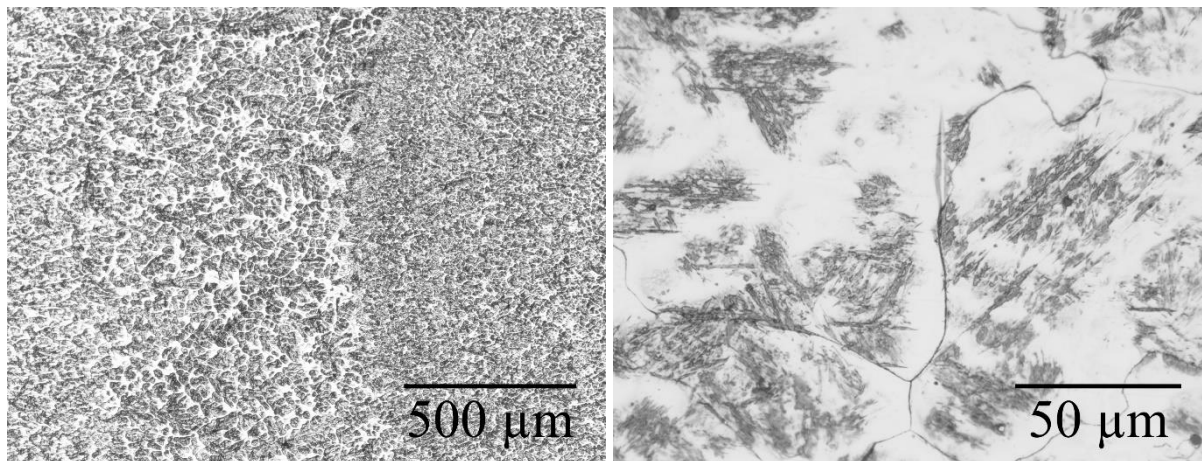
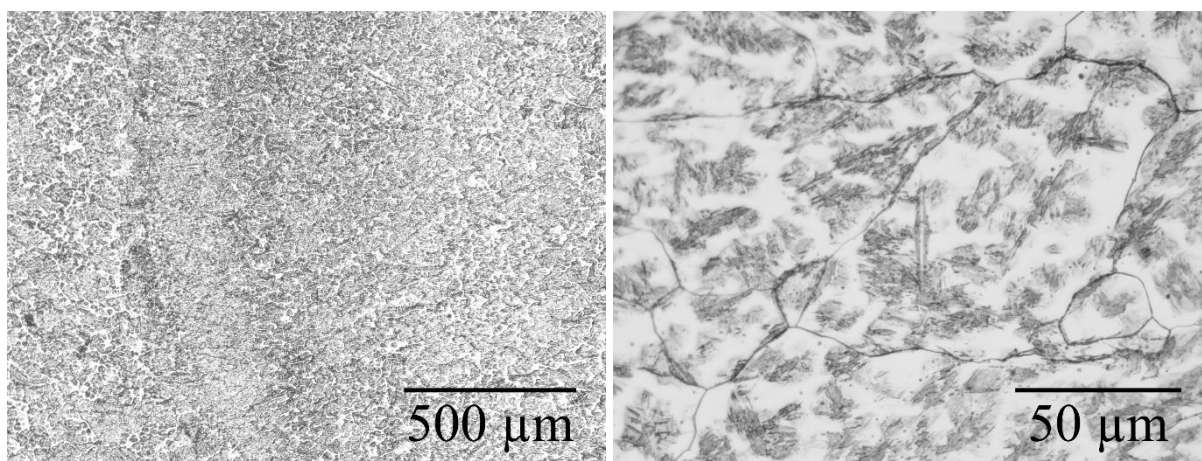
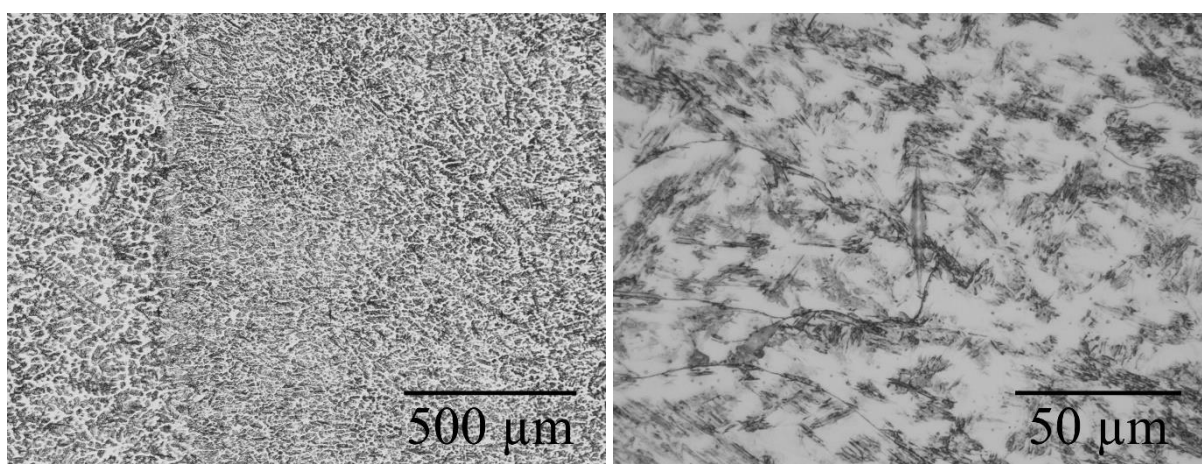


