



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO LUCAS DOS SANTOS E SILVA

**MANUFATURA ADITIVA DE PAREDES INCLINADAS UTILIZANDO
O PROCESSO *CMT ADVANCED* E ALUMÍNIO COMO MATERIAL DE
ADIÇÃO**

FLORIANÓPOLIS

2019

Fernando Lucas dos Santos e Silva

MANUFATURA ADITIVA DE PAREDES INCLINADAS UTILIZANDO O PROCESSO *CMT ADVANCED* E ALUMÍNIO COMO MATERIAL DE ADIÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

dos Santos e Silva, Fernando Lucas

Manufatura aditiva de paredes inclinadas utilizando o processo CMT Advanced e alumínio como material de adição / Fernando Lucas dos Santos e Silva ; orientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva, 2019.

165 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Impressão 3D de Peças Metálicas. 3. Manufatura Avançada. 4. Prototipagem Rápida. 5. Estratégia de Construção. I. Gonçalves e Silva, Régis Henrique. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Fernando Lucas dos Santos e Silva

Manufatura Aditiva de Paredes Inclinadas Utilizando o Processo *CMT Advanced* e Alumínio como Material de Adição

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Eng. João Carlos Espíndola Ferreira
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Nelso Gauze Bonacorso
Instituto Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Eng. Jonny Carlos da Silva
Coordenador do Programa

Prof. Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva
Orientador

Florianópolis, 12 de setembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por toda estrutura, suporte e correções de rota.

Agradeço à UFSC, especialmente ao Departamento de Automação e Sistemas e ao POSMEC, pela educação gratuita de qualidade, que deveria ser um direito de todos e não uma conquista de poucos na maior parte das vezes privilegiados assim como eu.

Agradeço ao LABSOLDA pelo ambiente extremamente propício ao desenvolvimento da ciência no campo da fabricação, tanto em relação à estrutura quanto em relação à autonomia proporcionada a seus membros.

Agradeço à CAPES pelos 5 meses de bolsa de R\$1500,00.

*“Today, there’s no expert of tomorrow,
there’s only experts of yesterday.”*

(Jack Ma, 2019)

RESUMO

A Manufatura Aditiva vem ganhando destaque no campo da fabricação pelo alto potencial em reduzir custos e aumentar a flexibilidade na prospecção e no design de novos produtos. A indústria exige peças dos mais variados materiais e geometrias o que acaba criando espaço para a existência de diversos processos de Manufatura Aditiva, partindo dos mais convencionais que utilizam fio de polímero como material de adição até os que visam imprimir órgãos completos como um fígado ou rim. Dentre todos os processos de Manufatura Aditiva, há o qual se utiliza da estrutura dos processos de soldagem convencional e recebe a denominação em inglês de *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*. A alta taxa de deposição e o baixo custo tanto de investimento inicial quanto de operação estão entre as principais vantagens deste processo; por outro lado, a baixa precisão geométrica se coloca como sua principal desvantagem. Este trabalho se apresenta no sentido de gerar uma contribuição para que seja atingido um maior controle sobre as deposições e geometrias de peças manufaturadas através da adição de material em camadas via soldagem a arco. Muitas peças industriais são formadas por regiões inclinadas e a metodologia apresentada neste trabalho visa propor um método de parametrização de um processo de soldagem para sua utilização na Manufatura Aditiva. Para a realização dos experimentos apresentados neste trabalho utilizou-se o processo de soldagem *CMT Advanced* da fabricante austríaca Fronius e arame de alumínio 4043 de 1,2 mm de diâmetro como material de adição. Uma Rede Neural Artificial foi treinada com os dados obtidos dos experimentos e integrada ao *Slicer*/Gerador de Trajetória para funcionar como um seletor de parâmetros em malha-aberta. A mesma metodologia poderá ser aplicada para qualquer processo de soldagem e/ou material. Uma peça composta por regiões inclinadas foi manufaturada para validação da metodologia proposta.

Palavras-chave: WAAM; Impressão 3D de Peças Metálicas; Prototipagem Rápida; Estratégia de Construção; Indústria 4.0; Manufatura Avançada.

ABSTRACT

Additive Manufacturing has been gaining prominence in the manufacturing field for its high potential in lowering costs and increasing flexibility in the prospection and design of new products. The industry demands parts and pieces made of the most varied geometries and materials. This ends up creating space for the existence of the most diverse Additive Manufacturing processes. Since the most conventional ones use polymer as addition material to the most complex ones that aim for the manufacture of organs like a liver or a kidney. Considering all Additive Manufacturing processes, there is the one that uses the structure of conventional welding processes and receives the denomination of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Its high deposition rate and low cost of both initial investment and operation are among the main advantages of this process; on the other hand, its low geometric precision stands as its main disadvantage. This work is presented in order to generate a contribution to achieve greater control over the depositions and geometry of manufactured parts through the addition of materials layer by layer using arc welding. Many industrial parts are formed by inclined parts and the methodology presented in this paper aims to propose a method of welding processes parametrization for its use in Additive Manufacturing. The welding process called CMT advanced from the Austrian manufacturer Fronius and aluminum wire 4043 of 1.2 mm of diameter as addition material were used in the experiments. An Artificial Neural Network was trained using the obtained data so it could function as an open-loop parameter selector when integrated to the Slicer/Trajectory Generator. The same methodology can be applied to any welding process and/or addition material. A part composed of inclined parts was manufactured for validation of the proposed methodology.

Keywords: WAAM; 3D Printing of Metal Parts; Rapid Prototyping; Construction Strategy; Industry 4.0; Advanced Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ensaios de Manufatura Aditiva realizados no LABSOLDA.	16
Figura 1.2 – Peça Manufaturada Aditivamente via Soldagem a Arco.	17
Figura 1.3 – Modelo CAD do Molde Manufaturado.....	18
Figura 1.4 – Esboço de corte transversal de paredes finas manufaturadas via soldagem a arco. (a) parede sem inclinação; (b) parede inclinada.	19
Figura 1.5 – Modelo da Altura h (mm) e Inclinação Θ ($^\circ$) em Paredes Finas e Inclinadas.	19
Figura 2.1 – Oscilograma do Processo CMT. Fonte: <i>Fronius</i>	22
Figura 2.2 – Movimento de avanço e recuo do arame no CMT. Fonte: <i>Fronius</i>	22
Figura 2.3 – Exemplo de Oscilograma de Tensão e Corrente para o modo CMT Pulse [11].	23
Figura 2.4 – Exemplo de Oscilograma de Tensão e Corrente para o modo CMT Advanced [11].	23
Figura 2.5 – Exemplo de Oscilograma de Tensão e Corrente para o modo CMT Advanced Pulse [11].	24
Figura 2.6 – Depósitos Realizados com o Processo: (a) MIG CMT, (b) MIG CMT Pulse, (c) MIG CMT Advanced, (d) MIG CMT Advanced Pulse com relação de 10 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo e (e) MIG CMT Advanced Pulse com relação de 25 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo. Adaptado de [10].	25
Figura 2.7 – Gráficos Comparativos entre Variantes CMT e MIG Pulsado [13].	25
Figura 2.8 – Gráfico da Variação da Va pela alteração na DBCP – versão CMT [15].	26
Figura 2.9 – Esquemático de uma Impressora 3D Comercial. Fonte: Google.	31
Figura 2.10 – Manipulador Antropomórfico <i>Motoman HP-20D</i>	32
Figura 2.11 – <i>Teach Pendant do controlador DX100</i> da Motoman.	32
Figura 2.12 – Perfil térmico do Eletrodo de Arame para Diferentes Comprimentos. Adaptado de [21].	35
Figura 2.13 – Seções Transversais de Cordões de Solda. (a) DBCP = 7 mm, (b) DBCP = 12 mm, (c) DBCP = 17 mm e (d) DBCP = 20 mm [21].	35
Figura 2.14 – Colisão devido a Erro na Estimativa da Altura de Camada.	37
Figura 2.15 – Efeito da perda da proteção gasosa devido ao aumento excessivo da DBCP.	37
Figura 2.16 – Influência do Tempo de Resfriamento entre Deposições.....	38
Figura 2.17 – Variação da Largura de Camada ao Longo da Altura da Parede [24].	40
Figura 2.18 – Esquemático das Geometrias e Respectivas Microestruturas [25].	41
Figura 2.19 – Deposição com Resfriamento Ativo em Tempo de Processo. Adaptado de [26].	42
Figura 2.20 – Simulação da Propagação e Acúmulo do Calor [27].	42
Figura 2.21 – Esquemático da Estrutura de uma Rede Neural Artificial [29].	43
Figura 2.22 – Comparações entre Cérebro e Rede Neural Artificial. (a) Nível Macro. (b) Nível Micro. [30].	44
Figura 3.1 – Geometrias Disponíveis no Compilador Interativo.....	47
Figura 3.2 – Definição das Dimensões do Sólido	47
Figura 3.3 – Pontos Gerados Relativos ao Sólido Definido.	48
Figura 3.4 – Formas Possíveis de Deposição para o Sólido Projetado.....	48
Figura 3.5 – Algoritmo Gerado Testado no Software de Simulação.....	49
Figura 3.6 – Simulação da Forma 1 de Deposição – Paralelepípedo.	49
Figura 3.7 – Simulação da Forma 6 de Deposição – Paralelepípedo.	50
Figura 3.8 – Simulação da Forma 6 de Deposição – Paralelepípedo.	52
Figura 3.9 – Criação da Malha de Elementos Finitos.	53
Figura 3.10 – Obtenção das Coordenadas dos Nós da Malha de EF.....	53
Figura 3.11 – Arquivo txt Gerado a partir do Modelo do Exemplo.	54
Figura 3.12 – Desenho do Papai Noel Aberto no <i>Solidworks</i>	55
Figura 3.13 – Pontos projetados e igualmente espaçados – 50 pontos.	56
Figura 3.14 – Arquivo com Pontos que Representam a Curva Desejada.	57
Figura 3.15 – Parte de arquivo IGES contendo pontos da Curva Seleccionada.	57
Figura 3.16 – Papai Noel em Camadas utilizando o Gerador de Trajetórias baseado em CAD.....	58
Figura 3.17 – Tubo Base.....	59
Figura 3.18 – Tubo Base Fundido.....	60
Figura 3.19 – Serpentina em torno do Tubo Base.....	61
Figura 3.20 – Manufatura com o Sistema de Serpentina.....	62
Figura 3.21 – Usinagem da Peça Manufaturada sobre o Tubo Base.	63
Figura 3.22 – Setup do Segundo Dispositivo de Refrigeração.	64
Figura 3.23 – Segundo Dispositivo de Refrigeração.....	65
Figura 3.24 – Representação em CAD do Segundo Dispositivo de Refrigeração	65
Figura 3.25 – Utilização do Segundo Dispositivo de Refrigeração.	66
Figura 3.26 – Peça Manufaturada com o Segundo Dispositivo de Refrigeração.	66
Figura 3.27 – Peça após Processo de Usinagem.	67
Figura 3.28 – (a) Modelo CAD Completo. (b) Porção Seleccionada.....	68
Figura 3.29 – (a) Parte Manufaturada. (b) Alteração da Geometria dos Cordões.	69
Figura 3.30 – Peça com Alto Gradiente Térmico.....	70

Figura 3.31 – Peça com Baixo Gradiente Térmico.	70
Figura 3.32 – Esquemático do Tanque de Inundação Proposto e Peça sob Manufatura.	71
Figura 3.33 – Peça Manufaturada dentro do Tanque de Imersão.	72
Figura 3.34 – Interface do software desenvolvido para controle da DBCP.	74
Figura 3.35 – Leitura obtida com o topo do cordão à 25mm do Sensor.	75
Figura 3.36 – Validação do Ajuste Realizado.	76
Figura 3.37 – Altura Média de Cada uma das 30 Camadas da Parede Manufaturada.	76
Figura 3.38 – Parede Finalizada com Valor de DBCP Mantido na Referência.	77
Figura 4.1 – Fonte de Soldagem <i>CMT Advanced - Fronius</i>	79
Figura 4.2 – Manipulador Antropomórfico HP-20D (<i>Motoman</i>).	80
Figura 4.3 – Pirômetro.	81
Figura 4.4 – Especificações Técnicas do Pirômetro Utilizado.	81
Figura 4.5 – Substrato e Paredes Manufaturadas Sobre o Substrato.	81
Figura 4.6 – Sequência de Movimentações com Ponto de Recuo.	84
Figura 4.7 – Reajuste da DBCP.	85
Figura 4.8 – Fluxograma do Ajuste da DBCP.	85
Figura 4.9 – Fluxograma da Medição, Registro e Visualização das Alturas das Camadas.	86
Figura 4.10 – Visualização das Variáveis do tipo <i>Real</i>	87
Figura 4.11 – Marcações a serem alinhadas para a definição do <i>Home Position</i>	89
Figura 4.12 – Exemplos de Posturas para Calibração da Ferramenta.	90
Figura 4.13 – Gabarito para Verificação dos Deslocamentos no Plano-XY.	91
Figura 4.14 – Gabarito para Verificação das Medições de Altura de Camada.	92
Figura 4.15 – Resultado das Medições do Gabarito.	93
Figura 5.1 – Primeira Parede Manufaturada.	95
Figura 5.2 – Velocidade de Arame das Camadas Depositadas.	96
Figura 5.3 – Experimento Sobrechapa antes da Otimização da Curva Sinérgica.	97
Figura 5.4 – Experimento Sobre Chapa Variando Comprimento do <i>Stick-out</i>	98
Figura 5.5 – Experimento Sobre Chapa após Otimização da Curva Sinérgica.	99
Figura 5.6 – Ensaio Sobre Chapa antes e após Otimização da Curva Sinérgica.	100
Figura 5.7 – Ensaio Sobre Chapa antes e após Otimização da Curva Sinérgica.	100
Figura 5.8 – Ensaio Sobre Chapa antes e após Otimização da Curva Sinérgica.	100
Figura 5.9 – Forma de Onda da Corrente com Tempo de Ignição e HotStart.	101
Figura 5.10 – Diferentes Configurações de Rotina de Inicialização.	102
Figura 5.11 – Respostas da Velocidade de Arame.	102
Figura 5.12 – Aspecto Superficial (a) e Penetração nos Inícios de Cordão (b).	103
Figura 5.13 – Dinâmica da Velocidade de Arame. V_a Setada = 2,2 m/min.	104
Figura 5.14 – Dinâmica da Velocidade de Arame. V_a Setada = 2,5 m/min.	105
Figura 5.15 – Dinâmica da Velocidade de Arame. V_a Setada = 2,8 m/min.	105
Figura 5.16 – Dinâmica da Velocidade de Arame. V_a Setada = 3,1 m/min.	105
Figura 5.17 – “Descolamento” como consequência das tensões residuais.	110
Figura 5.18 – Tensões Residuais e Distorções em MA de Paredes Simples [43].	110
Figura 5.19 – Paredes Manufaturadas Utilizadas como Corpos de Prova.	111
Figura 5.20 – Deformação no Início das Paredes.	112
Figura 5.21 – Representação do Sistema em Malha Aberta – 3 Entradas e 1 Saída.	115
Figura 5.22 – Relação entre Velocidade de Arame e Altura de Camada – $V_s = 0,35, 0,50$ e $0,65$ m/min, $\text{Ângulo} = 90^\circ$	116
Figura 5.23 – Relação entre Ângulo e Altura de Camada – $V_a = 3,1, 2,8, 2,5$ e $2,2$ m/min, $V_s = 0,35$ m/min.	117
Figura 5.24 – Relação entre Ângulo e Altura de Camada – $V_a = 3,1, 2,8, 2,5$ e $2,2$ m/min, $V_s = 0,50$ m/min.	117
Figura 5.25 – Relação entre Ângulo e Altura de Camada – $V_a = 3,1, 2,8, 2,5$ e $2,2$ m/min, $V_s = 0,65$ m/min.	117
Figura 5.26 – Gráfico em 4 Dimensões que Relaciona 3 Entradas e 1 Saída - I.	118
Figura 5.27 – Gráfico em 4 Dimensões que Relaciona 3 Entradas e 1 Saída - II.	119
Figura 5.28 – Região de Trabalho para Altura de Camada = 2,2 mm/camada.	121
Figura 5.29 – Representação do Controle em Malha Aberta do Processo.	121
Figura 5.30 – Rede Neural Artificial Criada em MATLAB.	122
Figura 5.31 – Interface do Gerador de Trajetórias.	124
Figura 5.32 – Peça com Regiões Inclinadas.	125
Figura 5.33 – Simulação da Trajetória Gerada.	125
Figura 5.34 – Primeiro Sólido Manufaturado com Seleção Automatizada de Parâmetros.	126
Figura 5.35 – Adição de Água no Interior do Sólido durante Processo.	126
Figura 5.36 – Sólido Manufaturado com uso de Seleção Automatizada de Parâmetros.	127
Figura 5.37 – Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco. (a) Projeto em CAD. (b) Sólido Resultante.	128
Figura 5.38 – Sólido Manufaturado. (a) Projeto em CAD. (b) Sólido Resultante.	128
Figura 5.39 – Molde de Encosto de Cabeça de Banco Automotivo. (a) Projeto em CAD. (b) Sólido Resultante.	129
Figura 7.1 – Exemplo de Design Generativo. Fonte: <i>Autodesk</i>	142

Figura 7.2 – Sistema de Manufatura Aditiva com Leito de Pó. Fonte: [5].....	143
Figura 7.3 – Peça manufaturada utilizando o processo DMLS. Fonte: YouTube	144
Figura 7.4 – Feixe de Elétrons disparado para fusão de metal em pó. Fonte: YouTube.	145
Figura 7.5 – Sistema de Manufatura Aditiva com Alimentação de Pó. Fonte: [5].....	146
Figura 7.6 – Manufatura de uma lâmina utilizando LENS. Fonte: [60].....	147
Figura 7.7 – Processo de Manufatura Aditiva LMD-p. Fonte: www.metal-powder.net	147
Figura 7.8 – Tocha PTA com injeção externa de pó. Fonte: [62].	148
Figura 7.9 – Tocha PTA com injeção interna de pó. Fonte: [63].	148
Figura 7.10 – Tocha PTA com injeção central de pó. Fonte: [64].	149
Figura 7.11 – Sistema de Manufatura Aditiva com Alimentação de Arame. Fonte: [17].	149
Figura 7.12 – Peça estrutural manufaturada com o processo EBF. Fonte: [67]	151
Figura 7.13 – Processo EBAM. Fonte: Sciaky Inc.....	152
Figura 7.14 – Processo EBAM com configuração de duplo arame. Fonte: Sciaky Inc.....	153
Figura 7.15 – Laser Metal Deposition-wire. Fonte: [68]	153
Figura 7.16 – Coordenadas do Flange e da Tocha [41].....	154
Figura 7.17 – Marcação de cinco posturas para Calibração de Ferramenta [41].....	155
Figura 7.18 – <i>Teach Pendant do controlador DX100 da Motoman</i> [41].	156
Figura 7.19 – Estrutura de uma Linha de Comando em INFORM III.	157
Figura 7.20 – Registro de uma Variável de Posição em modo Pulso.....	159
Figura 7.21 – Registro de uma Variável de Posição do tipo Cartesiano.	159
Figura 7.22 – Exemplo de arquivo .JBI.	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Divisões das Instruções da Linguagem INFORM III.	41
Tabela 4.1 – Especificações Técnicas do SAP [39]	80
Tabela 4.2 – Parâmetros para Manufatura das Amostras. Parte I.....	94
Tabela 4.3 – Parâmetros para Manufatura das Amostras. Parte II.	94
Tabela 5.1 – Parâmetros da Onda Setados e Medidos para $V_s = 0,35$ m/min e Deposições Sobre Camadas.	108
Tabela 5.2 – Parâmetros da Onda Setados e Medidos para $V_s = 0,50$ m/min e Deposições Sobre Camadas.	108
Tabela 5.3 – Parâmetros da Onda Setados e Medidos para $V_s = 0,65$ m/min e Deposições Sobre Camadas.	109
Tabela 5.4 – Camada e Parâmetros	111
Tabela 5.5 – Alturas de Camada e Ângulo (Parte I de II)	113
Tabela 5.6 – Alturas de Camada e Ângulo (Parte II de II).....	114
Tabela 7.1 – Divisões das Instruções da Linguagem INFORM III.	157
Tabela 7.2 – Variáveis de Usuário disponíveis no DX100.	158

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

HMI	<i>Human-Machine Interface</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
P1	<i>Ponto 1</i>
P2	<i>Ponto 2</i>
Ponto de Médio	<i>PM</i>
Novo Ponto Médio	<i>PM'</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>
WAAM	<i>Wire+Arc Additive Manufacturing</i>
DBCP	Distância Bico de Contato-Peça
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Justificativas Técnicas para o Desenvolvimento do Trabalho	17
1.2	Objetivos.....	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	O Processo de Soldagem CMT-Fronius e suas Variações	21
2.2	Manufatura Aditiva	27
2.3	Manipuladores	30
2.4	Influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a Geometria do Cordão Depositado	33
2.5	Redes Neurais Artificiais	43
3	DESENVOLVIMENTOS ANTERIORES	45
3.1	Geradores de Trajetórias	46
3.1.1	Gerador de Trajetórias Interativo	47
3.1.2	Gerador de Trajetórias Baseado em Modelos CAD.....	50
3.2	Aparatos de Refrigeração.....	58
3.2.1	Serpentina de Cobre.....	61
3.2.2	Incidência Direta de Fluido Refrigerante.....	63
3.2.3	Tanque de Inundação	68
3.3	Leitura da Altura das Camadas utilizando Sensor Laser	73
4	MATERIAIS E MÉTODOS	79
4.1	Bancada Experimental e Equipamentos	79
4.1.1	Fonte de Soldagem <i>Fronius CMT Advanced</i>	79
4.1.2	Manipulador Antropomórfico HP-20D.....	79
4.1.3	SAP.....	80
4.1.4	Termômetro Infravermelho (Pirômetro)	81
4.1.5	Substrato de Alumínio	81
4.2	Algoritmo com Trajetórias para a Manufatura Aditiva das Paredes Inclinadas	82
4.3	Aferição do Manipulador Antropomórfico	88
4.3.1	Definição da <i>Home Position</i>	88
4.3.2	Calibração da TCP	89
4.3.3	Verificação da Aferição	90
4.4	Matriz de Experimentos	93
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
5.1	Velocidade de Arame Setada e Velocidade de Arame Medida	95
5.2	Redução da Duração dos Transitórios	101
5.3	Parâmetros da Onda CMT Advanced Setados e Medidos	106
5.4	Primeira Camada e Tensões Residuais	109
5.5	Paredes Manufaturadas	111
5.6	Seleção de Parâmetros.....	119
5.7	Manufatura de Peças com Regiões Inclinadas	124
5.8	Discussão.....	129
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
6.1	Conclusões	133
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	135
7	REFERÊNCIAS.....	137
	APÊNDICE A - PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA DE PEÇAS METÁLICAS	142
	APÊNDICE A.1 - SISTEMAS COM LEITO DE PÓ.....	143
	APÊNDICE A.2 - SISTEMAS COM ALIMENTAÇÃO DE PÓ...145	
	APÊNDICE A.3 - SISTEMAS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME	149
	APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DE FERRAMENTA	154
	APÊNDICE C – LINGUAGEM INFORM III (YASKAWA).....	156
	ANEXO I – ESTRUTURA DOS PROGRAMAS INFORM III	162

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva é um dos conceitos que mais tem se destacado na atual transição para a Indústria 4.0 a qual muitos têm chamado de 4ª Revolução Industrial. Esta revolução consiste de uma nova forma de organizar e controlar todo o ciclo de vida¹ de um produto em sua cadeia produtiva contribuindo positivamente na busca de cumprir requisitos cada vez mais peculiares. A posição de destaque ocupada pela Manufatura Aditiva se deve, principalmente, ao seu alto potencial em melhorar a produtividade da indústria através da sua capacidade em flexibilizar o design de novos produtos e descentralizar a produção dos mesmos. É possível chegar a um nível de integração no qual o modelo digital de uma peça é simplesmente enviado a um centro de fabricação próximo do cliente para ser fabricada, eliminando passos intermediários de manufatura, transporte e armazenamento [1]. Apesar do recente aumento de popularidade correlacionada ao termo “Indústria 4.0”, a Manufatura Aditiva não é uma tecnologia nova. Com mais de 30 anos de história, foi inicialmente utilizada para a fabricação de protótipos tanto conceituais quanto funcionais e ficou conhecida como Prototipagem Rápida. A cada dia este processo de fabricação ganha mais aplicabilidade já sendo utilizado em áreas como a odontológica, automotiva e aeroespacial, nas quais promove avanços não só na fabricação de peças como também na de ferramentas para estes setores [2].

Peças metálicas podem ser manufaturadas aditivamente com a utilização de laser, feixe de elétrons ou arco elétrico, como fonte de calor, e metal em pó (em leito ou depositado) ou em arame como material de adição. Processos de alta densidade de energia, como o laser ou feixe de elétrons, apresentam vantagens competitivas, mas possuem uma baixa eficiência energética motivando pesquisas que buscam processos mais eficientes [3]. Processos baseados em arco elétrico entram no foco de pesquisas em manufatura aditiva por possuírem alta eficiência energética e exibirem uma ampla abrangência em relação à quantidade de material depositado, possibilitando a produção de peças de grande porte com maior rapidez. Enquanto que processos que utilizam laser como fonte de energia atingem uma taxa de deposição de até 0,1 kg/h quando utilizado leito em pó e 1 kg/h quando utilizado adição de pó, a taxa de deposição de processos de Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco podem atingir taxas de até 5-6 kg/h [4]. Porém a seleção do processo a ser utilizado depende fortemente da geometria a ser fabricada. Peças pequenas ou com design complexo necessitam de baixas taxas de deposição e, desta forma, processos que utilizam laser, feixe de elétrons ou microplasma como fonte de calor são os mais

¹ Entende-se por Ciclo de Vida todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função na cadeia de produtividade [69].

indicados. Já para a manufatura de componentes com grandes dimensões os processos com maiores taxas de deposição, como os que utilizam arco elétrico e arame, se tornam os mais viáveis de serem utilizados [5].

Ensaio de Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco têm sido realizados com frequência no LABSOLDA - Instituto de Soldagem e Mecatrônica vinculado ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e local onde este trabalho foi desenvolvido. Com o objetivo de formar engenheiros, mestres e doutores de elevada qualificação e gerar inovações tecnológicas, o LABSOLDA adotou uma abordagem não ortodoxa no ambiente acadêmico brasileiro e se consolidou pelo desenvolvimento de instrumentação e equipamentos próprios. Destacam-se parcerias com a Petrobras, Tractebel e Embraco, no meio industrial; com a RWTH, UFU e Universidad Antofagasta, no meio acadêmico; e CNPQ, ANP, CAPES e FINEP, como principais financiadores [6]. Até então, os ensaios de Manufatura Aditiva realizados no LABSOLDA focaram em avaliar a relação entre os parâmetros de soldagem e a molhabilidade das deposições, buscando manter configurações que resultassem em baixo aporte de calor à peça e alta controlabilidade da poça. Na Figura 1.1 é possível observar algumas peças já fabricadas.

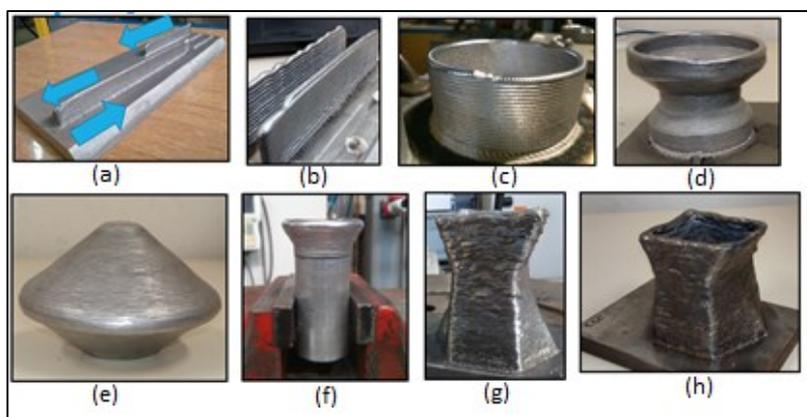


Figura 1.1 – Ensaio de Manufatura Aditiva realizados no LABSOLDA.

As geometrias das peças expostas na figura anterior não se basearam em qualquer forma de desenho técnico e foram obtidas através da projeção de pontos no espaço, porém a norma ISO/ASTM 52900:2015, *Additive Manufacturing – General Principles Terminology* [7], define que Manufatura Aditiva é a “*fabricação de objetos pela adição de material camada a camada baseando-se em modelo 3D (CAD)*”. Isto significa que um processo de adição de material em camadas só será considerado um processo de fabricação de fato se as informações que determinam as trajetórias pelas quais o manipulador deverá percorrer durante o processo forem obtidas a partir de um modelo digital da peça.

É necessário que as peças resultantes das deposições possuam dimensões maiores do que seus respectivos modelos, pois virtualmente todas as peças manufaturadas aditivamente por soldagem a arco acabam necessitando passar por algum processo de usinagem para atingir requisitos de tolerâncias dimensionais e acabamento definidos em projeto. Com exceção de (a) e (b), todas os sólidos exibidos na Figura 1.1 foram manufaturados utilizando parede finas, as quais são definidas por um cordão por camada [8], e trajetória de deposição helicoidal, a qual permite que peças inteiras sejam totalmente depositadas com apenas uma operação de abertura e outra de extinção de arco, operações que influenciam fortemente as condições físicas da peça (gradiente térmico, tensões residuais...).

1.1 Justificativas Técnicas para o Desenvolvimento do Trabalho

Durante ensaios para a fabricação de uma peça de alumínio projetada em CAD, evidenciou-se um desafio recorrente na manufatura aditiva de paredes finas e inclinadas: para os mesmos parâmetros de soldagem e mesma quantidade de camadas depositadas, paredes inclinadas atingem alturas menores do que paredes não-inclinadas. A peça em questão é um molde de alumínio para a conformação de espumas utilizadas na fabricação de bancos automotivos e o resultado das deposições realizadas pode ser visualizado na Figura 1.2.

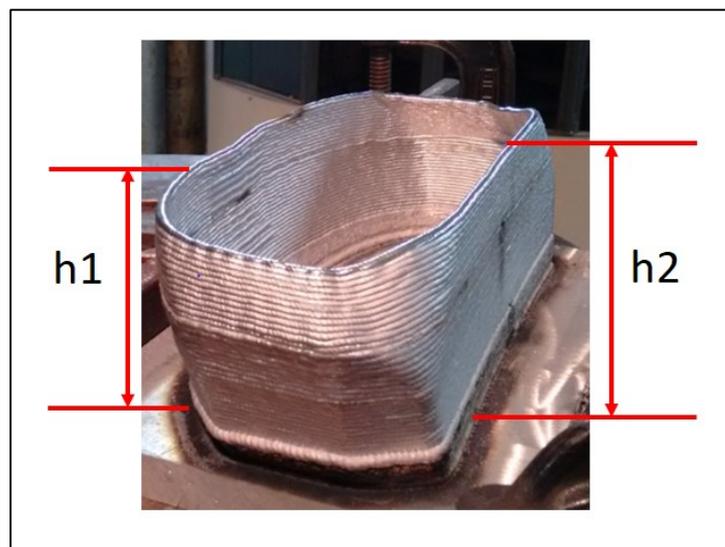


Figura 1.2– Peça Manufaturada Aditivamente via Soldagem a Arco.

Ao observar o sólido obtido, a diferença entre as alturas **h1** e **h2** se torna clara, sendo **h1** menor do que **h2**. Porém, o modelo CAD da peça e a região selecionada, exibidos na Figura 1.3, definem que tanto **h1** quanto **h2** deveriam possuir o mesmo valor de 100 mm.

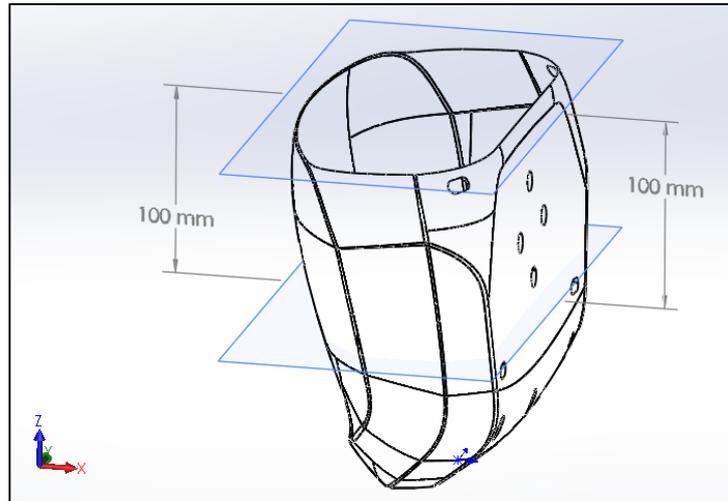


Figura 1.3 – Modelo CAD do Molde Manufaturado.

A diferença de alturas observada significa que a peça manufaturada aditivamente resultou distorcida em relação ao seu modelo CAD. Em outras palavras, o plano formado pelas arestas de topo deveria ser paralelo ao plano horizontal, porém resultou inclinado em relação a este. Através de uma simples inspeção visual foi possível constatar que as distorções das dimensões tornaram inviável a aplicação de usinagem com o objetivo de atingir a geometria final definida pelo modelo CAD. Uma forma mais sofisticada de realizar esta verificação seria realizar leituras das superfícies da peça com algum sistema de medição apropriado (laser, luz, fotogrametria, tomografia...) e sobrepor a nuvem de pontos obtida destas medições com o modelo CAD original.

As regiões da peça que resultaram em menores alturas foram especificamente as regiões nas quais as paredes formavam os maiores ângulos com a Normal. Considerando que nenhum parâmetro de soldagem (Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame...) foi alterado durante o processo de deposição, é possível inferir que as regiões de paredes mais inclinadas resultaram em alturas menores devido ao fato de que nessas regiões as camadas não são depositadas exatamente uma sobre a outra, como na manufatura aditiva de paredes sem inclinação, mas são depositadas com um pequeno deslocamento, na direção do eixo-X (*Offset-x*), em relação a camada anterior. A Figura 1.4 exibe os esquemáticos dos cortes transversais de paredes manufaturadas aditivamente após a deposição de três camadas. As deposições foram realizadas na direção do eixo-y e sem inclinação de tocha, sendo (a) uma parede sem inclinação e (b) uma parede com inclinação Θ .

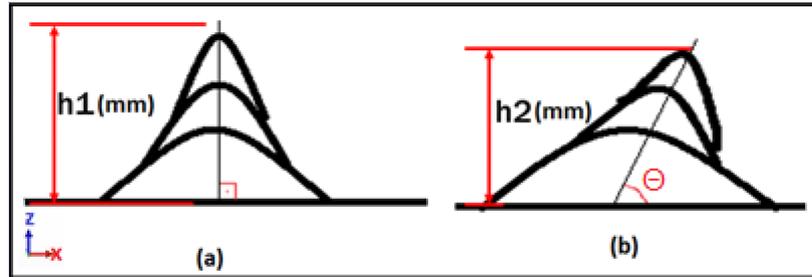


Figura 1.4 – Esboço de corte transversal de paredes finas manufaturadas via soldagem a arco. (a) parede sem inclinação; (b) parede inclinada.

A menor altura observada, para o mesmo número de camadas depositadas, na manufatura das paredes finas e inclinadas em comparação com paredes sem inclinação, se deve ao fato de que na manufatura aditiva de paredes inclinadas uma parte do material depositado contribui para a formação do ângulo da parede com a Normal e outra contribui para o aumento da altura da mesma; por outro lado, quando a parede a ser manufaturada possui ângulo nulo em relação a Normal, todo o material depositado contribui somente para o aumento da altura. Esta relação pode ser modelada como um problema de trigonometria da forma ilustrada na Figura 1.5.

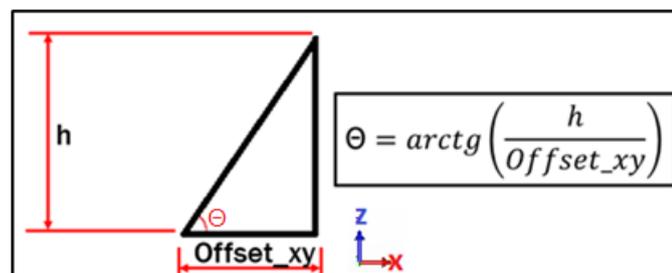


Figura 1.5 – Modelo da Altura h (mm) e Inclinação Θ ($^\circ$) em Paredes Finas e Inclinadas.

Como já mencionado, a Manufatura Aditiva é um processo de fabricação no qual as trajetórias realizadas pelo manipulador durante a deposição de material são baseadas no modelo CAD do sólido a ser fabricado e no valor de Espessura de Fatiamento selecionado. O valor desta Espessura de Fatiamento deve ser definido pelo operador e deve corresponder ao Valor da Altura das Camadas (cordões) que serão depositadas. Por sua vez, o Valor da Altura destas Camadas é resultado da combinação de diversos fatores, podendo ser destacados como as mais importantes a Velocidade de Soldagem, a Velocidade de Arame, a Temperatura Interpasse e a diferença de posicionamento da camada depositada em relação a camada anterior, denominado aqui neste documento de Offset-x.

Uma vez gerada a trajetória baseando-se em um modelo CAD e no valor da Espessura de Fatiamento informado pelo operador, todas as camadas devem ser inteiramente depositadas

com valor de altura correspondente ao valor da Espessura de Fatiamento informado ao software pelo operador. Esta correlação entre Espessura de Fatiamento (virtual) e Altura de Camada (real) pode ser obtida através da parametrização da Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame, considerando a Temperatura Interpasse constante. Porém, como detalhado nos parágrafos anteriores, as camadas depositadas para formar regiões inclinadas tendem a resultar em alturas menores do que as camadas depositadas para formar regiões sem inclinação. Assim, peças manufaturadas aditivamente formadas por paredes finas e inclinadas resultarão deformadas caso nenhuma atuação seja realizada para compensar as diferenças no valor de Altura de Camada, inviabilizando sua utilização por estar fora das especificações geométricas.

Desta forma, atuar na quantidade de material depositada por área foi cogitada como uma boa estratégia para garantir que camadas fossem inteiramente depositadas com valor de altura constante até mesmo em situações em que o sólido é composto por paredes com diferentes ângulos. No caso, as duas maneiras viáveis de alterar a quantidade de material por área são realizando variações na Velocidade de Soldagem e/ou na Velocidade de Arame. A influência de cada uma delas foi analisada através de experimentos de manufatura aditiva de paredes depositadas com diferentes valores de Offset-x e buscou mapear a faixa de valores de Altura de Camadas e Ângulos de Paredes possíveis de serem obtidos através da variação da Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame. Por fim, a metodologia foi validada através da manufatura aditiva de sólidos formado por regiões com ângulos que variavam de 90 a 70°.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Considerando a problemática técnica colocada no item anterior e o fato de que parte dominante das peças reais para diferentes aplicações possuem geometrias complexas, o Objetivo Geral deste trabalho é propor uma metodologia para a parametrização de processos de soldagem a fim de serem utilizados na Manufatura Aditiva de sólidos formados por paredes finas de diferentes inclinações.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o Objetivo Geral deste projeto seja atingido, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Desenvolver e implementar em linguagem de manipulador antropomórfico estratégia para garantir iguais condições de Distância Bico de Contato-Peça e de Temperatura Interpasse na manufatura aditiva de paredes inclinadas considerando os parâmetros Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame e Offset-x (Ângulo com a Normal);
- Correlacionar a variação dos parâmetros citados com as variações nos valores da Altura de Camada e do Ângulo de Inclinação das paredes manufaturadas, avaliando limites do processo e possíveis resultados concomitantes;
- Validar a metodologia apresentada através da Manufatura Aditiva de um sólido composto por paredes finas e de diferentes inclinações utilizando os dados levantados a partir dos ensaios realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Processo de Soldagem CMT-Fronius e suas Variações

A variante do processo de soldagem MIG/MAG chamado de CMT (*Cold Metal Transfer*) é uma tecnologia desenvolvida pela empresa austríaca Fronius no ano de 2004 e é caracterizada por possuir uma tocha que apresenta um mecanismo de recuo da alimentação do arame toda vez que uma transferência por curto circuito se inicia. As primeiras aplicações do modo de transferência CMT ocorreram em 1991 na intenção de unir materiais dissimilares. Teve um grande avanço em 1997, devido a associação do atual CMT com uma ignição de arco livre de respingos e, em 1999, com larga aplicação em micro soldagem. Atualmente, o leque de aplicações do CMT aumentou consideravelmente, possuindo aplicações efetivas em todos os setores da indústria, principalmente os setores de óleo e gás (passes de raiz em tubulações e revestimentos), indústria naval (soldagem de estruturas e montagem de painéis) e empresas em geral que possuem necessidade de soldar materiais dissimilares e especiais (como duplex e superduplex) [9].

No processo CMT, o controle digital reconhece um curto circuito e contribui com o des-tacamento da gota acionando o recolhimento do arame. Este mecanismo de alimentação dinâmica fornece uma enorme vantagem ao processo CMT em relação ao nível de respingos quando comparada à soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito tradicional. Já em comparação à soldagem MIG/MAG com transferência por voo livre, a vantagem do CMT é relacionada ao menor nível de aporte térmico [10]. O baixo aporte térmico do processo CMT

Advanced torna-o indicado para soldagem de chapas finas e, devido à baixa diluição resultante, para aplicações de revestimento.

O controle implementado sobre o processo atua sobre a corrente para mantê-la em uma menor intensidade enquanto ocorre a transferência de material. É possível observar no oscilograma da Figura 2.1 que há uma fase em que a Velocidade de Arame é mantida constante para frente (fase de queima) e, assim que um curto-circuito é identificado (pela queda da tensão do arco), o arame inicia um movimento para trás, mantendo velocidade constante em direção oposta à poça de fusão durante um determinado período até que haja o destacamento da gota.

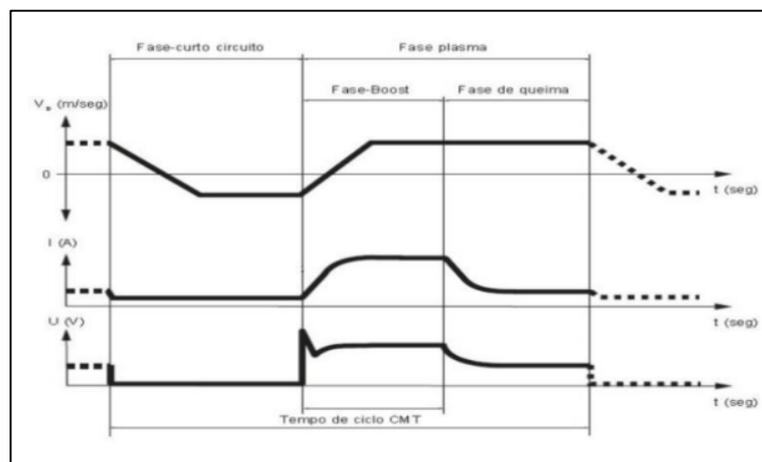


Figura 2.1 – Oscilograma do Processo CMT. Fonte: Fronius.

Naturalmente, a tensão entre o arame e a peça tende a aumentar para valores maiores que zero quando a gota é destacada. O sistema de controle, então, mantém tanto a tensão quanto a corrente em valores constantes em um patamar de alta transferência de energia (fase de boost) até entrar, novamente, na fase de queima, que é um patamar com menor nível de energia. Um esquemático da movimentação dinâmica do arame pode ser visualizado na Figura 2.2.

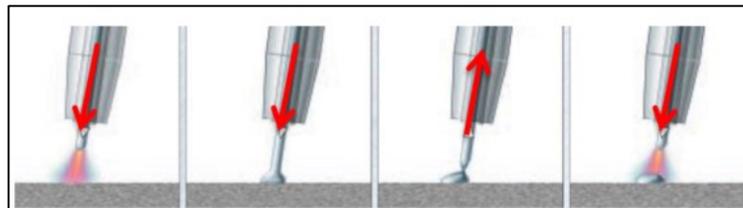


Figura 2.2 – Movimento de avanço e recuo do arame no CMT. Fonte: Fronius

Tanto o oscilograma exibido na Figura 2.1 quanto o esquemático da Figura 2.2 são relativos a versão mais simples do CMT que pode ser referenciada como CMT Standard. Esta

versão mantém o eletrodo com polaridade sempre positiva, ou seja, não há inversão de polaridades entre o eletrodo e a peça. Além disto, a transferência metálica é realizada sempre por contato aproveitando a tensão superficial da gota e da poça metálica. Já as variantes do processo CMT se baseiam em combinações de modos de transferência e/ou alternância de polaridade e se consistem em CMT Pulse (CMT +P), CMT Advanced (CMT Adv) e CMT Advanced Pulse (CMT Adv+P).