L.3 Forma de Onda CMT

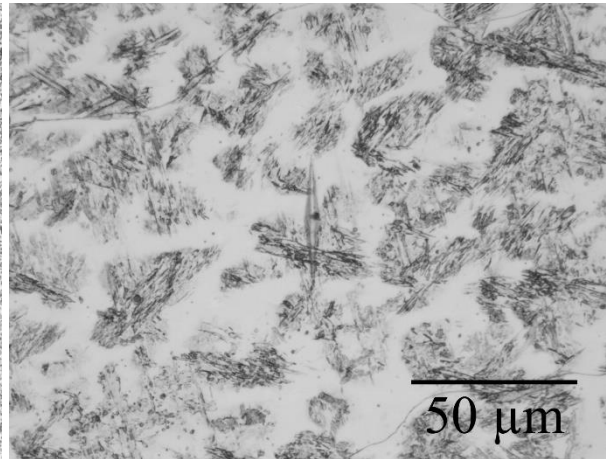
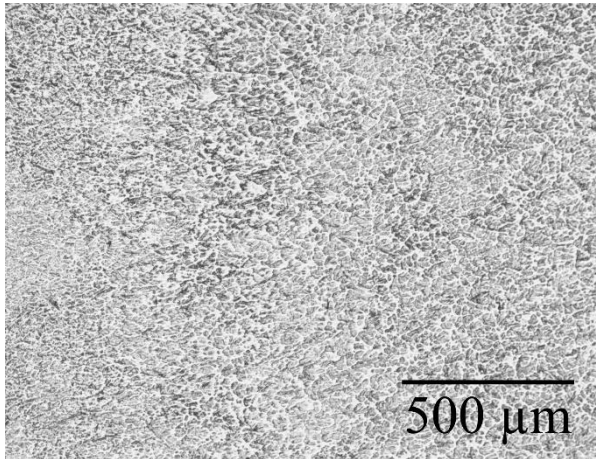


APÊNDICE M – Microestruturas AISI H13

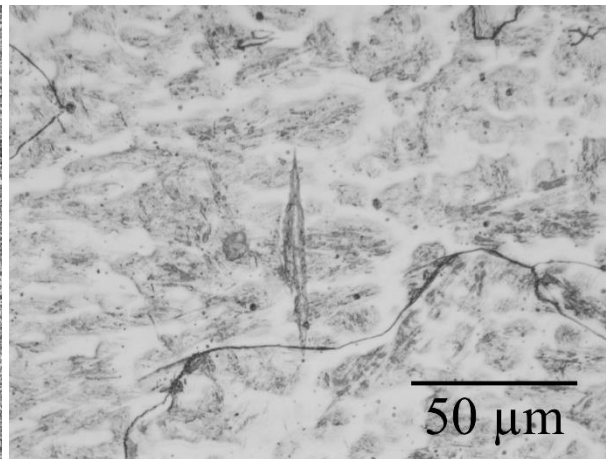
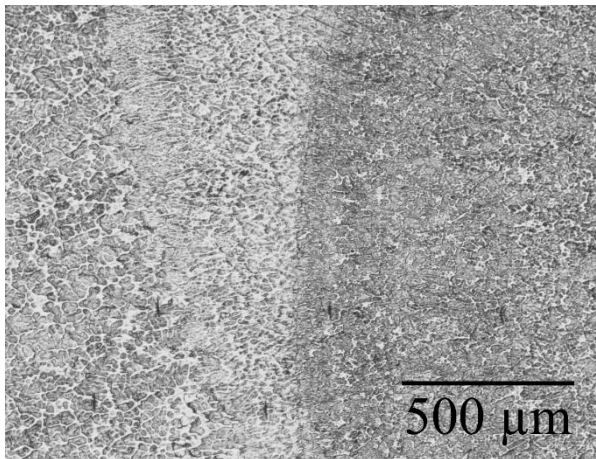
Exemplos das microestruturas para o material de adição AISI H13 nas referidas identificações HK.

M.1 Pulsado Topo, n. 13. Ampliação 50 X e 500 X**M.2 Pulsado Base, n. 9. Ampliação 50 X e 500 X****M.3 LSC Topo, n. 12. Ampliação 50 X e 500 X**

M.4 LSC Base, n. 11. Ampliação 50 X e 500 X



M.5 CMT Topo, n. 6. Ampliação 50 X e 500 X



M.6 CMT Base, n. 9. Ampliação 50 X e 500 X