As versões que acrescentam o nome “Advanced” (Adv) utilizam a inversão da polaridade com o objetivo de reduzir ainda mais o aporte térmico à peça. O modo Advanced Pulse é caracterizado por aplicar um modo pulsado durante a polaridade positiva e o curto-circuito durante a polaridade negativa. Em todas as versões e polaridades a transferência metálica por curto-circuito é assistida pelo movimento de recuo de arame [11]. Exemplos de oscilogramas dos modos CMT Pulse, CMT Advanced e CMT Advanced Pulse são demonstrados nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5, respectivamente.

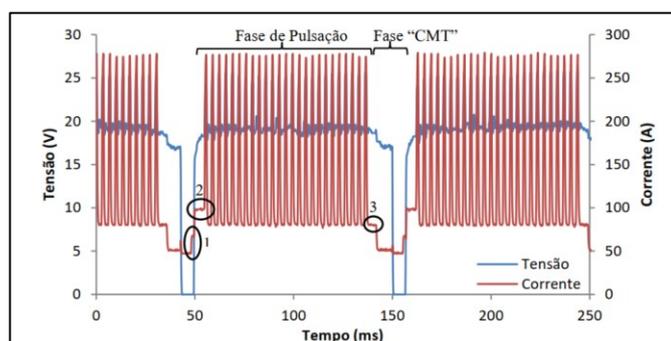


Figura 2.3 – Exemplo de Oscilograma de Tensão e Corrente para o modo CMT Pulse [11].

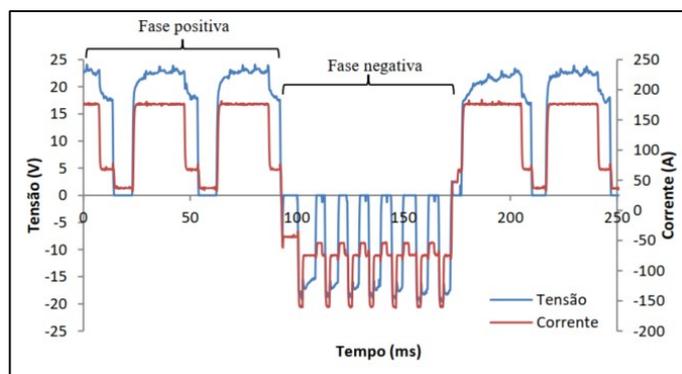


Figura 2.4 – Exemplo de Oscilograma de Tensão e Corrente para o modo CMT Advanced [11].

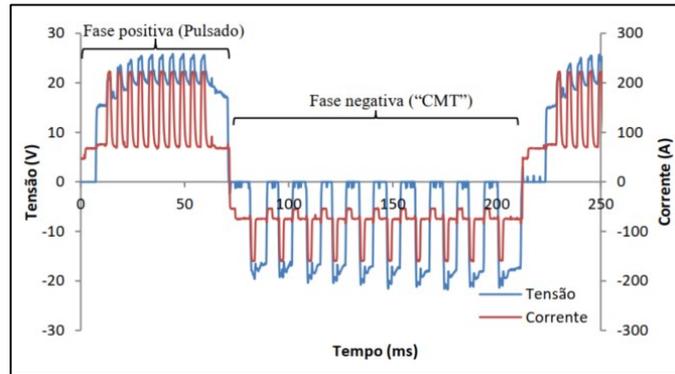


Figura 2.5 – Exemplo de Oscilograma de Tensão e Corrente para o modo CMT Advanced Pulse [11].

Como já dito, o CMT, no seu modo Standard, é considerado por muitos um processo de soldagem que possui como característica o baixo aporte térmico, apesar de haver algumas divergências quando comparado com MIG/MAG Convencional com transferência por curto-circuito [10]. Mas há um consenso em relação ao fato do CMT Advanced aportar menos calor do que os processos MIG/MAG convencionais devido a inversão de polaridade, característica de processos de soldagem MIG AC. Porém no CMT Advanced, uma variante do processo MIG AC, o aporte térmico pode ser ainda menor do que o do MIG AC tradicional devido à combinação entre a inversão da polaridade da corrente de soldagem com o movimento de recuo do arame. O aumento da taxa de fusão é proporcionado pelo uso da polaridade negativa o que acarreta em um menor aporte térmico sobre o substrato. Este fenômeno é observável em estudos sobre taxas de diluição nos quais o processo CMT Advanced obteve sempre as menores [12]. Também, o CMT Advanced possui a característica de maior controle da trajetória da gota até sua deposição, pois o arame sólido a conduz até a poça, enquanto no MIG/MAG AC a gota é transferida em voo livre, com menor direcionalidade. Esta característica é vantajosa para o CMT Advanced para aplicações de Manufatura Aditiva. Uma das dificuldades encontradas nos sistemas de soldagem MIG AC é o momento de inversão da polaridade - a inversão de polaridade com o arco aceso no MIG AC comum ocasiona muita flutuação, instabilidade e até a extinção do arco; já o CMT Advanced aproveita a inexistência do arco durante a fase de curto circuito para realizar a inversão da polaridade e isto torna o arco estável mesmo com polaridade alternada, resultando em baixos níveis de respingos e fumos.

A existência de diferentes versões do CMT proporciona a possibilidade da utilização de diferentes níveis de aporte térmico para transferir a mesma quantidade material, como mostra a Figura 2.6.

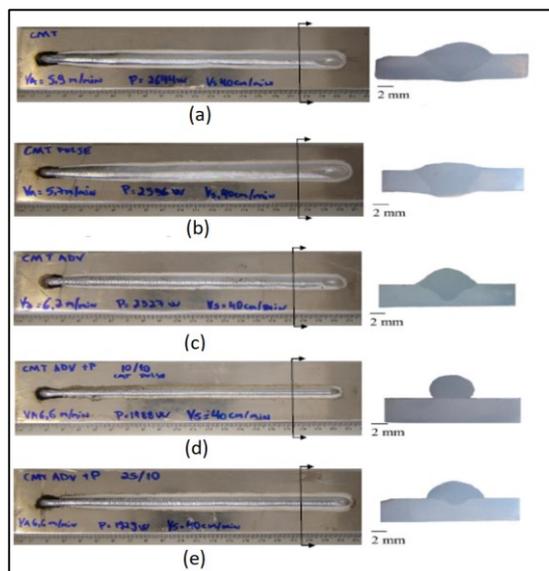


Figura 2.6 – Depósitos Realizados com o Processo: (a) MIG CMT, (b) MIG CMT Pulse, (c) MIG CMT Advanced, (d) MIG CMT Advanced Pulse com relação de 10 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo e (e) MIG CMT Advanced Pulse com relação de 25 pulsos no positivo por 10 curtos no negativo. Adaptado de [10].

Isto significa que é possível de se conseguir diferentes condições para a poça metálica e para o material depositado como, por exemplo, obter uma poça mais ou menos fluida, alterar o nível de temperatura atingido na poça e, conseqüentemente, modificar os valores de viscosidade e tensão superficial do material fundido, entre outras [11]. Nos gráficos expostos na Figura 2.7 é possível observar a relação entre Velocidade de Arame, Tensão e Corrente para as quatro versões do CMT em comparação com o processo MIG/MAG Pulsado.

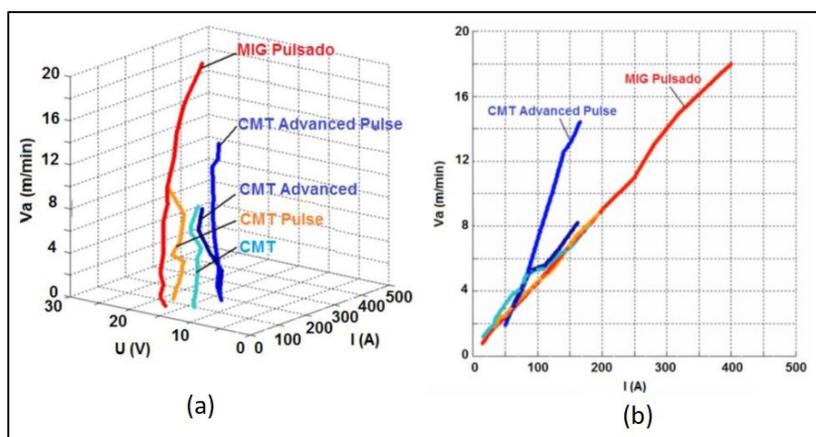


Figura 2.7 – Gráficos Comparativos entre Variantes CMT e MIG Pulsado [13].

É possível observar que para Velocidade de Arame maiores do que 5 m/min, a versão CMT Advanced Pulse apresenta uma diferença muito considerável na capacidade de fusão de

arame para a mesma corrente. Estes dados estão de acordo com os resultados obtidos por [10] e [14].

Um fato importante é relacionado ao valor de Velocidade de Arame regulado na fonte de soldagem Fronius CMT. Grande parte das operações realizadas com esta fonte são baseadas em programas sinérgicos fornecidos pelo próprio fabricante. Operar em modo sinérgico significa que para cada valor de Velocidade de Arame selecionado pelo usuário a fonte irá impor valores fixos e bem definidos de corrente e tensão em cada uma das fases que compõe a forma de onda característica da versão de CMT selecionada. Porém, em processos de soldagem MIG/MAG, a taxa de fusão de arame não depende apenas dos valores de Corrente e Tensão impostos pela fonte, podendo o valor de DBCP ser citado como um dos mais influentes neste quesito. Isto significa que, quanto maior o valor da DBCP, maior será o aquecimento do eletrodo relacionado ao Efeito Joule e, conseqüentemente, maior será a taxa de fusão do sistema. Desta maneira, o sistema de controle implementados na fonte de soldagem CMT é obrigado a atuar na Velocidade de Arame selecionada a fim de manter o arco elétrico e todo o sistema estável [15]. Da mesma forma, caso o valor da DBCP diminua, menor será o aquecimento do eletrodo relacionado ao Efeito Joule e o processo será capaz de transferir menos material por tempo, forçando o sistema a diminuir a velocidade de alimentação de arame. Este comportamento pode ser visualizado no gráfico da Figura 2.8.

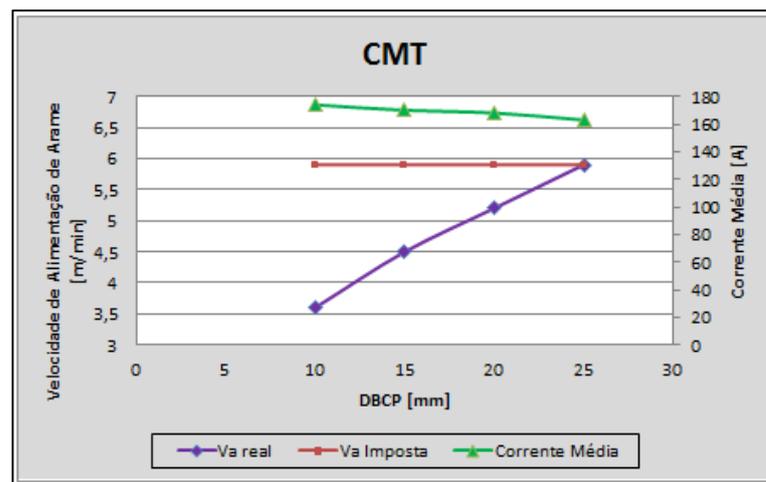


Figura 2.8 – Gráfico da Variação da Va pela alteração na DBCP – versão CMT [15].

2.2 Manufatura Aditiva

Manufatura significa obra feita a mão. A palavra é oriunda da língua latina e é produto da junção das palavras MANUS, “mão”, e FACTURA, que é conjugação do verbo “fazer”. É entendida como o processo de conversão de matérias-primas, componentes ou peças em produtos acabados que atendam às expectativas ou especificações de um cliente. Sucedeu o artesanato, no século XV, como forma de produção e organização de trabalho. Com o início da Revolução Industrial, no final do século XIX, a Manufatura passou a ser um sistema de produção de grande quantidade de itens, com produção em série, padronizada, exigindo a divisão social do trabalho e utilizando, necessariamente, a mão de obra humana para a produtividade. Mas, ao decorrer do tempo, o termo passou a ser utilizado não somente para o resultado de produtos feitos a mão como também para produtos fabricados com o uso de maquinário, tendo ou não a participação direta de mão de obra humana [16].

No entanto, entende-se, ainda, que Manufatura seja o designativo de um estabelecimento fabril onde o trabalho esteja sendo feito por grande número de pessoas, cada uma responsável por um produto ou por uma parte do processo industrial – é a atual designação de fábrica ou indústria. Por fim, a expressão “produto manufaturado” acaba sendo utilizada para referenciar qualquer bem produzido por uma indústria. Na literatura, podem ser encontrados outros termos relacionados a palavra Manufatura, como, por exemplo, Manufatura Enxuta, que se refere a uma filosofia operacional criada na fábrica da Toyota, no Japão, após a II Guerra Mundial, e possui objetivos de eliminar desperdícios da produção mantendo estoques baixos e reduzindo o número de quebras ou falhas. Manufatura Reversa e Maquinofatura são outros termos relacionados a manufatura que podem ser encontrados, onde o primeiro se refere a inovação tecnológica que visa recuperar o lixo eletrônico com o objetivo de reciclar e, assim, preservar o meio ambiente dialogando com a sustentabilidade. Já o segundo, Maquinofatura, é o nome dado a indústria mecanizada, ou seja, que utiliza máquinas e robôs e se demonstra como uma espécie de evolução da Manufatura. Seu início ocorreu na Primeira Revolução Industrial com a criação das primeiras máquinas a vapor e possibilitou a realização de operações que não dependiam da força animal, humana, dos ventos e nem das águas – esse foi o começo da manufatura moderna [16].

Na Segunda Revolução Industrial havia outras fontes de energia, como o petróleo, a água e o urânio. Já na Terceira Revolução Industrial, a partir de 1970, houve o desenvolvimento da eletrônica e o consequente surgimento da informática, o que possibilitou uma nova fase nas manufaturas, uma maior especialização das máquinas e a diminuição de erros mecânicos. O

mundo está, agora, entrando na Quarta Revolução Industrial. Estamos em uma época na qual as novas tecnologias estão permitindo que os mundos físico, digital e biológico se fundam e, assim, sustentam os motivos para definir que este processo é uma nova revolução industrial e não somente uma prolongação da última. Entre os motivos, podemos citar a velocidade dos avanços atuais que tem aumentado de forma exponencial e não linear, como nas revoluções industriais anteriores. Este novo fenômeno vem remodelando indústrias nos países em tamanha amplitude que uma transformação de sistemas inteiros de produção, gestão e governança está sendo anunciada. A indústria desta revolução industrial vem sendo chamada de Indústria 4.0, onde produtos poderão encontrar seus próprios caminhos dentro da linha de produção graças ao nível de integração proporcionado pela Internet das Coisas [17].

Cada vez mais pessoas estão conectadas por dispositivos móveis com capacidade de processamento, armazenagem e acesso ao conhecimento nunca antes imagináveis. Essas possibilidades serão multiplicadas por avanços em campos como Inteligência Artificial, Robótica, Internet das Coisas, Veículos Autônomos, Nanotecnologia, Computação Quântica, Biotecnologia, Ciência dos Materiais, Armazenamento de Energia e, por último, mas não menos importante, Impressão 3D e/ou Manufatura Aditiva.

Na literatura, muito se encontra tanto sobre **Manufatura Aditiva** quanto sobre **Impressão 3D**. Estes são termos cada vez mais encontrados nos meios de comunicação devido a nova revolução industrial pela qual estamos passando. Porém, pouco é feito para indicar a, se é que existe alguma, diferença entre eles. Primeiramente, é necessário reconhecer que ambos são relacionados a uma mesma tecnologia na qual definições sobre a peça são levadas em consideração para que material seja depositado conforme o processo escolhido. Na grande maioria dos casos as peças são construídas pela adição de camadas de material uma sobre a outra e é exatamente esta característica que o diferencia de outras tecnologias. As coisas pareciam mais fáceis na década de 1980 quando essa tecnologia era utilizada quase que exclusivamente para Prototipagem Rápida, que se baseava na criação de protótipos iniciais de modelos de produtos. Por mais de 20 anos, esta foi uma tecnologia utilizada basicamente para imitar os resultados dos métodos mais tradicionais de manufatura, como usinagem, fundição, moldagem por injeção, conformação mecânica, entre outros. Começaram a perceber que poderiam utilizar a mesma tecnologia para produzir componentes de uso final e o termo Manufatura Rápida começou a vir à tona no meio industrial, mesmo que esta não seja necessariamente uma manufatura tão rápida assim.

Por muito tempo os termos utilizados se resumiram em Prototipagem Rápida e Manufatura Rápida. Mas esses termos representavam duas possibilidades de aplicação de uma tecnologia e se tornaram insuficientes durante a explosão nas variedades de impressoras comerciais que ocorreu devido a expiração de patentes. Os principais meios de comunicação precisavam de um termo melhor e foi aí que nasceu o termo Impressão 3D. O termo se espalhou rapidamente e se popularizou, na verdade, por ser extremamente descritivo e por aproveitar o conceito de impressora que já era muito difundido entre as pessoas. Em outras palavras, os termos Manufatura Aditiva, Prototipagem Rápida e Manufatura Rápida não fazem muito sentido para pessoas que não pertencem ao campo da Engenharia. Já o termo Impressão 3D faz sentido para grande parcela das pessoas. Por outro lado, aqueles que trabalhavam nos nichos mais avançados do mercado utilizando máquinas avançadas de sinterização ou de fusão não gostariam de ter suas soluções confundidas com impressoras comuns. Este é um nicho que vem fazendo pressão para que suas máquinas e soluções sejam adotadas como alternativa aos processos tradicionais de usinagem e moldagem por injeção - nesta área o termo Manufatura Aditiva é o preferido. Essencialmente, Impressão 3D e Manufatura Aditiva são a mesma coisa. Ambas representam a técnica de fabricação baseada em camadas. Mas a escolha de um termo em detrimento ao outro depende do contexto em que a situação se insere – a peça obtida é para parecer “legal” e ficar sobre uma mesa como enfeite ou possui um propósito industrial substituindo outros processos de fabricação na busca de eficiência e sustentabilidade?

A acelerada popularização da Manufatura Aditiva correlacionada ao aparecimento de um elevado número de variantes do processo fez surgir a necessidade da criação de uma norma que fosse capaz de tornar os termos menos confusos e menos ambíguos no sentido de facilitar a comunicação e permitir uma aplicação mais ampla destas tecnologias. Foi com esta intenção que a norma **ISO/ASTM 52900:2015 – Additive Manufacturing – General Principles - Terminology** [7] foi criada a qual divide os processos de Manufatura Aditiva em 7 grandes grupos, sendo eles:

- 1) **Binder Jetting** – Processo no qual um agente aglutinante em estado líquido é seletivamente depositado para unir material em forma de pó.
- 2) **Directed Energy Deposition** – Processo no qual energia térmica concentrada é utilizada para unir materiais através de fusão durante deposição. Entende-se que para obter “energia térmica concentrada” uma fonte de energia (laser, feixe de elétron ou arco elétrico) é focada para fundir o material que está sendo depositado.
- 3) **Material Extrusion** – Processo no qual material é dispensado seletivamente através de um bocal ou orifício.

- 4) **Material Jetting** – Processo no qual gotículas de material de construção são depositadas seletivamente. Exemplos de materiais incluem fotopolímeros e ceras.
- 5) **Powder Bed Fusion** – Processo no qual a energia térmica seletivamente funde regiões de um leito de pó.
- 6) **Sheet Lamination** – Processo no qual folhas de material são colocadas para formar uma parte.
- 7) **Vat Photopolymerization** – Processo no qual fotopolímero líquido em um tanque (vat) é seletivamente curado por polimerização ativada por luz.

Os processos que atualmente vêm sendo utilizados na Manufatura Aditiva de Peças Metálicas se encaixam majoritariamente ou no grupo **2) Directed Energy Deposition** (Deposição de Energia Direcionada) ou no grupo **5) Powder Bed Fusion** (Fusão de Leito em Pó), sendo que o processo utilizado neste trabalho se encaixa no grupo 2) Directed Energy Deposition (DED) por utilizar arco elétrico como fonte de calor concentrada para fundir o material depositado.

No Apêndice A, são apresentados alguns dos processos de Manufatura Aditiva de Peças Metálicas mais pesquisados e utilizados atualmente divididos de acordo com suas respectivas características.

2.3 Manipuladores

Como discutido em seções anteriores, Manufatura Aditiva é um processo de fabricação do qual o produto é obtido em dimensões já próximas da final. Especificamente no caso de processos que utilizam leito com pó, laser ou feixe de elétrons é projetado ou disparado pelo canhão de forma a respeitar a geometria da peça desejada. Porém, no caso de processos que utilizam adição de material, é necessário que exista um movimento relativo entre o cabeçote e a peça tal que as trajetórias resultantes representem a geometria da peça desejada.

As impressoras 3D comerciais são exemplo no qual o material (polímero) e a fonte de calor (bico extrusor) são acoplados a um cabeçote movimentado por motores através de guias. Há a possibilidade da base também se movimentar de forma similar. O cabeçote e a base, em conjuntos, podem ser definidos como um manipulador cartesiano que se movimenta nas direções X, Y e Z, como ilustrado na Figura 2.9.

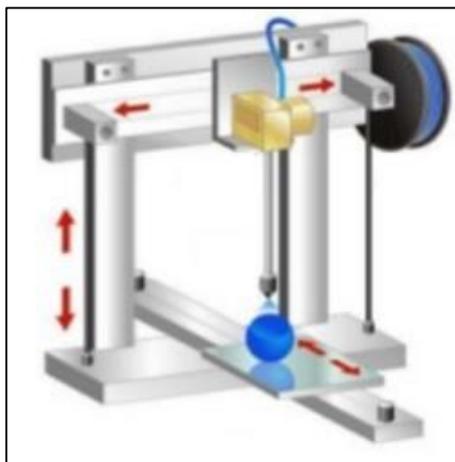


Figura 2.9 – Esquemático de uma Impressora 3D Comercial. Fonte: Google.

Já na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco, a fonte de calor é uma Tocha de Soldagem que, como já discutido anteriormente, pode ser tanto uma tocha TIG, uma MIG/MAG ou uma PTA-p e neste caso também deve existir um movimento relativo entre a tocha e a peça. Para o desenvolvimento deste projeto, o manipulador utilizado foi um manipulador do tipo antropomórfico com seis graus de liberdade. Ou seja, o manipulador utilizado é capaz de atingir pontos no espaço utilizando qualquer orientação de tocha. Porém, para este trabalho, um manipulador com apenas três graus de liberdade já seria suficiente, pois foi definido que não haveria rotação da tocha e a mesma se manteria sempre perpendicular ao substrato/peça.

Toda a série de corpos rígidos interligados por juntas que compõe um robô antropomórfico não teria nenhuma utilidade se não estivesse integrado a um sistema de controle. Esse sistema de controle é o responsável em determinar como o Servo motor de cada uma das juntas do robô deve se movimentar para que a TCP (Tool Center Point) configurada realize a trajetória desejada. Cada um dos dois robôs presentes no LABSOLDA é controlado por um controlador modelo DX100. Uma única unidade desse controlador é capaz de controlar até 8 robôs, totalizando 72 eixos, em aplicações que demandam tais configurações. A Figura 2.10 exhibe um dos robôs antropomórficos existentes no LABSOLDA.



Figura 2.10 – Manipulador Antropomórfico *Motoman HP-20D*.

O Controlador dos manipuladores antropomórficos geralmente utiliza um controle chamado de *Teach Pendant*, exibido na Figura 2.11, como forma de interface com o usuário. Através deste *Teach Pendant*, o usuário obtém domínio sobre o robô e se torna capaz de movimentar ou cada um dos eixos de forma individual ou a TCP em coordenadas cartesianas ou polares. Algoritmos contendo trajetórias e lógicas sequenciais podem ser desenvolvidos interativamente movimentando o manipulador até pontos da trajetória e realização a gravação destes pontos em uma operação chamada de *Teaching*, relativo a aprendizagem. Ou seja, o operador “ensina” o manipulador a trajetória desejada através da marcação, ou registro, de pontos no espaço.



Figura 2.11 – *Teach Pendant* do controlador DX100 da Motoman.

Uma outra forma de programar manipuladores em geral é desenvolvendo os algoritmos de movimentação em um computador e depois transferindo-os ao controlador através de uma porta USB na chamada Programação Off-line. Além de mais elegante, esta abordagem de programação evita que as atividades da célula e do manipulador real sejam interrompidas por períodos demasiadamente longos diminuindo os impactos sobre a produtividade e reduzindo a probabilidade de acidentes devido a colisões do robô com outros equipamentos da célula devido a erros de programação [18].

Para aplicações de Manufatura Aditiva, considera-se apenas a segunda abordagem citada (Programação Offline) devido a precisão exigida no processo e ao elevado número de pontos necessários para descrever trajetórias que representem peças completas. O fato da programação em modo *Teaching* exigir que o manipulador seja movimentado a cada um dos pontos para realizar o seu registro torna a primeira forma de programação citada (programação em modo *teaching*) extremamente indesejada em aplicações de manufatura aditiva. No Apêndice B deste documento é apresentada uma metodologia para calibração de ferramenta e no Apêndice C é apresentada a estrutura de programação aplicada nos algoritmos INFORM III, utilizados no controlador do manipulador utilizado.

2.4 Influência dos Parâmetros de Soldagem sobre a Geometria do Cordão Depositado

Na soldagem a arco, a geometria resultante dos cordões depositados é influenciada por diversas variáveis que incluem desde os Parâmetros Elétricos configurados na fonte de soldagem, compreendidos por Tensão e/ou Corrente, passando pelos Parâmetros de Trajetórias, como Velocidade de Soldagem e Offset- x^2 , e chegando até as Características Físicas do processo, como a Temperatura Interpasse e Capacidade de Dissipação de Calor do sistema. A soma destas variáveis junto a uma série de outros fatores irá definir não só a geometria de cada um dos cordões como também as propriedades metalúrgicas da peça final [5].

Como será exposto na seção 3.1, os Compiladores de Trajetórias para Manufatura Aditiva se baseiam tanto em informações obtidas do modelo CAD da peça a ser fabricada quanto no valor da Espessura de Fatiamento informado pelo operador para que, assim, a trajetória correspondente a manufatura aditiva do sólido desejado seja gerada. O valor da Espessura de Fatiamento informado pelo operador deve corresponder ao valor da Altura de Camada que irá resultar após o material ser depositado.

² Deslocamento horizontal entre o posicionamento da deposição de duas camadas subsequentes.

A estimativa da altura média dos cordões pode ser realizada utilizando Modelos Fenomenológicos, os quais buscam descrever os principais fenômenos envolvidos no processo de soldagem utilizando-se de equações que representam os princípios básicos de conservação de massa, de energia e da quantidade de movimento. Muitas vezes, estas equações se tornam complexas demais e não representam a realidade suficientemente bem devido a diversos fatores como não idealidades e dificuldades na medição de determinadas grandezas. É possível, também, que a estimativa da altura seja realizada utilizando-se de Modelos Empíricos, nos quais o processo é visto como uma “caixa-preta” e funções de transferência são utilizadas para representar os mecanismos de causa/efeito entre as variáveis independentes e as variáveis dependentes do processo [19].

De toda forma, mesmo que um valor ótimo de Altura de Camada seja encontrado para uma determinada combinação de parâmetros, dificilmente este valor será o mesmo se alguma condição se alterar. Em outras palavras, o valor da altura dos cordões é muito sensível a variações nos parâmetros elétricos e nas condições de deposição. Esta característica aumenta a probabilidade que camadas sejam depositadas com valores de altura diferentes do esperado caracterizando, desta maneira, o que pode ser chamado de erro de previsão de Altura de Camada. Este tipo de erro se acumula rapidamente durante as deposições fazendo com que o valor de DBCP originalmente escolhido se altere tanto para um valor menor quanto para um valor maior do que o esperado pelo operador, sendo ambos os casos prejudiciais ao processo. Portanto a necessidade de manter as condições de deposição inalteradas para o bom desenvolvimento das operações de soldagem a arco, o que também inclui as operações de manufatura aditiva via soldagem a arco, se apresenta consideravelmente relevante.

Em processos de soldagem **MIG/MAG Convencionais**, a fonte de soldagem utilizada é uma fonte de tensão o que significa que o valor da tensão aplicada ao processo é constante e bem definido. O sistema de controle implementado na fonte de soldagem atuará para manter a tensão do processo sempre no valor especificado pelo operador. A corrente elétrica resultante será decorrente da relação entre esta tensão aplicada ao processo e a impedância total do circuito [20]. Nestes processos, alterações na Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) alteram significativamente o comprimento do *Stick out*³ ao mesmo tempo que pouco influenciam no comprimento do arco. Porém, mesmo que o comprimento do arco tenda a se manter constante, sua impedância se altera brutalmente devido aos complexos fenômenos físicos envolvidos na formação do plasma, o que altera o valor da Corrente de Soldagem. Além disto, alterações no

³ *Stick out* é o comprimento do eletrodo consumível que compreende a distância entre o fim do bico de contato e o arco.

comprimento do *Stick out* alteram seu perfil térmico devido a variação das influências do Efeito Joule sobre o aquecimento do eletrodo, o qual se torna mais frio para comprimentos de *Stick out* menores e mais quente para comprimentos de *Stick out* maiores, assim como pode ser observado na Figura 2.12.

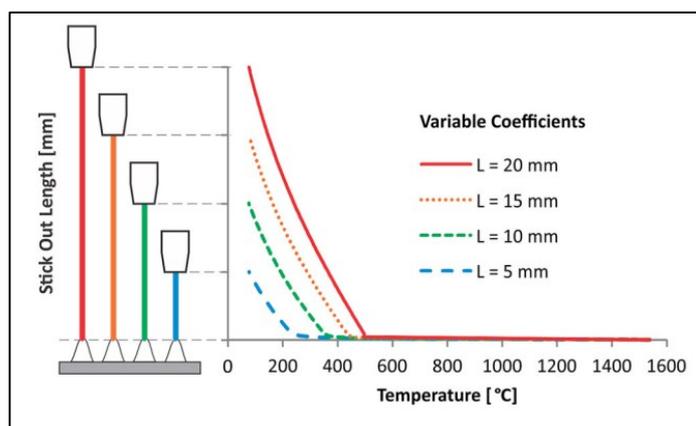


Figura 2.12 – Perfil térmico do Eletrodo de Arame para Diferentes Comprimentos. Adaptado de [21].

Foi obtido um maior grau de pré-aquecimento referente ao Efeito Joule nos eletrodos de maiores comprimentos. Duas regiões principais podem ser identificadas no gráfico exposto na Figura 2.12, sendo uma maior que se inicia no Bico de Contato e seu aquecimento é influenciado principalmente pelo Efeito Joule; e outra muito menor, localizada na ponta do eletrodo, correspondente ao Aquecimento Anódico e que promove um aumento acentuado da temperatura devido ao calor do arco elétrico. As influências destes fenômenos atuam concomitantemente e seus efeitos sobre a geometria dos cordões se tornam bastante visíveis, assim como exposto na Figura 2.13.

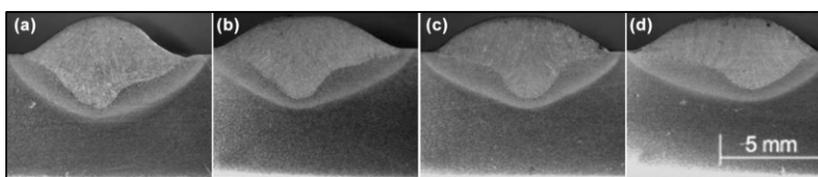


Figura 2.13 – Seções Transversais de Cordões de Solda. (a) DBCP = 7 mm, (b) DBCP = 12 mm, (c) DBCP = 17 mm e (d) DBCP = 20 mm [21].

As imagens deixam claro que a variação da Distância Bico de Contato-Peça influencia significativamente na geometria dos cordões depositados utilizando o processo de soldagem MIG/MAG Convencional. Deposições realizadas com menores valores de DBCP, que consequentemente resultam em maiores Correntes de Soldagem, tendem a atingir uma maior pene-

tração e maior taxa de diluição. Este comportamento pode ser explicado devido a campos magnéticos maiores, maiores forças magnéticas e maior pressão de arco sobre a poça de fusão. Além disto, devido a maiores intensidades de Corrente de Soldagem, o *momentum* correspondente é, também, acrescido e o impacto das gotas contra o substrato se torna mais violento [21].

Já na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco, os processos de soldagem utilizados geralmente não são os convencionais e utilizam fontes com controle de corrente, ou seja, o controle implementado na fonte impõe ao processo um valor de corrente bem definido e a tensão resultante é consequência do valor da impedância do circuito. Porém esta abordagem não impede que o processo se torne imune a variação no comprimento do *Stick out*. Mesmo que neste caso a variação do valor da impedância do circuito consequente da variação do comprimento do *Stick out* não altera o valor da Corrente de Soldagem, a variação da influência do Efeito Joule sobre o aquecimento do eletrodo persiste, o que altera consideravelmente a capacidade de fusão de arame. No caso do processo CMT, o sistema de controle atua sobre a Velocidade de Arame para contornar a variação da taxa de fusão de arame e manter a estabilidade do processo, assim como descrito mais detalhadamente na Seção 2.1.

A variação da DBCP durante a soldagem geralmente não é desejável por acarretar diversas variações na solda. Quando a soldagem é realizada de forma manual, a constância do valor da DBCP depende da habilidade do soldador e inevitavelmente alguma variação irá ocorrer, porém de acordo com a experiência do profissional este pode até utilizar-se destas variações para atingir o resultado desejado. Mas quando a soldagem é realizada de forma automatizada o comum é que a DBCP seja mantida sempre em um valor constante. Se em uma soldagem de união, automatizada, a DBCP variar uma certa quantidade devido à má programação do manipulador, talvez a solda resultante pode não ser a esperada, mas isto não chega a inviabilizar o processo. Já na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco, onde dezenas ou até centenas de camadas de material são depositadas uma sobre a outra, se por algum motivo o valor da DBCP variar, a tendência é que essa variação se repita e se acumule camada a camada. Se essa variação for negativa, rapidamente poderá ocorrer a colisão da tocha de soldagem com a peça sob processo de manufatura, assim como ilustrado na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Colisão devido a Erro na Estimativa da Altura de Camada.

No caso da peça da Figura 2.14, o valor da altura das camadas depositadas resultou maior do que o programado pelo operador. Após a deposição de apenas 14 camadas, o processo teve que ser interrompido devido a colisão do bocal da tocha de soldagem contra o metal ainda fundido, como é possível observar na porção superior esquerda da peça exposta.

Outro desafio relacionado à Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco se apresenta na fabricação de peças compostas por geometrias que sofrem alterações de diâmetros, rotações em torno do eixo vertical ou deslocamento do centro geométrico. O desafio é devido ao fato de que o manipulador, ao realizar estas operações citadas, não depositará uma camada exatamente uma sobre a outra, mas, sim, um tanto quanto deslocada em relação ao cordão precedente. Isto faz com que a altura resultante das deposições realizadas seja menor do que quando depositadas exatamente uma sobre a outra. A Figura 2.15 demonstra o efeito da perda da proteção gasosa devido ao aumento excessivo da DBCP na manufatura de uma peça que possui ao longo de sua altura efeitos como incremento de diâmetro, rotação e deslocamento do centro.



Figura 2.15 – Efeito da perda da proteção gasosa devido ao aumento excessivo da DBCP.

Na peça da figura em questão, é possível observar um alto nível de oxidação devido à perda de eficiência do gás de proteção. A degradação da proteção gasosa ocorreu devido ao aumento demasiado da Distância Bico de Contato-Peça e também pode ser classificada como

uma alteração nas condições de deposição. É importante ressaltar que a peça foi manufaturada utilizando o processo de soldagem CMT-Advanced da fabricante Fronius, o qual não pode ser caracterizado como processo de soldagem MIG/MAG Convencional por utilizar controle de corrente e alimentação dinâmica⁴ de arame. Tais características de controle permitiriam que o processo continuasse transferindo material de forma satisfatória mesmo com valores de DBCP considerados extremamente altos (>23 mm), porém a contaminação da peça com ar atmosférico torna tal operação inviável.

Um outro aspecto que influencia a geometria dos cordões depositados está relacionado a Temperatura Interpasse. A molhabilidade das deposições realizadas utilizando-se processos de soldagem MIG/MAG Convencional, para um mesmo material, é diretamente relacionada a temperatura do processo no sentido de quanto maior a temperatura envolvida mais a gota se espalhará sobre o substrato/peça e conseqüentemente mais largo e mais baixo será o cordão [22]. Isto significa que, se o processo atingir determinada temperatura, os cordões se espalharão a tal ponto de não se sustentarem sobre a camada anterior e não formarão, assim, uma parede como é o desejado em aplicações de manufatura aditiva. Além disto, o valor da Temperatura Interpasse gera influências sobre a microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga em uniões realizadas por soldagem [23].

Na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco, se a temperatura do substrato ou da peça se alterar consideravelmente por algum motivo como, por exemplo, o acúmulo de calor devido à baixa capacidade de dissipação térmica do sistema e/ou intervalos de tempo entre deposições insuficiente para um resfriamento satisfatório, a geometria das deposições também será alterada – maior calor envolvido tende a gerar deposições com menor Altura de Camada e vice-versa. A importância desta relação pode ser observada na Figura 2.16 na qual são exibidas duas paredes manufaturadas aditivamente no LABSOLDA utilizando exatamente os mesmos parâmetros elétricos e de trajetórias, com deposições realizadas da direita para esquerda da figura, porém com tempos de resfriamento diferentes.



Figura 2.16 – Influência do Tempo de Resfriamento entre Deposições.

⁴ Maiores detalhes na Seção 2.1.3.

Como é possível observar, a diferença entre as geometrias das paredes é notável. A da esquerda, na qual o tempo de resfriamento foi o mais próximo possível de zero, obteve uma geometria na qual a molhabilidade das camadas aumentou drasticamente durante a deposição de cada uma delas. A quantidade de material depositada por área foi sempre a mesma, porém é possível observar que o final da parede da esquerda resultou muito menor que o início, passando a sensação de que menos material foi depositado naquela porção. Porém, na realidade, o que ocorreu foi que, conforme cada cordão era depositado, o valor de Altura da Camada diminuía devido ao aumento de molhabilidade relacionado a temperatura da peça. Tal comportamento foi confirmado ao medir a largura da parede e constatar um aumento considerável nas regiões nas quais a altura resultou menor.

Já a parede da direita foi manufaturada utilizando um tempo de resfriamento de 60 segundos após a deposição de cada camada. A inclusão deste tempo de resfriamento no algoritmo de deposição foi a única alteração entre a manufatura da parede da esquerda e a manufatura da parede da direita e as paredes resultaram muito diferentes uma da outra. Uma das principais diferenças foi a maior homogeneidade nos valores de Largura e Altura de Camada na parede na qual o tempo de resfriamento foi utilizado. Outro aspecto perceptível foi o valor da Altura de Camada resultar muito maior, também, na parede na qual o Tempo de Resfriamento foi utilizado e este fato está relacionado a menor Temperatura Interpasse. Este aumento no valor da Altura de Camada foi tão acentuado que o processo necessitou ser interrompido após a deposição de apenas 14 camadas devido a colisão do bocal da tocha de soldagem com a última camada, ainda em estado líquido, como é possível visualizar na própria Figura 2.16.

O acúmulo de calor é uma das maiores problemáticas na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco e muitos trabalhos encontrados na literatura recente são dedicados a este tema, como por exemplo em [24], trabalho o qual não só aborda questões sobre variações na geometria dos sólidos manufaturados devido ao acúmulo de calor, como é possível observar na Figura 2.17, mas aborda também questões sobre a estabilidade do arco, variações na microestrutura da peça formada, propriedades mecânicas e de corrosão além de propor um método de resfriamento utilizando CO₂ criogênico líquido.

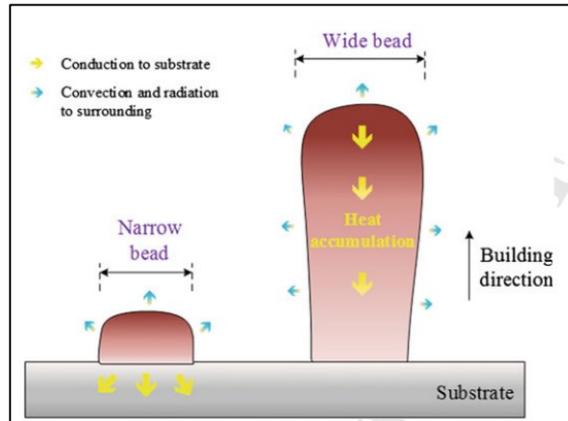


Figura 2.17 – Variação da Largura de Camada ao Longo da Altura da Parede [24].

Nos processos de soldagem, há uma quantidade mínima de calor a ser aportado para que a transferência metálica seja realizada de maneira estável. Esta quantidade de calor aportado é relativa a cada processo sendo que os convencionais inevitavelmente acabam por aportar níveis maiores. Já os não-convencionais, como o CMT Advanced que utiliza não só Corrente Alternada como também Alimentação Dinâmica, são capazes de transferir material de maneira satisfatória aportando menos calor. Outro processo de soldagem não convencional é o chamado TIG Hot-Wire, processo o qual utiliza-se o conceito de eletrodo não-consumível dos processos TIG Convencionais, porém com aquecimento do arame de adição. Esta abordagem permite que material seja transferido de maneira estável utilizando-se menores níveis de potência no arco, ou seja, com o arco aportando menos calor do que no TIG Convencional. Em [25], TIG Hot-Wire foi utilizado para manufaturar aditivamente cubos de titânio (Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si) e verificar os efeitos de diferentes configurações de corrente de arco e corrente de aquecimento de arame tanto sobre a geometria das deposições quanto sobre o nível de refinamento dos grãos. A Figura 2.18 exibe esquemáticos sobre diferentes geometrias de camadas e suas respectivas microestruturas predominantes. Já a Tabela 2.1 exibe os parâmetros utilizados em cada uma das quatro situações.

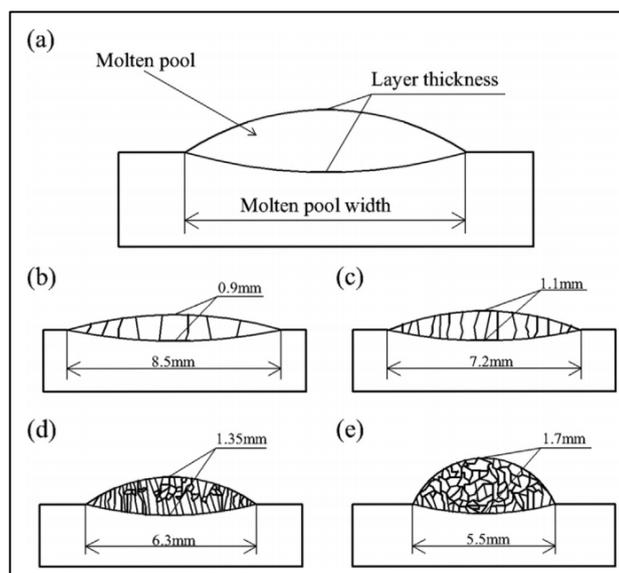


Figura 2.18 – Esquemático das Geometrias e Respectivas Microestruturas [25].

Tabela 2.1– Divisões das Instruções da Linguagem INFORM III.

	(b)	(c)	(d)	(e)
Hot-wire current(A)	0	60	80	100
Average current(A)	103.2	80.4	67	57.5
Average voltage(V)	14.5	13.6	12.8	11.5
Arc heat input(J/mm)	207	181	142	137
Wire feed velocity(cm/min)	100	100	100	100
Layer thickness(mm)	0.9	1.15	1.3	1.7

Um outro grande desafio na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco é a retirada de calor das aplicações que exigem altos níveis energéticos e até mesmo de aplicações onde objetiva-se peças de menores dimensões - aplicações, estas, que podem se tornar inviável devido à falta de dissipação térmica suficiente mesmo com a utilização de processos e parâmetros que aportam o mínimo de calor possível. Em [26], foi utilizado um sistema baseado em refrigeração termoelétrica, também conhecido como dispositivo Peltier, para investigar experimentalmente sua eficiência e a qualidade das deposições resultantes. As deposições foram realizadas sobre uma parede já existente devido às características físicas do sistema de refrigeração, como pode ser observado na Figura 2.19.

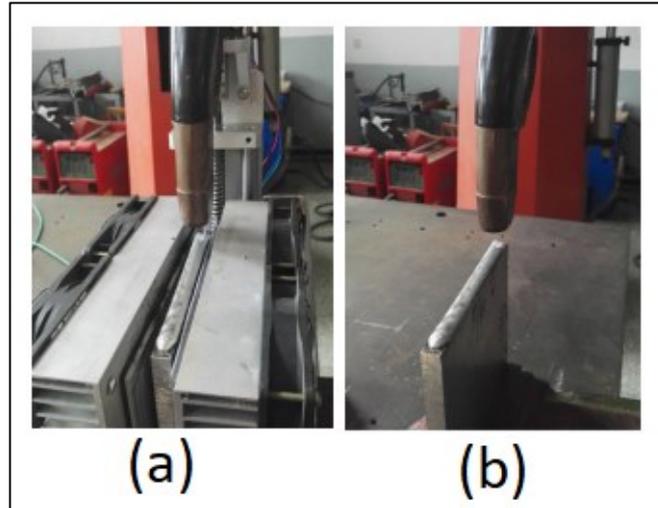


Figura 2.19 – Deposição com Resfriamento Ativo em Tempo de Processo. Adaptado de [26].

Resultados obtidos no estudo em questão demonstram que o sistema de refrigeração utilizado foi capaz de compensar um aporte térmico excessivo o que permitiu um aumento de 9 a 15% na Velocidade de Arame e uma redução no tempo de resfriamento entre passes de 42 a 54%, sempre mantendo um nível de qualidade pré-estipulado.

Já em [27] foram utilizadas técnicas de elementos finitos para desenvolver um modelo para estudar a propagação de calor em componentes circulares manufaturados aditivamente via soldagem a arco. A evolução do calor, o ciclo térmico e o gradiente de temperatura tanto na poça de fusão quanto nas camadas depositadas são analisados, como é possível observar na Figura 2.20, e comparados com valores obtidos experimentalmente.

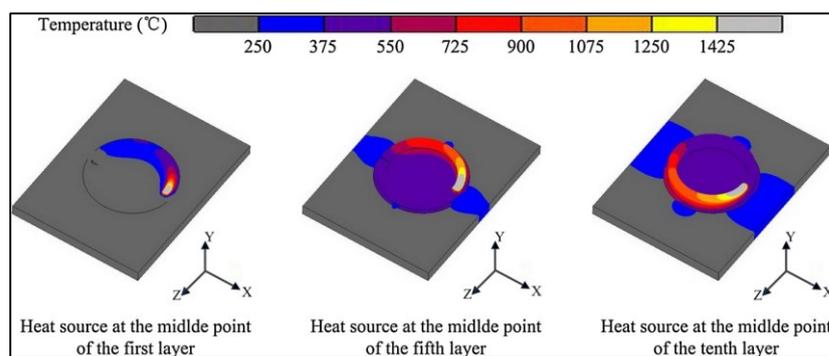


Figura 2.20 – Simulação da Propagação e Acúmulo do Calor [27].

O trabalho demonstrou que conforme camadas são depositadas na manufatura aditiva de cilindros há um acúmulo de calor que faz com que o tamanho da região de alta temperatura aumente constantemente tanto no substrato quanto na poça de fusão.

Por fim, em [28] é estudado a influência da Temperatura Interpasse no nível de porosidade e nas propriedades mecânicas de peças de alumínio 5356 manufaturadas aditivamente.

Dois valores de Temperatura Interpasse foram avaliados, sendo eles 50 e 100°C, e utilizou-se de Tomografia Computadorizada para mensurar a quantidade e o tamanho dos poros. O trabalho conclui que peças manufaturadas utilizando valores mais elevados de Temperatura Interpasse apresentaram menores níveis de poros, sendo compostos majoritariamente por poros de dimensões pequenas, quando comparadas com peças manufaturadas utilizando menores valores de Temperatura Interpasse, que revelaram a presença de poros com dimensões consideravelmente grandes. Segundo os autores, a maior variação de temperatura nas amostras manufaturadas com menores valores de Temperatura Interpasse pode ter contribuído para a união de pequenos poros tornando-os maiores. Também foi observado uma maior concentração de poros nas camadas superiores das amostras manufaturadas com maiores valores de Temperatura Interpasse, o que pode ser explicado pela flutuação dos poros camada a camada e a uma maior exposição do metal líquido ao ar atmosférico. Ademais, as amostras manufaturadas com maiores valores de Temperatura Interpasse e amostras testadas na direção horizontal apresentaram maiores resistência a tração. Finalmente, diferença considerável foi observada no tamanho dos grãos das amostras manufaturadas com diferentes valores de Temperatura Interpasse, sendo que maiores valores de Temperatura Interpasse contribuem para o crescimento dos grãos.

2.5 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais são um tipo de *Machine Learning* e possuem como característica mais marcante a sua estruturação semelhante à rede de neurônios do nosso cérebro: são sistemas compostos por vários nós que se interconectam em diversas ramificações. As redes neurais “aprendem” por meio da atualização e ampliação desses laços e interconexões [29]. Na Figura 2.21 é exibido um esquemático de uma rede neural.

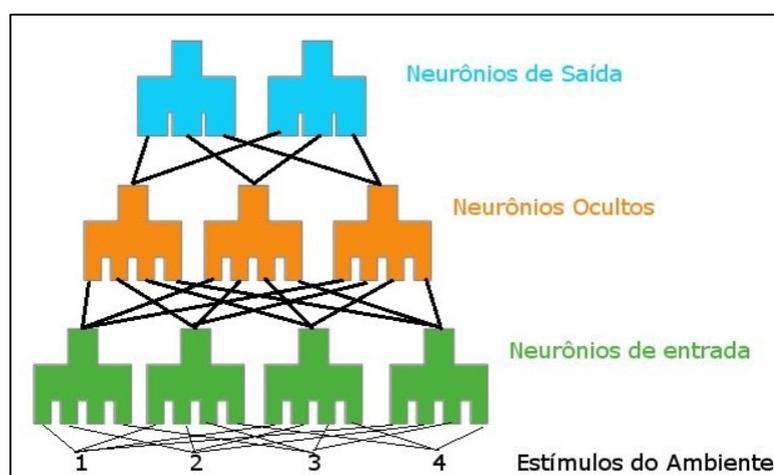


Figura 2.21 – Esquemático da Estrutura de uma Rede Neural Artificial [29].

O Potencial de uma Rede Neural Artificial não está na arquitetura desta rede, mas na forma como ela processa informações: Redes Neurais Artificiais não rodam programas, elas aprendem. A grande vantagem disto é que, para executar tarefas, uma rede neural não precisa guardar instruções de comando e executá-las de forma lógica, como em um computador tradicional. Ao invés disto, a rede aprende o que é preciso ser feito atribuindo “pesos” para cada um dos “neurônios” através do que é chamado de “treinamento de uma Rede Neural” realizado com a utilização de conjuntos de dados obtidos do processo em questão [29]. Na Figura 2.22 são exibidas comparações entre o cérebro humano e uma Rede Neural Artificial.

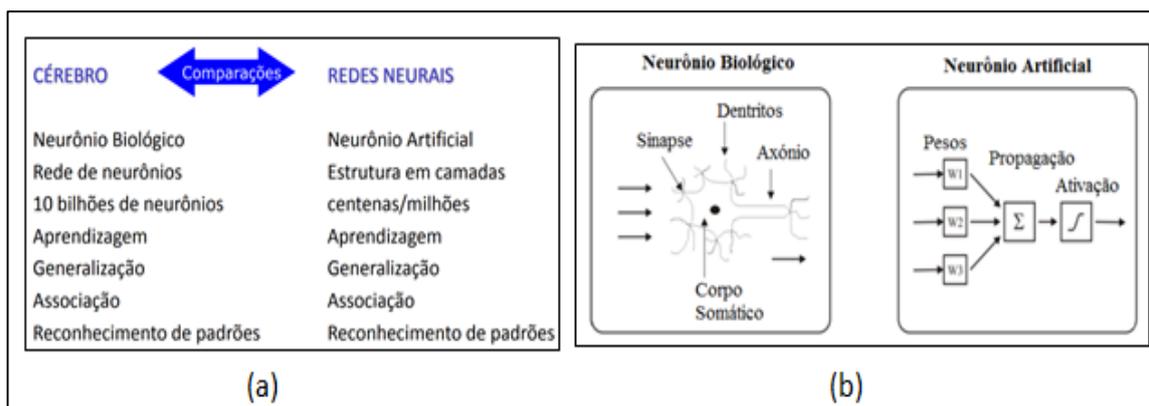


Figura 2.22 – Comparações entre Cérebro e Rede Neural Artificial. (a) Nível Macro. (b) Nível Micro. [30]

Os pesos armazenam o conhecimento (memória) da rede neural artificial e são ajustados de acordo com o erro encontrado. A rede é treinada até que o erro entre a saída e o objetivo seja satisfatório se tornando capaz de generalizar e reconhecer padrões distintos dos usados no treinamento [30]. Desta maneira, a utilização de Redes Neurais Artificiais se torna propícia em aplicações nos quais são necessários reconhecimentos de padrões ruidosos e/ou incompletos ou em cenários em que regras claras não podem ser facilmente formuladas, situações nas quais explicações para os resultados podem ser desprezadas.

O desafio principal no desenvolvimento de uma Rede Neural Artificial consiste em definir um algoritmo de aprendizagem para a atualização dos pesos das camadas intermediárias. A ideia central do problema pode ser resumida no cálculo do erro entre os valores de saída fornecidos pela última camada e dados conhecidos oriundos do processo em questão que são retro propagados para as camadas intermediárias [30]. Um neurônio é considerado ser um elemento adaptativo. Seus pesos sinápticos são modificáveis dependendo do algoritmo de aprendizado que pode ser um algoritmo de aprendizado tanto supervisionado quanto um algoritmo de aprendizado não-supervisionado. No primeiro, dependendo do sinal de entrada que recebem, os neurônios têm seus valores de saída associados a uma resposta diante de um aprendizado supervisionado por uma espécie de “professor” que indica explicitamente um comportamento

bom ou ruim. Já no segundo, o sinal do “professor” não está disponível e não há informação de erro que possa ser utilizada para correção dos pesos sinápticos, assim o neurônio modificará seus pesos baseado somente no sinal de entrada e/ou saída [31].

Os algoritmos de aprendizado para Redes Neurais Artificiais são complexos e seus respectivos desenvolvimentos exigem o domínio de toda uma teoria ministrada em cursos relacionados principalmente à Ciência da Computação. Porém existem muitos softwares que oferecem bibliotecas ou ferramentas (*tool boxes*) para aplicações de Redes Neurais Artificiais, como é o caso do software MATLAB. Uma das principais vantagens deste software é a facilidade de escrever e depurar um programa se comparado a outras linguagens de programação, tais como C, Basic, Pascal ou Fortran. Além disto, possui bibliotecas e ferramentas para Lógica Fuzzy, Otimização de Sistemas, *Wavelets*, Cálculo Simbólico, Processamento de Sinais e outras. A utilização do *toolbox* de redes neurais no MATLAB pode ser através de interface gráfica (NNTool), linhas de comando ou arquivo “.m” [32]. Desta maneira, todo o potencial deste modelo computacional de aprendizado de máquinas intitulado de Redes Neurais Artificiais pode ser explorado e aproveitado por pesquisadores sem a necessidade do desenvolvimento de complicados algoritmos de aprendizado bastando apenas um conjunto de dados do processo real e conhecimentos básicos de programação em software como o MATLAB.

3 DESENVOLVIMENTOS ANTERIORES

Estes trabalhos foram realizados pelo autor desta dissertação no LABSOLDA que é um laboratório de soldagem e mecatrônica ligado à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Maiores informações sobre o laboratório podem ser encontradas no site www.lab-solda.ufsc.br.

Para que o tema desta dissertação pudesse ser explorado, todo um conhecimento e estrutura mínima relacionados a Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco foram acumulados nos últimos anos no LABASOLDA. A pesquisa em manufatura aditiva se iniciou no laboratório com um trabalho de uma disciplina voltada a Automação da Soldagem ministrada como optativa ao curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSC e partiu do desafio de depositar cordões sobrepostos em camadas utilizando a infraestrutura existente no laboratório relacionada a soldagem de união. Desde então, trabalhos e pesquisas continuaram a ser realizados e alguns destes desenvolvimentos em procedimentos, softwares e periféricos serão detalhados nas próximas seções.

3.1 Geradores de Trajetórias

Como já exposto na Seção 2.2, a Manufatura Aditiva é um processo de fabricação no qual o modelo CAD da peça desejada é utilizado para definir as trajetórias de deposição de material realizadas por um manipulador. A utilização de um modelo CAD se deve à possibilidade de obter informações sobre suas dimensões de maneira precisa ao decompô-lo em uma Nuvem de Pontos. Se entende por “Nuvem de Pontos” um conjunto de pontos expresso em um mesmo sistema de coordenadas e geralmente definidos por X, Y e Z [33].

Uma Nuvem de Pontos acaba se constituindo em um arquivo de texto em algum formato específico (txt, xls, doc, entre outros) no qual os pontos geralmente não se encontram em nenhuma ordem específica. O papel dos Geradores de Trajetória é organizar estes pontos de forma lógica e sequencial de maneira que as deposições de material resultem no sólido desejado. Por exemplo, no LABSOLDA, para a realização da manufatura aditiva de paredes tem-se utilizado Deposições Diretas ou Deposições Reversas [34], tanto com apenas uma deposição por camada, para a manufatura de paredes finas, quanto mais do que uma deposição por camada, para a manufatura de paredes espessas. Já para a manufatura sólidos que podem ser gerados por superfícies de revolução tem-se utilizado a trajetória em forma de helicóide com o qual é possível a manufatura de sólidos inteiros sem que o arco seja extinto ao menos uma única vez.

De todos os pontos presentes em uma típica Nuvem de Pontos, somente uma parte deles estará presentes na sequência que representa a trajetória a ser executada pelo manipulador. A quantidade de pontos presentes no Programa Motoman depende tanto da geometria do sólido quanto da dos cordões depositados, pois estas definirão a tamanho dos incrementos tanto horizontais, no caso de sólidos formados por paredes espessas, quanto verticais, no caso do Incremento em Z para manter a Distância Bico de Contato-Peça constante.

Para que ensaios de Manufatura Aditiva fossem viáveis no LABSOLDA utilizando o manipulador antropomórfico demonstrado na Seção 2.3, foi necessário desenvolver um método de programação eficiente no qual *jobs* contendo sequência de movimentos que descrevessem trajetórias desejadas fossem obtidos de forma ágil. Era essencial que o usuário, no caso um pesquisador vinculado ao laboratório, tivesse a liberdade de definir as dimensões e alterá-las facilmente entre um ensaio e outro. Além disto, era necessário desenvolver alguma metodologia para extrair informações sobre a geometria de modelos CAD e utilizá-las como base para a geração das trajetórias. O desenvolvimento destes dois tipos de compiladores de trajetórias será exibido nas duas seções a seguir.

Após obter as informações das dimensões do sólido e dos incrementos, tanto entre cordões paralelos quanto entre as camadas, o compilador calcula todos os pontos necessários para gerar as trajetórias que representam a peça. Na Figura 3.3, é possível visualizar os 16 primeiros pontos projetados para o sólido que está sendo tratado neste exemplo. Para cada um dos pontos, o índice [1][n] representa a coordenada X, o índice [2][n] representa a coordenada Y e o índice [3][n] representa a coordenada Z.

```

===== PONTOS DEPOIS DE CONDICIONAR: <=====
p[0][0]= 0 p[0][1]= 0 p[0][2]= 0 p[0][3]= 0 p[0][4]= 0
p[1][0]= 0 p[1][1]= 30000 p[1][2]= 0 p[1][3]= 0 p[1][4]= 0
p[2][0]= 10000 p[2][1]= 0 p[2][2]= 0 p[2][3]= 0 p[2][4]= 0
p[3][0]= 10000 p[3][1]= 30000 p[3][2]= 0 p[3][3]= 0 p[3][4]= 0
p[4][0]= 20000 p[4][1]= 0 p[4][2]= 0 p[4][3]= 0 p[4][4]= 0
p[5][0]= 20000 p[5][1]= 30000 p[5][2]= 0 p[5][3]= 0 p[5][4]= 0
p[6][0]= 30000 p[6][1]= 0 p[6][2]= 0 p[6][3]= 0 p[6][4]= 0
p[7][0]= 30000 p[7][1]= 30000 p[7][2]= 0 p[7][3]= 0 p[7][4]= 0
p[8][0]= 0 p[8][1]= 0 p[8][2]= 10000 p[8][3]= 0 p[8][4]= 0
p[9][0]= 0 p[9][1]= 30000 p[9][2]= 10000 p[9][3]= 0 p[9][4]= 0
p[10][0]= 10000 p[10][1]= 0 p[10][2]= 10000 p[10][3]= 0 p[10][4]= 0
p[11][0]= 10000 p[11][1]= 30000 p[11][2]= 10000 p[11][3]= 0 p[11][4]= 0
p[12][0]= 20000 p[12][1]= 0 p[12][2]= 10000 p[12][3]= 0 p[12][4]= 0
p[13][0]= 20000 p[13][1]= 30000 p[13][2]= 10000 p[13][3]= 0 p[13][4]= 0
p[14][0]= 30000 p[14][1]= 0 p[14][2]= 10000 p[14][3]= 0 p[14][4]= 0
p[15][0]= 30000 p[15][1]= 30000 p[15][2]= 10000 p[15][3]= 0 p[15][4]= 0

```

Figura 3.3 – Pontos Gerados Relativos ao Sólido Definido.

O sólido utilizado neste exemplo é um paralelepípedo. Desta forma, há diversas trajetórias que são viáveis de serem utilizadas para manufaturar o sólido desejado. O compilador analisa todas as informações inseridas pelo pesquisador e exibe as formas de deposição disponíveis. Para este caso, as formas de deposição são exibidas na Figura 3.4.

```

ENTRE COM A FORMA DE DEPOSICAO DE MATERIAL:
1 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO
2 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO DESLIGANDO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO
3 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->IGUAL, ARCO DESLIGANDO
4 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->REVERSA A PARTIR DO INICIO, ARCO DESLIGANDO
5 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->REVERSA A PARTIR DO FIM, ARCO DESLIGANDO
6 - DEPOSICOES -
  ENTRE CORDOES: DIRECAO-->REVERSA, ARCO SEMPRE LIGADO
  ENTRE ALTURAS: DIRECAO-->REVERSA A PARTIR DO FIM, ARCO SEMPRE LIGADO

```

Figura 3.4 – Formas Possíveis de Deposição para o Sólido Projetado

Como já citado em seções anteriores, as deposições são chamadas de Deposição Direta quando todos os cordões são depositados no mesmo sentido e são chamadas de Deposição Reversa quando os cordões são depositados em sentidos opostos [34]. O mesmo pode ser utilizado

para cordões paralelos – Deposição Igual quando os cordões são depositados sempre no mesmo sentido e Deposição Reversa quando depositados em sentidos alternados, o que pode ser realizado sem que o arco seja extinto.

Após a escolha do modo de deposição, o compilador cria um arquivo com extensão .JBI que contém o algoritmo que sincroniza a interpolação dos pontos projetados com os comandos de abertura e fechamento de arco de acordo com a forma de deposição selecionada pelo pesquisador. Este algoritmo pode ser testado em um software de simulação da própria fabricante (MotoSim) para a identificação de possíveis erros antes da transferência para o manipulador real. Parte do algoritmo gerado, já carregado no software de simulação, é exibido na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Algoritmo Gerado Testado no Software de Simulação.

A Figura 3.6 exibe a simulação das trajetórias geradas para a manufatura do paralelepípedo utilizando a Forma 1 de deposição, na qual os cordões paralelos são todos depositados em Direção Igual. Ou seja, o arco se extingue a cada cordão depositado e é reaberto somente após o manipulador retornar ao ponto inicial do próximo cordão.

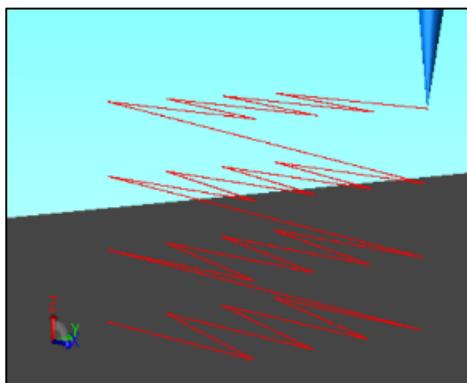


Figura 3.6 – Simulação da Forma 1 de Deposição – Paralelepípedo.

Ou seja, na Figura 3.6, as trajetórias no plano XY que são paralelas ao eixo X são realizadas com arco aberto e, conseqüentemente, com deposição de material. Todas as demais são realizadas sem adição de material. Quando a deposição de uma camada completa é finalizada (quatro cordões, neste caso), a TCP é movimentada um incremento de altura acima do início da trajetória anterior e a deposição de uma nova camada é iniciada. Está é a forma mais simples de deposição.

Já a Forma 6 de deposição (Direção Reversa tanto para cordões quanto para camadas), ilustrada na Figura 3.7, descreve uma trajetória distinta ainda que utilizando os mesmos pontos projetados anteriormente. As trajetórias desta forma de deposição permitem que todo o sólido seja manufaturado sem que o arco seja extinto ao conectar o fim de uma camada com o início da camada seguinte.

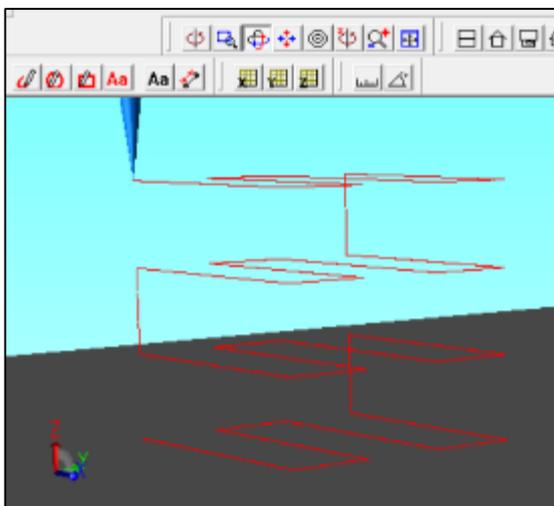


Figura 3.7 – Simulação da Forma 6 de Deposição – Paralelepípedo.

O desenvolvimento dos procedimentos para manufatura de Paredes e Cilindros foi realizado baseando-se nas mesmas ideias expostas para o exemplo do paralelepípedo.

3.1.2 Gerador de Trajetórias Baseado em Modelos CAD

CAD é a abreviação de *Computer Aided Design* que, em português, significa Desenho Assistido por Computador. Aqui, a palavra “assistir” está no sentido de “prestar auxílio ou assistência”. Ou seja, *CAD* se refere a ação de projetar sólidos utilizando os recursos de um computador com toda sua capacidade de processamento. A utilização do computador revolucionou a forma com que sólidos eram projetados ao permitir que a velocidade de correções e reproduções aumentassem consideravelmente. Isso significou mais agilidade para realizar mudanças nos projetos e para reproduzir itens repetitivos.

Diferentemente do Compilador Interativo, detalhado na seção anterior, o segundo compilador desenvolvido não exige que o pesquisador insira as dimensões do sólido desejado para que as trajetórias sejam geradas, mas exige que um arquivo *CAD* que represente o sólido em questão seja selecionado. O compilador, então, utiliza as informações do arquivo *CAD* para determinar as dimensões do sólido e, então, dar continuidade ao processo de geração das trajetórias.

Para construir o modelo 3D de uma peça, usualmente, inicia-se por um esboço que é composto por geometrias como pontos, linhas, arcos, cônicas e *splines*. É no esboço que as dimensões são adicionadas para definir o tamanho e a localização das geometrias. Este documento não irá abordar o projeto de modelos *CAD* de novas peças, mas, sim, como utilizar modelos já finalizados, usualmente projetados por terceiros, para extrair informações necessárias para a geração de movimentos e trajetórias. Esta seção demonstra o desenvolvimento de um método no qual as trajetórias para os manipuladores *Motoman* são geradas baseando-se em arquivos de modelos *CAD*.

- Software CAD – Solidworks

Solidworks é um software de *CAD* desenvolvido pela *Dassault Systèmes S.A.* e que funciona nos sistemas operacionais Windows. Baseia-se em computação paramétrica criando objetos tridimensionais a partir de formas geométricas elementares [35]. A escolha do *Solidworks* como software *CAD* foi devido a sua alta popularidade e aceitação tanto na indústria quanto nas Universidades. Além disso, por ser um dos softwares *CAD* mais antigos no mercado oferece opções de trabalhar com uma vasta gama de extensões. Isto significa facilidade na conversão do mesmo sólido para outras diferentes extensões onde cada uma utiliza forma particular de guardar as informações sobre a geometria do sólido. A vantagem de se poder trabalhar com um enorme número de extensões, na prática, se concentra na possibilidade de encontrar alguma extensão na qual as informações do sólido podem ser extraídas de forma eficaz.

Devido a assistência fornecida pelo computador, não é necessário que o projetista insira as coordenadas cartesianas sobre a geometria do sólido quando projetando em um software *CAD*. Na realidade, não é exigido ao projetista sequer ter conhecimento de alguma coordenada que esteja envolvida na representação do sólido que esteja sendo trabalhado. Porém, na programação dos movimentos de manipuladores, o habitual é a utilização de coordenadas, tanto cartesianas quanto polares, para a delimitação do início e do fim de cada um dos movimentos. Esta definição pode se dar através da utilização de Variáveis de Posição tratadas na seção 2.3.4.2 desde documento. Em outras palavras, é necessário que, de alguma forma, o programador insira

pontos no formato de coordenadas X , Y e Z que informem ao manipulador sobre os limites dos movimentos que devem ser executados. Isto significa que, se for possível decompor um sólido em pontos, obter suas respectivas coordenadas e manipulá-las de forma eficiente e coerente, é possível utilizá-las para definir trajetórias que descrevam o próprio sólido.

- Decomposição do Modelo CAD em Pontos

Encontrar uma forma de decomposição de sólidos *CAD* em pontos cartesianos de uma forma que fosse possível extrair informações sobre suas coordenadas era uma necessidade para o desenvolvimento desta aplicação. O uso do *Solidworks* já era preferível devido a sua alta popularidade e após alguma pesquisa foi possível definir um procedimento no qual métodos de elementos finitos são aplicados ao sólido e as coordenadas de seus nós são extraídas.

Para que fosse possível a aplicação de malhas de elementos finitos em sólidos *CAD* utilizando o *Solidworks* foi necessária a instalação do pacote de extensão *Solidworks Simulation*. Este pacote de extensão oferece um ambiente para diversas simulações sofisticadas que incluem simulações estáticas, térmicas, de pressão, de fadiga, entre outras. Além disto, o algoritmo aplicado pelo software utiliza uma grande variedade de formas geométricas para maximizar a capacidade de representação do mundo real.

Após a instalação do pacote *Solidworks Simulation* e a abertura do modelo *CAD* desejado, deve-se clicar na aba “**Simulation**” e, em seguida, em “**Study → New Study**”, localizados a esquerda da tela, como ilustrado na Figura 3.8. Em seguida, deve-se escolher “**Static Study**” devido ao fato da Aplicação de Elementos Finitos ser considerado um estudo estático, diferentemente de estudos de carga e de fadiga, por exemplo.

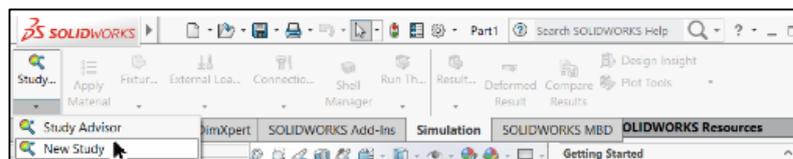


Figura 3.8 – Simulação da Forma 6 de Deposição – Paralelepípedo.

Com isso, novas opções surgirão na barra lateral esquerda. Deve-se selecionar o sólido como um todo ou somente as faces que se deseja aplicar o método de elementos finitos. Em seguida, deve-se clicar com o botão direito em “**Mesh**” e, em seguida, “**Create Mesh**”, como ilustrado na Figura 3.9.

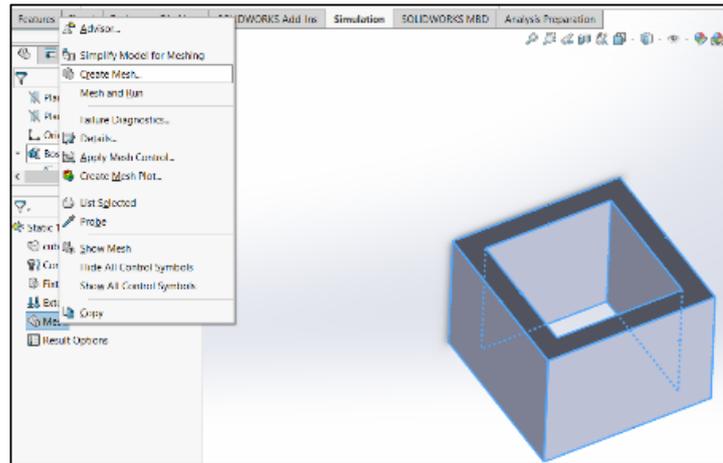


Figura 3.9 – Criação da Malha de Elementos Finitos.

Parâmetros para a decomposição devem ser, agora, definidos sendo os mais importantes o “**Global Size**”, que é a dimensão de cada elemento finito, e o “**Tolerance**”, que é o tanto que as coordenadas dos elementos fornecidos pelas simulações podem se diferenciar das dimensões do modelo projetado. Habitua-se escolher 10 mm como dimensão de cada elemento e 0.01mm de tolerância. Assim, o modelo será decomposto em uma malha de elementos finitos.

Em seguida, é necessário obter as coordenadas cartesianas das intersecções de cada elemento. Para isso, deve-se clicar com o botão direito do mouse, novamente, em “**Mesh**” e em seguida em “**Probe**” para, então, selecionar “**On selected entities**” e “**Node**”, como ilustrado na Figura 3.10. Somente agora, deve-se selecionar a peça como um todo, ou somente as faces ou arestas das quais se deseja obter as coordenadas, e clicar em “**Update**”.

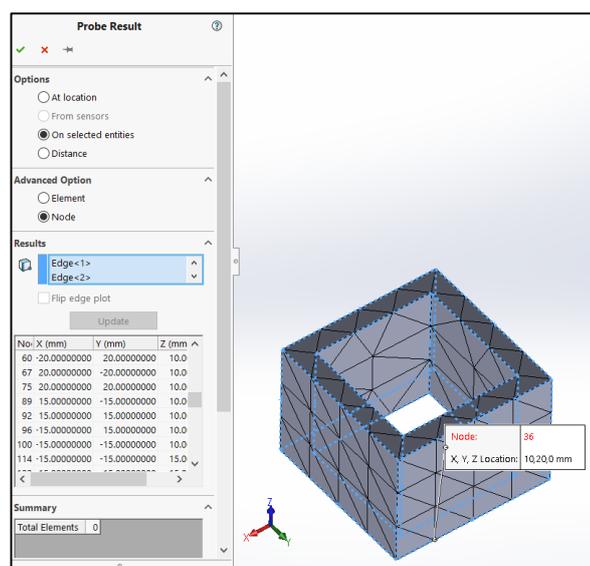
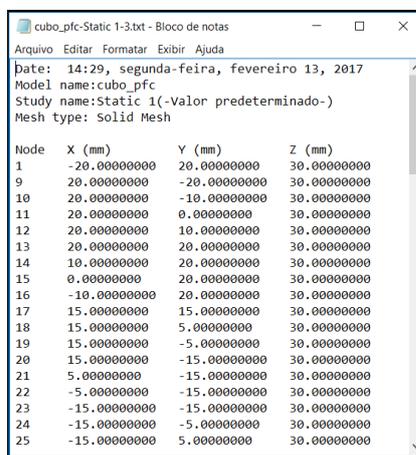


Figura 3.10 – Obtenção das Coordenadas dos Nós da Malha de EF.

Assim, o *Solidworks* gerará uma lista contendo todos os pontos das entidades selecionadas e suas respectivas coordenadas que poderá ser salva em arquivo .txt ou .csv. Na Figura 3.11 é ilustrado um arquivo salvo em .txt para o sólido que está sendo utilizado como exemplo nesta seção.



```

cubo_pfc-Static 1-3.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
Date: 14:29, segunda-feira, fevereiro 13, 2017
Model name:cubo_pfc
Study name:Static 1(-Valor predeterminado-)
Mesh type: Solid Mesh

Node X (mm) Y (mm) Z (mm)
1 -20.00000000 20.00000000 30.00000000
9 20.00000000 -20.00000000 30.00000000
10 20.00000000 -10.00000000 30.00000000
11 20.00000000 0.00000000 30.00000000
12 20.00000000 10.00000000 30.00000000
13 20.00000000 20.00000000 30.00000000
14 10.00000000 20.00000000 30.00000000
15 0.00000000 20.00000000 30.00000000
16 -10.00000000 20.00000000 30.00000000
17 15.00000000 15.00000000 30.00000000
18 15.00000000 5.00000000 30.00000000
19 15.00000000 -5.00000000 30.00000000
20 15.00000000 -15.00000000 30.00000000
21 5.00000000 -15.00000000 30.00000000
22 -5.00000000 -15.00000000 30.00000000
23 -15.00000000 -15.00000000 30.00000000
24 -15.00000000 -5.00000000 30.00000000
25 -15.00000000 5.00000000 30.00000000

```

Figura 3.11 – Arquivo txt Gerado a partir do Modelo do Exemplo.

O arquivo gerado possui informações das três coordenadas de cada um dos nós da malha de elementos finitos. Porém, a lista segue uma ordem aleatória e nem todos os pontos são necessários para a geração das trajetórias, pois círculos podem ser resumidos a apenas três pontos e retas podem a somente dois pontos. Assim, o problema se resumia, agora, em organizar, filtrar, identificar as *features* e gerar um programa na linguagem do controlador que executasse as trajetórias correspondentes ao sólido

- Projeção de Pontos em Contornos Seleccionadas

O número de pontos gerados da decomposição de um sólido em coordenadas cartesianas, demonstrada na seção anterior, evidencia o grau de complexidade envolvido em operações de tratamento de pontos necessários para organizar e definir características de um sólido em um procedimento chamado de “**identificação de features**”. O tratamento de todos os pontos, projetados em todas as três dimensões, geralmente não é necessário para aplicações de Manufatura Aditiva. Muitas vezes, o tratamento dos pontos de somente uma face, e sua repetição ao longo das camadas, já é o suficiente para a geração de trajetórias que representem sólidos satisfatoriamente. Esta forma de abordagem diminui o grau de complexidade das operações de tratamento de pontos consideravelmente.

Desta maneira, foi desenvolvido um segundo método de geração de trajetórias baseado em modelo *CAD* complementar ao exposto anteriormente. Neste segundo método, o programa *CAD* utilizado ainda é o *Solidworks*, porém, desta vez, o método de elementos finitos não é

aplicado ao sólido e utiliza-se de pontos projetados nos contornos da face de interesse. Em seguida, estes pontos são salvos em arquivo IGES o qual o compilador desenvolvido utilizará para extrair informações da geometria desejada e projetar as trajetórias necessárias.

Para demonstração deste método, a confecção do “Cartão de Natal LABSOLDA 2017” foi utilizado como exemplo.

- Cartão de Natal 2017 – Papai Noel 3D

Um Papai Noel foi projetado pelo *designer* do laboratório, Marcelo Okuyama, utilizando o software *AutoCad*, e os arquivos foram salvos com a extensão DXF. Apesar desta não ser uma extensão oriunda do software *Solidworks*, este foi capaz de importar todas as informações dos arquivos e convertê-las para a extensão SLDPRT, que é a extensão original do *Solidworks*. O Papai Noel projetado e aberto no *Solidworks*, já em formato SLDPRT, pode ser visualizado na Figura 3.12.

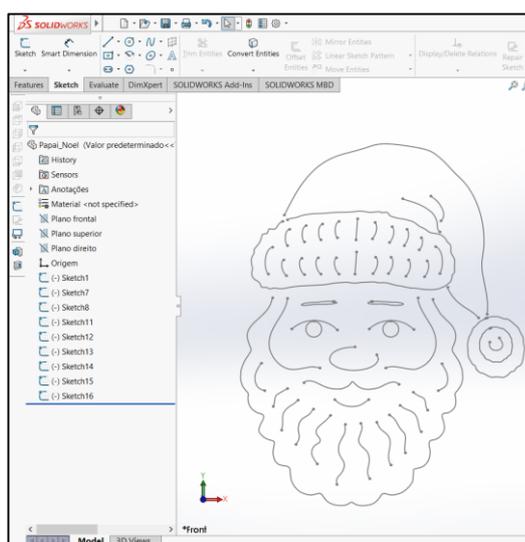


Figura 3.12 – Desenho do Papai Noel Aberto no *Solidworks*.

Neste momento, o desafio se constituía em projetar pontos nos contornos que compõe o modelo e extrair as coordenadas destes pontos. Para isto, **Seleciona-se o Contorno** para o qual deseja-se criar a trajetória e, em seguida, cria-se pontos de referência sobre este clicando em **Reference Geometry** → **Point**. Em seguida, escolhe-se a opção **Evenly Distribute** para projetar a quantidade desejada de pontos igualmente espaçados entre si, como mostrado na Figura 3.13.

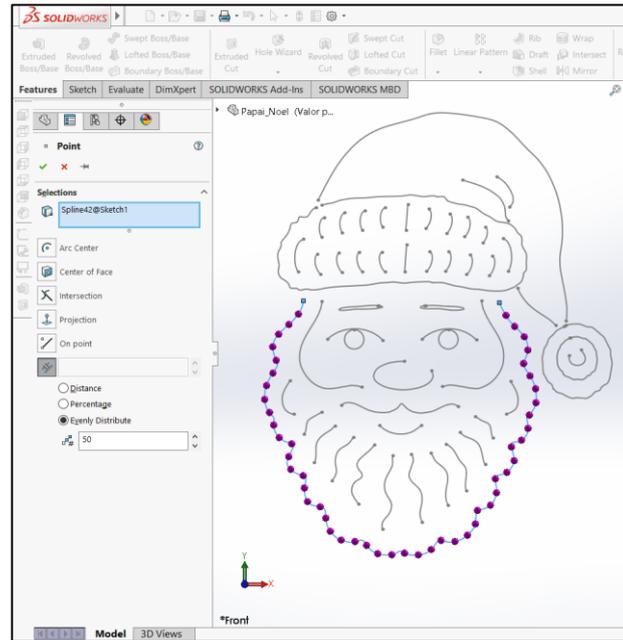


Figura 3.13 – Pontos projetados e igualmente espaçados – 50 pontos.

Quanto maior o número de pontos projetados sobre uma curva mais fielmente o manipulador irá reproduzir sua geometria, porém ao custo de maior probabilidade de o manipulador não desenvolver a velocidade configurada. Isto significa que quanto menor o número de pontos em uma trajetória mais fielmente o manipulador irá respeitar a velocidade configurada. Desta forma, encontrar a quantidade de pontos ideal para ao manipulador cumprir a trajetória satisfatoriamente depende da experiência do operador.

Após os pontos serem projetados, eles serão listados na barra de trabalho vertical à esquerda. Deve-se, então, **Criar um Novo Sketch**, **Selecionar os Pontos** na barra de trabalho citada e clicar em **Convert Entities** na aba **Sketch**. Desta forma, um novo esboço (*sketch*) será criado com pontos que coincidem com os Pontos de Referência que foram projetados sobre a curva. Assim, **Copia-se** este sketch (Ctrl+C), **Cria-se** um novo arquivo (Ctrl+N) e **Cola-se** o sketch copiado neste novo arquivo (Ctrl+V). Com isso, teremos um arquivo .SLDPRT contendo somente os pontos que representam a curva sobre a qual estamos trabalhando, como mostrado na Figura 3.14.

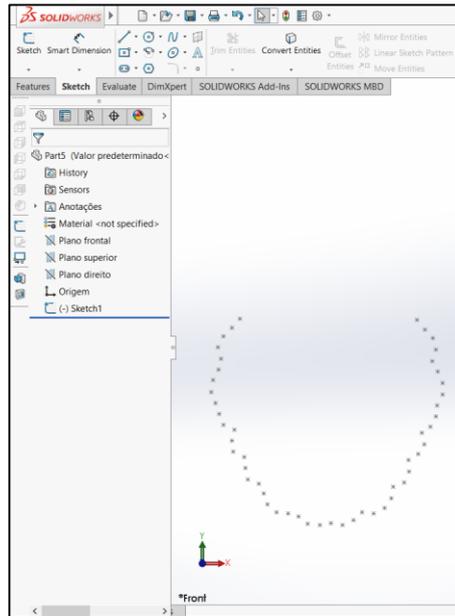


Figura 3.14 – Arquivo com Pontos que Representam a Curva Desejada.

Apesar da extensão SLDPRT ser a extensão padrão do *Solidworks*, o software é capaz de salvar os modelos criados em diversos formatos. Como já dito anteriormente, cada formato armazena as informações sobre a geometria do modelo de uma determinada maneira, entre as quais há extensões que facilitam a identificação das entidades presentes. Este é o caso do formato IGES o qual utiliza um prefixo “116” para anunciar pontos existentes no modelo.

Parte do arquivo acima, salvo em formato .IGES (**File**→**Save as**→**IGES**→**Options...**→**Export sketch entities**→**Ok**→**Save**), pode ser visualizado na Figura 3.15. Atentar para as linhas que iniciam com “116” e seguem com três números separados por vírgulas – estas são indicações da existência de um ponto localizado nas coordenadas cartesianas (X, Y e Z) descritas pelos três próximos números na sequência.

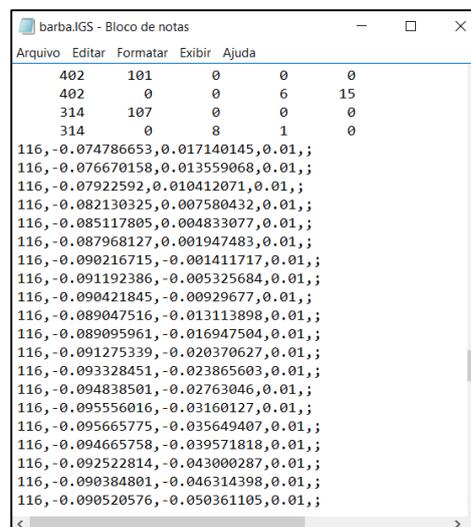


Figura 3.15 – Parte de arquivo IGES contendo pontos da Curva Selecionada.

O arquivo IGES gerado possui todos os pontos que foram projetados no contorno selecionado com suas respectivas coordenadas. O segundo compilador foi desenvolvido baseado nesta forma com que os arquivos IGES armazenam os pontos existentes no modelo: o compilador realiza uma varredura no arquivo e, após localizar uma linha iniciada por “116,” armazena os três números seguintes que são separados por vírgula como as coordenadas X, Y e Z do respectivo ponto. No caso da Figura 3.16, o primeiro ponto teria coordenadas $X = -74,5\text{mm}$, $Y = 17,1\text{mm}$ e $Z = 10\text{mm}$. Os pontos são listados pela ordem de criação.

Dessa maneira, o problema se resumiu em escrever um *job* no qual os movimentos se baseiem nas coordenadas dos pontos listados e sejam sincronizados com comandos de abertura e fechamento de arco juntamente com *timers* e outros comandos de sincronismo. Esta tarefa fica a cargo do Compilador de Trajetórias desenvolvido e o resultado das deposições relacionadas a manufatura do Papai Noel podem ser visualizados na Figura 3.16 e no vídeo em [36].



Figura 3.16 – Papai Noel em Camadas utilizando o Gerador de Trajetórias baseado em CAD.

3.2 Aparatos de Refrigeração

Como já dito, Manufatura Aditiva é um processo do qual peças são obtidas próximas de suas dimensões finais. Isto significa que peças manufaturadas aditivamente, muitas vezes, necessitam passar por trabalhos de pós-processamento, como a usinagem, para atingir requisitos dimensionais, ou então tratamentos térmicos, para atingir as propriedades mecânicas desejadas [17].

A necessidade da aplicação da usinagem decorre do fato de as paredes manufaturadas utilizando processos de soldagem a arco e adição de arame possuírem aparência característica decorrente da deposição de cordões na qual os limites de cada camada são visíveis a olho nu. Processos de usinagem também serão aplicados quando às peças necessitarem de uma redução considerável de geometria par atender especificações de projeto. Ou seja, na prática, processos de usinagem acabam sendo aplicados à grande maioria das peças metálicas manufaturadas aditivamente via soldagem a arco.

Usinagem compreende todo processo de fabricação que envolve remoção de material na busca de oferecer peças em formatos desejados. Dentre os quais podem ser citados o torneamento, a fresagem, a furação, a retifica e até o lixamento. Neste projeto, o torneamento recebeu maior atenção devido ao fato de o compilador desenvolvido oferecer uma forma rápida de gerar trajetórias que resultam em superfícies de revolução, apropriadas para serem usinadas em um torno mecânico.

Em processos de torneamento, encontrar uma forma eficiente para fixar a peça à placa de castanhas do torno é sempre um grande desafio devido à dificuldade de centralização e de se criar suportes resistentes o suficiente. Na tentativa de facilitar esta tarefa, foi proposta a ideia de iniciar a manufatura de uma peça de revolução, utilizando alumínio como material de adição, sobre a parede de um tubo, também de alumínio, que será chamado, neste documento, de Tubo Base. O tubo em questão, exibido na Figura 3.17, é fabricado por processo de extrusão e possui 1 polegada de diâmetro.



Figura 3.17 – Tubo Base.

O objetivo era utilizar a parede do Tubo Base como referência geométrica para a fabricação de uma peça de revolução e, posteriormente, utilizá-lo para fixar a peça à placa de casta-

nhas do torno. Desta forma, desejava-se obter uma peça centralizada com um suporte de sacrifício unido metalurgicamente a ela. Assim, o processo de usinagem poderia ocorrer em segurança e com o mínimo de remoção de material possível.

O compilador descrito nas seções anteriores utiliza coordenadas cartesianas para projetar as trajetórias necessárias para manufaturar o sólido desejado. No início do algoritmo, é requisitado ao usuário a marcação de um ponto no espaço que servirá como centro geométrico da peça projetada. Isto significa que o robô referenciará a peça a partir deste ponto marcado e é oferecido ao operador a liberdade marcá-lo onde desejar. Desta forma, utilizou-se o Compilador Interativo para gerar trajetórias para a manufatura aditiva de um cilindro com diâmetro inicial de 1 polegada e que variasse ao longo de sua altura, descrevendo a geometria da peça desejada. Logicamente, este valor de 1 polegada foi escolhido como diâmetro inicial da peça para coincidir com o diâmetro do tubo base, no qual algumas camadas do mesmo diâmetro deverão ser depositadas antes que o diâmetro comece a aumentar.

O tubo foi fixado verticalmente e o ponto inicial foi marcado exatamente no centro do tubo e na altura da face superior. Desta forma, os primeiros cordões foram depositados exatamente sobre a parede do tubo. Apesar dos parâmetros elétricos terem sido os mesmos utilizados no que foi exposto na Seção 3.1 deste documento, os cordões depositados não se sustentaram desde o início do processo e o Tubo Base resultou em um aspecto de fundido, como é possível observar na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Tubo Base Fundido.

Os cordões não se sustentaram devido à baixa capacidade de dissipação térmica do sistema, que rapidamente acarretou em Temperatura Interpasse alta o suficiente para inviabilizar a manufatura de uma peça através da adição de material em camadas. Quando consideramos os primeiros experimentos de manufatura aditiva realizados no Labsolda, observamos que o substrato naqueles experimentos era formado por uma chapa de alumínio que possuía uma área

consideravelmente grande e espessura de 16 mm, o que aumentava a capacidade de dissipação térmica além do fato de o cilindro manufaturado possuir um diâmetro maior, o que também contribuiu para que a Temperatura Interpasse caísse a níveis nos quais os cordões depositados se sustentavam em camadas.

Desta forma, na tentativa de aumentar a capacidade de dissipação térmica do sistema relativo a deposição sobre o Tubo Base, desenvolveu-se dispositivos de refrigeração que serão descritos nas seções a seguir.

3.2.1 Serpentina de Cobre

Como primeira tentativa de criar um dispositivo que melhorasse a capacidade de dissipação de calor do sistema foi utilizada um sistema de refrigeração de água a qual é possível resfria-la a temperaturas tão baixas quanto 4°C. Utilizou-se um tubo de cobre com diâmetro externo de 4 mm e diâmetro interno de 1mm para envolver o tubo base formando uma serpentina, como ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Serpentina em torno do Tubo Base.

A pressão imposta pela bomba faz a água circular a uma vazão de 0,8 L/min no sentido de cima (mangueira azul) para baixo (mangueira vermelha) na intenção de otimizar a troca térmica ao fazer água mais fria entrar próxima a fonte de calor. No ensaio que se realizou, o sistema foi configurado para manter a temperatura da água em 4°C e os mesmos programas de trajetórias e parâmetros elétricos utilizados na tentativa anterior foram utilizados.

A Figura 3.20 exibe o resultado do ensaio realizado com o uso do Primeiro Dispositivo de Refrigeração que se utilizou de uma serpentina de cobre em torno do Tubo Base. É possível observar que, apesar dos cordões não terem se sustentados como nos ensaios em chapa plana, o Tubo Base não se fundiu e uma peça se formou sobre sua borda. Isto significa que, apesar da sustentação dos cordões não ter sido completa, o dispositivo utilizado melhorou a dissipação de calor do sistema ao ponto de permitir a manufatura de uma peça.



Figura 3.20 – Manufatura com o Sistema de Serpentina.

A forma com que os cordões escorreram, de certa forma, demonstra que o processo não está sob controle no sentido de não ser possível prever a geometria das paredes que serão formadas. O desejado é que os cordões se depositem de forma estável e constante do início ao fim do processo para que seja repetitivo e represente o que foi planejado na fase de projeto. Mas, mesmo que o processo não tenha se comportado como o esperado, usinou-se a peça obtida de acordo com o objetivo inicial – utilizar o Tubo Base (tubo extrudado, comercial, também de alumínio) para fixação na placa de castanhas do torno mecânico. O processo de usinagem realizado na peça manufaturada pode ser visualizado na Figura 3.21.

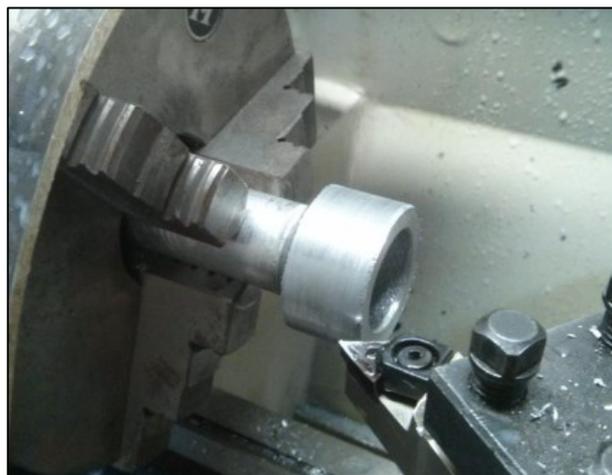


Figura 3.21 – Usinagem da Peça Manufaturada sobre o Tubo Base.

A utilização do dispositivo de refrigeração demonstrou que é possível melhorar a dissipação de calor através do bombeamento de água refrigerada através de uma serpentina e cobre em torno do Tubo Base, mesmo que não tenha atingido níveis ideais. Porém, características como a grande distância entre o fluido refrigerante e o Tubo Base neste dispositivo, além da existência de cobre entre eles, demonstraram que havia oportunidade para a criação de dispositivos de troca de calor mais eficientes, que serão demonstrados a seguir.

3.2.2 Incidência Direta de Fluido Refrigerante

No dispositivo de refrigeração desenvolvido na seção anterior, a água bombeada através da serpentina é a responsável pela melhora na eficiência da dissipação de calor do processo. Esta melhora de eficiência ocorre devido a constante renovação da massa presente nas regiões próximas a serpentina que ocorre devido a vazão de água. Em outras palavras, o que ocorre é que após um instante de troca de calor entre o Tubo Base e a massa presente ao seu redor, no instante seguinte uma porção desta massa existente ao redor do Tubo Base se renova por uma massa relativamente mais fria, o que gera a melhora na dissipação do calor.

A transferência de calor que ocorre no dispositivo desenvolvido na seção anterior ocorre quase que inteiramente por condução, no sentido de que o calor é transferido do Tubo Base para o cobre antes de ser transferido para água que é renovada. Na prática, isto significa que a existência de uma camada de cobre entre o Tubo Base e a água contribui negativamente para a eficiência da dissipação de calor do sistema.

Como tentativa de desenvolver um dispositivo que fornecesse uma maior dissipação de calor, decidiu-se utilizar uma estratégia na qual a água refrigerada entrasse em contato direto com o Tubo Base dispensando o uso da serpentina de cobre. Para isto, usinou-se três câmaras

em um cilindro de nylon – duas para a acomodação de *o' rings* e uma para o fluxo de água. Por fim, acoplou-se uma conexão para entrada e outra para a saída de água. O dispositivo finalizado pode ser visualizado na Figura 3.22.



Figura 3.22 – Setup do Segundo Dispositivo de Refrigeração.

Preocupou-se em manter reduzidas as dimensões da câmara pela qual o fluxo de água circularia para manter elevada a taxa de renovação de massa, pois quanto mais rápido a massa se renovar mais eficiente será a transferência de calor entre o Tubo Base e o fluido refrigerante. Como a bomba utilizada fornecia uma pressão constante, a vazão era resultado da resistência encontrada pelo fluido durante sua circulação. O controle da dissipação térmica poderia ser dar pela variação da taxa de renovação de massa dentro da câmara do dispositivo ao variar a velocidade de escoamento do fluido, porém, neste caso, esta variação não era possível, pois a bomba utilizada não era uma bomba de vazão, mas, sim, uma de pressão, como já mencionado.

A câmara interna possuía 26,5 mm de comprimento com diâmetro interno 4 mm maior do que o diâmetro externo do Tubo Base, ou seja, 30,5 mm. Dessa forma, a água fluía por uma câmara de 5807 mm³ a uma vazão de 2.4 L/min com a bomba de pressão utilizada. Tomou-se o cuidado em manter reduzidas as dimensões das espessuras das paredes do alojamento do *o'ring* superior para que o fluido refrigerante se aproximasse ao máximo da fonte de calor. Tomou-se o cuidado, também, em projetar os canais de alojamento dos *o' rings* de acordo com dimensões fornecidas pelo fabricante. Os *plugs* para entrada e saída do fluxo de água foram posicionados no ponto médio do comprimento da câmara interna. A Figura 3.23 ilustra o dispositivo em questão e a Figura 3.24 seu corte transversal em representação CAD.

os cordões não escorreram e foi possível obter uma transferência metálica estável, como demonstrado na Figura 3.25.

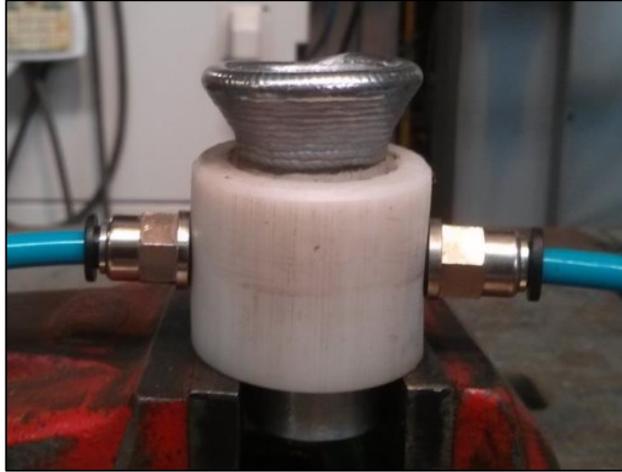


Figura 3.25 – Utilização do Segundo Dispositivo de Refrigeração.

O experimento realizado com o Segundo Dispositivo de Refrigeração demonstra que o nível de dissipação de calor atingido com este dispositivo foi suficiente para manter a deposição de cordões estável e evitar que os cordões escorressem. Como a molhabilidade dos cordões diminuiu consideravelmente e os parâmetros de soldagem se mantiveram inalterados, os cordões depositados tenderam a ficar mais altos. Devido a esta mudança na geometria dos cordões o processo precisou ser interrompido após algumas camadas depositadas devido a aproximação demasiada da peça a tocha. Na Figura 3.26 é possível observar, em detalhes, três camadas depositadas com o mesmo diâmetro do Tubo Base e outras camadas nas quais o diâmetro foi aumentado gradativamente.



Figura 3.26 – Peça Manufaturada com o Segundo Dispositivo de Refrigeração.

A peça manufacturada passou por processo de usinagem da mesma forma que a peça obtida na seção anterior, porém, desta vez, a quantidade de material retirada foi somente a suficiente para que as linhas que delimitam as camadas desaparecessem. Na Figura 3.27 é possível observar a peça após o processo de usinagem.



Figura 3.27 – Peça após Processo de Usinagem.

Como dito anteriormente, com a utilização deste dispositivo de refrigeração o processo precisou ser interrompido para evitar a colisão da peça com a tocha. Isto foi devido ao fato de os cordões depositados possuírem altura maior do que os incrementos configurados a priori nas trajetórias utilizadas. A relação de Temperatura do Processo X Altura dos Cordões já é bem conhecida e consolidada no campo da soldagem, porém quando a soldagem começa a ser aplicada em processos de Manufatura Aditiva surge um todo novo universo de desafios como este da dissipação térmica.

Apesar da melhora na capacidade de dissipação térmica do sistema que possibilitou a deposição de alguns cordões de forma controlada na manufatura de uma peça sobre o Tubo Base, este segundo dispositivo de refrigeração que utilizava a incidência direta de fluido ainda estava longe do ideal, pois sua capacidade de dissipação se degrada conforme a peça é manufacturada. Este fato se evidenciou ao tentar manufacturar uma peça que simulava uma traqueia humana para uma pesquisa que estava a ser realizada no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC. Um detalhamento maior sobre a peça e os experimentos realizados serão fornecidos na seção seguinte.

3.2.3 Tanque de Inundação

Conforme mencionado, chegou no LABSOLDA uma possibilidade da fabricação de uma peça cilíndrica que representava a estrutura de uma traqueia humana e que seria uma oportunidade para a utilização do dispositivo de refrigeração por incidência direta de fluido refrigerante por apresentar geometria favorável à aplicação. A Figura 3.28 exhibe o modelo CAD completo da peça em (a) e a porção destacada para a realização dos primeiros experimentos em (b).

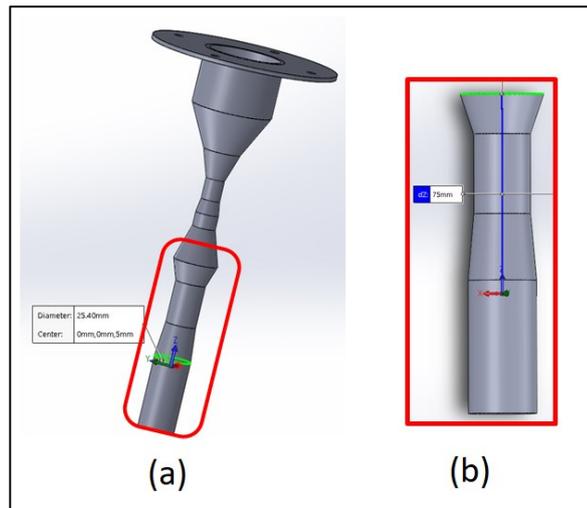


Figura 3.28 – (a) Modelo CAD Completo. (b) Porção Seleccionada.

A porção destacada foi fatiada de acordo com a estimativa de Altura de Camada que os parâmetros seleccionados iriam resultar e uma trajetória helicoidal foi gerada na linguagem do manipulador utilizado. O centro geométrico das trajetórias foi configurado para coincidir com o centro geométrico do Tubo Base e, dessa maneira, as deposições se iniciariam exatamente sobre a parede do Tubo Base, assim como nos experimentos exibidos na seção anterior. Apesar das primeiras camadas terem sido depositadas de maneira muito satisfatória considerando a sustentação dos cordões, a geometria destes foi se alterando conforme a peça aumentava de altura até o momento de que o valor da Altura de Camada dos cordões depositados se distanciava muito do valor de Espessura de Fatiamento utilizado na geração das trajetórias. Detalhe importante é que esta diferença não se estabilizou e se apresentava cada mais vez maior conforme a peça era manufaturada, assim como é possível observar na Figura 3.29.



Figura 3.29 – (a) Parte Manufaturada. (b) Alteração da Geometria dos Cordões.

Apesar de ter iniciado de maneira constante e controlada, a mudança da geometria das camadas, que é perceptível a olho nu a partir de certa altura, é explicada pelo aumento da Temperatura Interpasse detalhado na Seção 2.4. Este aumento da Temperatura Interpasse, por sua vez, pode ser explicado pela degradação da capacidade de dissipação térmica do sistema, pois no início esta capacidade se demonstra suficiente e, a partir de certo ponto, se torna visualmente cada vez pior. Já a degradação da capacidade de dissipação térmica se deve a diminuição do gradiente térmico do sistema, pois, como demonstrado por [27], a maior parte do calor em uma aplicação como esta é dissipado por condução, que, por sua vez, depende diretamente do valor do gradiente térmico e pode ser definido pela Equação 3.1, onde “ q ” representa o fluxo de calor, “ k ” a condutividade térmica do material e ∇T representa o gradiente térmico da região em questão.

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (3.1)$$

Como dito, o aquecimento global da peça foi devido à diminuição da capacidade de dissipação térmica do sistema. Quando o processo de deposição de camadas se inicia, há a formação de um gradiente térmico no qual as regiões mais quentes se localizam na região onde ocorre a transferência metálica e as regiões mais frias se localizam próximas ao Tubo Base sobre o qual água era incidida. Desta maneira, no início do processo de deposição, que coincide

com os instantes nos quais a peça possui menores alturas, o gradiente térmico é alto e pode ser representado como na simulação exposta na Figura 3.30. Conseqüentemente a dissipação térmica é alta, considerando a Equação 3.1, já mencionada.

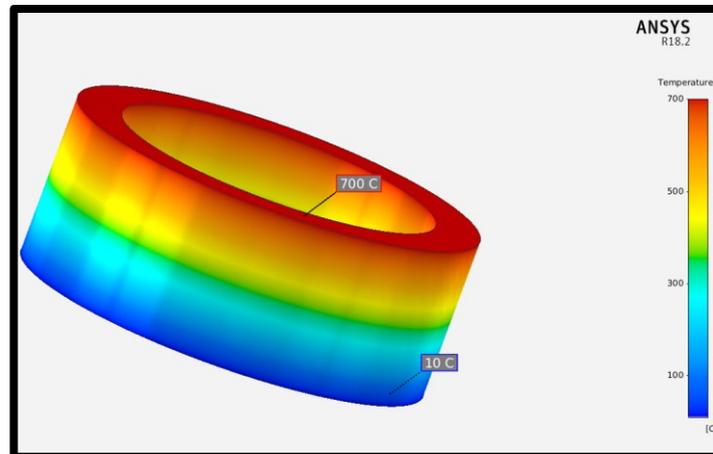


Figura 3.30 – Peça com Alto Gradiente Térmico.

Conforme o processo de deposição de material em camadas se desenvolve, a peça adquire altura e as regiões mais quentes (poça de fusão) se distancia constantemente das regiões mais frias (Tubo Base refrigerado). Isto significa que o gradiente térmico diminui, o que pode ser visualizado na Figura 3.31, e, conseqüentemente, a capacidade de dissipação térmica também diminui e calor acaba “represado” na peça.

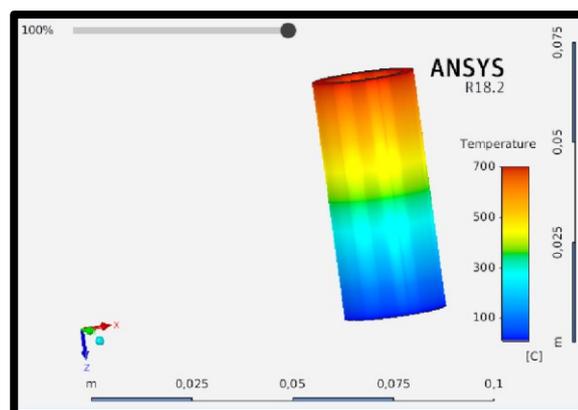


Figura 3.31 – Peça com Baixo Gradiente Térmico.

Se a dissipação de calor do sistema for ineficiente, a peça como um todo tenderá a aquecer conforme o processo de manufatura aditiva se desenvolve. Isto significa que é alta a probabilidade de a transferência metálica ocorrer a uma determinada temperatura no início do processo e ocorrer a uma temperatura diferente no final do processo. Tal efeito faz com que, mesmo utilizando os mesmos parâmetros, não só a geometria dos cordões se altere, mas também a

microestrutura resultante. Tal fenômeno nem sempre é o desejado por acarretar uma série de dificuldades, dentre as quais pode ser citada a necessidade de se determinar diferentes parâmetros de usinagem para diferentes regiões da mesma peça.

O ideal é que o calor seja dissipado de tal maneira que a transferência metálica ocorra a uma mesma temperatura do início ao fim do processo de manufatura da peça. Mas, para isso, a utilização de sistemas de refrigeração que se concentram na base se torna impossível devido à inevitável diminuição do gradiente térmico. Desta maneira, foi proposta a implementação de um tanque de imersão no qual água refrigerada à 10° C é bombeada por cima do tanque enquanto outra bomba retira água já presente no tanque por baixo forçando, assim, uma renovação constante da massa de água presente no tanque. Um esquemático pode ser visualizado na Figura 3.32.

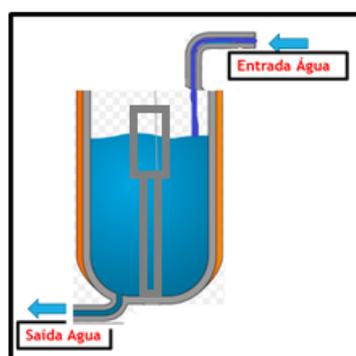


Figura 3.32 – Esquemático do Tanque de Inundação Proposto e Peça sob Manufatura.

Caso a quantidade de água retirada pela bomba de saída seja a mesma do que a quantidade de água inserida pela bomba de entrada, o nível de água do tanque se manterá constante. Porém se a quantidade de água retirada for menor do que a quantidade de água inserida, o nível de água tenderá a subir proporcionalmente a diferença entre as vazões de entrada e saída. Esta variação do nível de água no tanque pode ser utilizada para manter constante o gradiente térmico da peça sob manufatura caso este aumente na mesma medida e proporção que a peça sob manufatura adquire altura. Um protótipo do tanque proposto foi implementado e a manufatura aditiva de um cilindro, sobre um Tubo Base, foi realizada e a peça manufaturada pode ser visualizada na Figura 3.33.



Figura 3.33 – Peça Manufaturada dentro do Tanque de Imersão.

É possível observar que o cilindro obtido apresenta camadas das mais variadas geometrias, desde camadas que resultaram com valor de altura menor e largura maior até camadas mais convexas nas quais a altura adquiriu um valor maior e, conseqüentemente, a largura um valor menor. Isto foi decorrente do fato de que o controle do nível de água do tanque durante o processo de manufatura foi realizado de forma manual e, portanto, havia momentos em que o nível da água se encontrar mais próximo da aresta do topo da peça, proporcionando um gradiente de temperatura alto, e momentos em que o nível se encontrava mais distante do topo, proporcionando um gradiente de temperatura mais baixo. O ideal é que este controle do nível seja realizado de forma automatizada e que a distância entre o nível da água e o topo da peça se mantenha constante durante todo o processo. Porém do experimento realizado foi possível concluir que o volume do tanque (5 L) e a temperatura da água (10° C) são suficientes para dissipar a quantidade de calor necessária para que a Temperatura Interpasse não aumente. O desafio, então, se resume a criar um sistema de controle realimentado para garantir que a distância entre o nível da água e a aresta superior da peça em manufatura se mantenha constante durante todo o processo, o que será discutido na Seção 6.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.

3.3 Leitura da Altura das Camadas utilizando Sensor Laser

De acordo com a experiência obtida dos primeiros experimentos realizados no laboratório e da clareza da importância do valor de DBCP se manter constante durante todo o processo, decidiu-se utilizar um sensor laser para realizar a leitura da distância entre o Bico de Contato e a Peça. Foi inferido que, baseando-se nos valores obtidos das leituras, seria possível determinar a altura de cada camada depositada e utilizar este valor para realizar o incremento do manipulador na direção da altura para que a próxima camada fosse depositada com o mesmo valor de DBCP.

O LABSOLDA possui três sensores laser Meta Vision sendo dois voltados para soldagem externa e um voltado para soldagem interna de tubos. Apesar da construção física e da distância focal serem diferentes (50mm para o de soldagem externa e 25mm para o de soldagem interna), o funcionamento e a forma de comunicação dos dois modelos são idênticos. A empresa Meta foi formada em 1984 como uma *spin out* de um projeto de pesquisa em engenharia na mundialmente conhecida Universidade de Oxford. O objetivo principal do projeto era desenvolver um robô de soldagem guiado por um sensor laser e gerou a primeira patente da empresa. Hoje, a empresa Meta é formada por mais de 40 colaboradores e já forneceu mais de 3000 sensores lasers e continua a desenvolver novas soluções para todos os tipos de aplicações de soldagem a arco [37].

A empresa fornece um software com interface amigável no qual se deve selecionar uma entre muitos padrões de juntas disponíveis. Esta seleção informa ao sistema qual tipo de junta está sendo monitorada e, desta forma, filtros desenvolvidos pelo próprio fabricante são aplicados. Informações, como, por exemplo, o centro da junta, são extraídas e fornecidas ao usuário. Porém, apesar de diversas, a quantidade de juntas disponíveis pelo fabricante são limitadas e muitas vezes não há opções disponíveis para aplicações não usuais, como é o caso da Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco.

Como mencionado, o software fornecido pelo fabricante possui opções de se trabalhar com diversos tipos de juntas, porém, nenhuma das opções era apropriada para desenvolver o controle proposto nesta aplicação - o cálculo da altura de cada uma das camadas depositadas. Para isto, foi necessário desenvolver uma nova interface não só para exibir os resultados das leituras obtidas, mas também para estabelecer comunicação via rede *Ethernet* com o sensor. A interface foi desenvolvida utilizando o **Microsoft Visual Studio**, que é um pacote de programas da Microsoft para desenvolvimento de software especialmente dedicado ao .NET Framework e às linguagens Visual Basic (VB), C, C++, C# (C Sharp) e J# (J Sharp). Especificamente para

esta aplicação, a linguagem C# foi a utilizada e a interface desenvolvida pode ser visualizada na Figura 3.34.

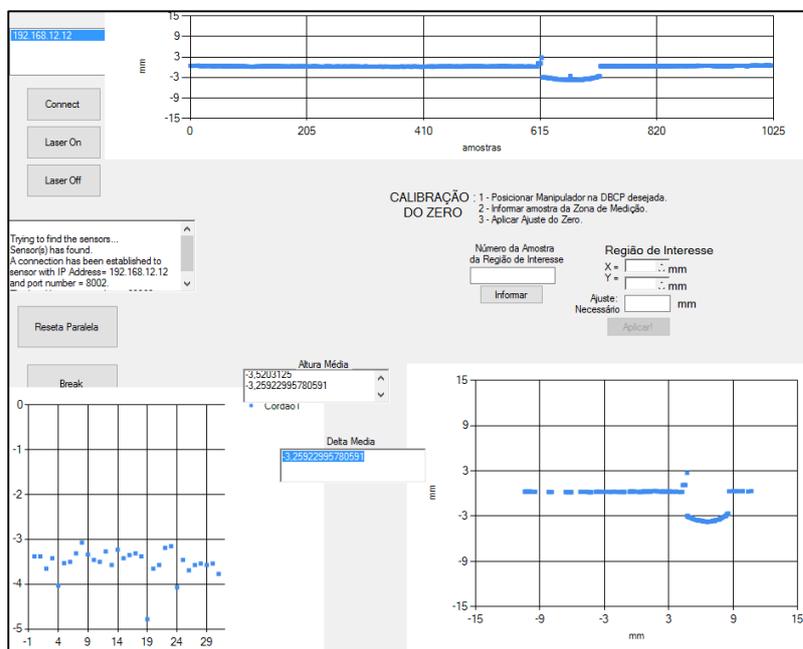


Figura 3.34 – Interface do software desenvolvido para controle da DBCP.

A interface foi desenvolvida de forma que funções como Conectar ao Sensor, Ligar Laser, Desligar Laser e Calibração do Zero estão disponíveis para o usuário pesquisador. As **leituras** do sensor **em tempo real** são exibidas nos dois gráficos mais à direita da imagem, sendo que o gráfico superior representa os dados sem tratamento e o inferior representa os dados já com algum tratamento. O gráfico à esquerda da interface representa **todas as medições** da Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) obtidas ao longo da deposição. Cerca de 30 medições são realizadas ao longo de cada deposição realizada e a variabilidade dos valores obtidos são decorrentes da composição da incerteza natural do sensor laser (± 0.1 mm), da incerteza devido a resolução da porta paralela utilizada na comunicação entre o robô e o computador [38] e do aspecto “escamado” característico de deposições realizadas por processos de soldagem MIG/MAG.

Os Sensores Lasers possuem faixas determinadas de trabalho. O modelo utilizado para os ensaios de bancada deste desenvolvimento foi o SLS 25 H1, da fabricante Meta Vision, que possui distância focal ideal sensor-peça de **25mm**, fazendo com que os objetos que se encontram a esta distância do sensor sejam representados nas coordenadas de valor 0 no eixo vertical do gráfico, assim como o topo do cordão da aquisição exposta na Figura 3.35.

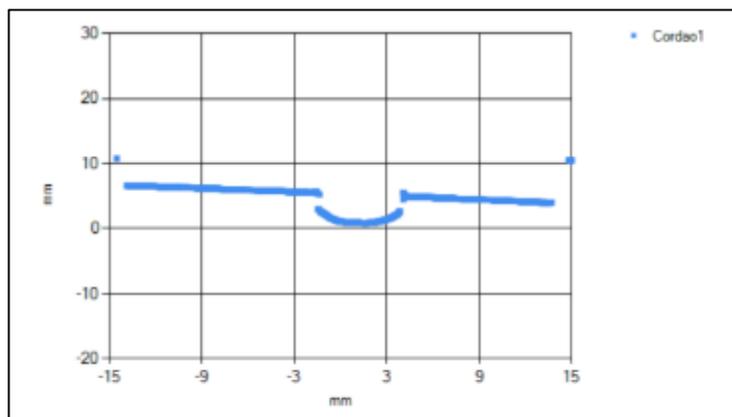


Figura 3.35 – Leitura obtida com o topo do cordão à 25mm do Sensor.

Cada leitura realizada pelo sensor laser utilizado neste desenvolvimento fornece um conjunto de 1024 pixels. Cada um destes pixels é vinculado a duas informações, sendo que uma representa a posição na direção horizontal (coordenada-x) e outra a posição na direção vertical (coordenada-y) do pixel em questão. O valor que representa a posição na direção horizontal é relativo ao comprimento do feixe laser e pode variar entre -15 e +15mm, definindo uma faixa de leitura horizontal de 30 mm considerando o valor de 0 mm relativo à metade do feixe. Já o valor que representa a posição do ponto na direção vertical é relativo à altura do pixel e sua faixa de medição foi determinada experimentalmente e se estende de 23 a -10 mm [38]. Como os objetos localizados a 25mm do sensor são representados como valor 0, os objetos localizados a uma distância maior foram representados por números positivos e os objetos localizados a uma distância menor foram representados por números negativos. Logicamente, esta é somente uma forma de representação que poderia ter sido alterada via software fazendo com que, por exemplo, os valores 0 sejam representados pelo valor 25mm, ou qualquer outra forma desejada pelo desenvolvedor.

A Calibração do Zero foi adotada neste desenvolvimento como forma de facilitar os procedimentos iniciais antes do início das deposições. Para realizar a Calibração do Zero com o software desenvolvido basta posicionar a tocha na Distância Bico de Contato Peça desejada, informar o número de um pixel próximo da região de interesse e aplicar o ajuste. Ao informar algum pixel próximo da região de interesse, o valor da altura desta região é ajustado para o valor 0 (zero). Este procedimento pode ser realizado para qualquer DBCP desejada (respeitando a faixa de medição) e evita que o usuário pesquisador tenha que determinar o ponto de referência manualmente [38]. Como procedimento para validação do ajuste realizado, foi adotado a leitura de uma chave *allen* de dimensão bem determinada, como ilustrada na Figura 3.36.



Figura 3.36 – Validação do Ajuste Realizado.

Para realizar um ensaio completo utilizando o sistema de controle desenvolvido decidiu-se manufacturar uma parede de 260mm de comprimento sobre uma chapa de alumínio de 16mm de espessura com a intenção de favorecer a dissipação de calor. A DBCP escolhida para o ensaio foi de 15mm e fixou-se o sensor laser em determinado ângulo no qual o feixe fosse projetado a 20 mm de distância da TCP (Tool Center Point). O processo de soldagem utilizado neste ensaio foi o **CMT Pulse Advanced**, com Velocidade de Soldagem de **0,5m/min** e, inicialmente, foi configurada uma Velocidade de Alimentação de Arame de **7.5 m/min** que, de acordo com [14], resulta em peças de alumínio com menores quantidades de poros.

Inicialmente, foram configuradas 30 camadas para a manufatura desta parede de validação do procedimento. A altura de cada um dos cordões é registrada pelo sistema e enviada ao manipulador através de uma porta paralela utilizando 8 bits que fornece uma resolução de 0,039mm, valor suficiente para a aplicação considerando a incerteza de posicionamento do manipulador utilizado ($\pm 0,1$ mm). O valor da altura de cada um dos cordões depositados pode ser visualizado na Figura 3.37.

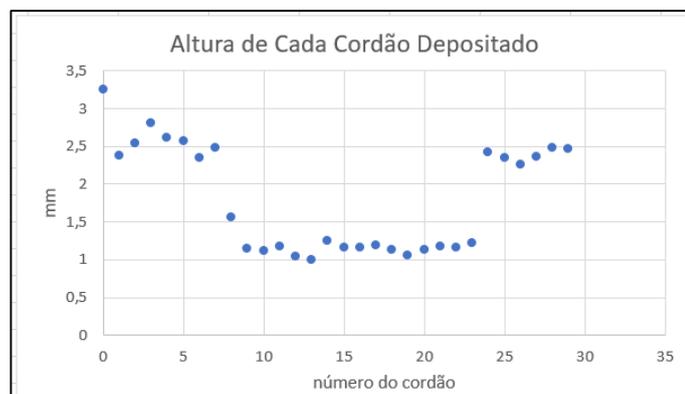


Figura 3.37 – Altura Média de Cada uma das 30 Camadas da Parede Manufaturada.

É importante observar que o valor da Altura de Camada foi de 2,5 mm até a 7ª camada depositada. Em seguida, as alturas de cada camada resultaram em torno de 1,0 mm para, em seguida, voltarem novamente a obter 2,5 mm, de altura, cada. Estes efeitos eram esperados porque variou-se propositalmente a Velocidade de Arame de 7,5 m/min para 3,0m/min para, em seguida, novamente variá-la de 3,0 para 7,5 m/min. Este efeito comprova que a aquisição de dados e as ações de controle estão de acordo com o que foi projetado. A Figura 3.38 exibe a parede finalizada e a verificação da DBCP final, que se manteve na casa dos 15mm iniciais.

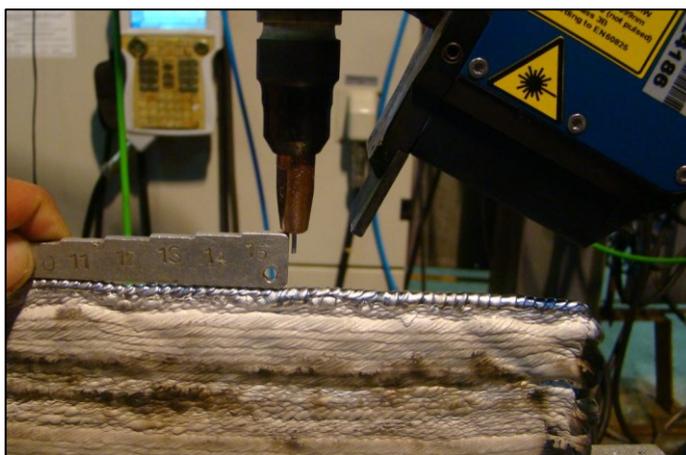


Figura 3.38 – Parede Finalizada com Valor de DBCP Mantido na Referência.

O desenvolvimento exposto nesta seção demonstra que é possível utilizar um sensor laser para obter o valor da altura de cada uma das camadas depositadas na manufatura aditiva de uma parede e, assim, manter o valor da Distância Bico de Contato-Peça constante durante todo o processo. Porém a utilização de tal conceito para sólidos com diferentes geometrias se tornaria mais complexa devido a impossibilidade de o manipulador antropomórfico utilizado realizar mais de duas rotações em torno do seu eixo-Z.

Além do exposto no parágrafo anterior, corrigir a posição do manipulador em relação a aresta superior da peça em fabricação não seguiria o conceito de manufatura aditiva em seu *stricto sensu*, pois, de acordo com [7], o processo de fabricação intitulado de manufatura aditiva parte do fatiamento de um modelo CAD e exige que o valor da altura das camadas depositadas (Altura de Camada) seja idêntico ao valor da Espessura de Fatiamento utilizado para fatiar o modelo CAD. Isto significa que, uma vez definido um valor para a Espessura de Fatiamento, as deposições de material devem resultar em um valor de Altura de Camada idêntico a este valor e o sensor laser seria útil, apenas, para identificar possíveis variações no valor da altura da camada em deposição. Ainda mais, esta identificação ocorreria com um atraso muito elevado devido a obrigatoriedade do feixe laser incidir a uma distância considerável (~45 mm) da poça

de fusão, tornando esta abordagem não muito atrativa para o autor desta dissertação. A utilização de câmeras CCD acopladas a tocha de soldagem poderia ser uma melhor opção, o que é discutido na Seção 6.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.

Portanto, o domínio sobre a deposição de material em camadas com altura bem definida continua sendo imprescindível na Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco, sendo possível a utilização de sistemas de medição de altura sem contato para o monitoramento da geometria destas deposições para que possíveis correções para manter a Altura de Camada no valor de referência possam ser realizadas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Bancada Experimental e Equipamentos

4.1.1 Fonte de Soldagem *Fronius CMT Advanced*

O processo de soldagem utilizado nos experimentos para este trabalho foi o CMT Advanced, variante do processo MIG/MAG desenvolvida pela fabricante Fronius. A fonte de soldagem utilizada foi a do modelo CMT Advanced 4000R equipada com a interface de configuração modelo RCU5000i. Maiores detalhes sobre este processo de soldagem são expostos na Seção 2.1.



Figura 4.1 – Fonte de Soldagem *CMT Advanced - Fronius*.

4.1.2 Manipulador Antropomórfico HP-20D

O manipulador utilizado no desenvolvimento deste projeto, ilustrado na Figura 4.2, é um robô antropomórfico da fabricante Motoman que é uma subsidiária da gigante japonesa do setor elétrico Yaskawa. A empresa atua no desenvolvimento de soluções para a robotização de processos industriais que incluem soldagem a arco e a ponto, montagens, pintura, corte, manuseio e remoção de materiais (usinagem). É a segunda maior fabricante de robôs industriais nos Estados Unidos e a maior no continente asiático.



Figura 4.2 – Manipulador Antropomórfico HP-20D (*Motoman*).

4.1.3 SAP

Os sinais de Corrente, Tensão e Velocidade de Arame foram monitorados com o Sistema de Aquisição Portátil (SAP), do fabricante IMC. Este sistema realiza a aquisição dos sinais em uma frequência de 5000 Hz. Os dados obtidos são dispostos em gráficos e histogramas, o que torna possível a análise detalhada dos parâmetros elétricos (Tensão e Corrente) além da Velocidade de Arame e Vazão de Gás. Algumas das suas especificações técnicas são expostas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1– Especificações Técnicas do SAP [39]

Variável	Faixa	Resolução	Erro Al.
Corrente	-600 a 600 A	0,8 A	2 %
Tensão	-100,0 a 100,0 V	0,1 V	1 %
Vazão de Gás	0 a 20,0 l/min.	0,1 l/min	2 %
Vel. Arame 500p	0 a 500,0 m/min	0,1 m/min	2 %
Distância m.		0,0003 m	2 %
Taxa de Amostragem. Sinais Instantâneos	5000	Hz	0,1 %

A utilização de um sistema de aquisição de dados como este se mostrou fundamental neste trabalho, pois, como mencionado na Seção 2.1.3, os valores de Velocidade de Arame setados pelo operador na fonte de soldagem Fronius CMT nem sempre correspondem aos impostos pelo processo devido aos seus diversos sistemas de controle que atuam nesta variável para manter a estabilidade do processo. Com a utilização deste sistema de aquisição informações sobre a Velocidade de Arame real aplicada ao processo se tornou disponível.

4.1.4 Termômetro Infravermelho (Pirômetro)

Um Termômetro Infravermelho, também conhecido como Pirômetro, foi utilizado como sistema de medição para monitorar o valor da temperatura da peça sob manufatura desde o fim da deposição da camada vigente até a queda à temperatura ambiente antes da próxima camada ser depositada. O modelo utilizado foi o Minipa MT-350 [40] que pode ser visualizado na Figura 4.3 seguida de suas especificações técnicas na Figura 4.4.



Figura 4.3 – Pirômetro.

- Faixa: $-30^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ ou $-22^{\circ}\text{F} \sim 1022^{\circ}\text{F}$
- Precisão: $-30^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
 $-22^{\circ}\text{F} \sim 212^{\circ}\text{F} \pm 4^{\circ}\text{F}$
 $101^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C} \pm 2\% \text{ Leitura}$
 $213^{\circ}\text{F} \sim 1022^{\circ}\text{F} \pm 2\% \text{ Leitura}$
- Resolução: $0.5^{\circ}\text{C} / 1^{\circ}\text{C}$ Automático ou 1°F
 Coeficiente de Temperatura: $\pm 0.2\% \text{ Leit. ou}$
 $\pm 0.2^{\circ}\text{C} / \pm 0.36^{\circ}\text{F}$ (o que for maior para $< 18^{\circ}\text{C} /$
 64.4°F ou $> 28^{\circ}\text{C} / 82.4^{\circ}\text{F}$)

Figura 4.4 – Especificações Técnicas do Pirômetro Utilizado.

4.1.5 Substrato de Alumínio

Os substratos utilizados foram chapas de alumínio de 3 mm de espessura, 130 mm de largura e 300 mm de comprimento, área sobre a qual é possível a deposição de diversas paredes, assim como é possível observar na Figura 4.6.

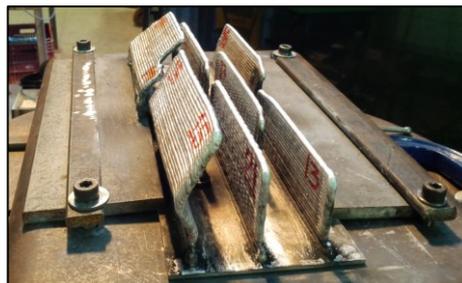


Figura 4.5 – Substrato e Paredes Manufaturadas Sobre o Substrato.

4.2 Algoritmo com Trajetórias para a Manufatura Aditiva das Paredes Inclinadas

Os *Softwares* que geram algoritmos para serem executados por manipuladores robóticos têm sido chamados de Geradores, ou Compiladores, de Trajetórias. Na Seção 3.1 foram introduzidos algoritmos desenvolvidos no próprio LABSOLDA que utilizam tanto uma abordagem interativa para gerar as dimensões do sólido quanto a abordagem baseada em modelos CAD. Porém, em qualquer uma das situações, é obrigatório que o operador tenha conhecimento, *a priori*, do valor da altura de camada que irá resultar da combinação dos parâmetros de soldagem selecionados, pois este é o valor da espessura de fatiamento do modelo CAD que deverá ser informado ao *Software* Gerador de Trajetória para ser utilizado na geração do trajeto que representa a manufatura do sólido a ser manufaturado. A obrigatoriedade de correlacionar a espessura de fatiamento do modelo CAD com a altura de camada que irá resultar dos parâmetros de soldagem está presente na utilização de qualquer *software* de manufatura aditiva, principalmente quando não há a presença de algum sistema capaz de realizar essas medições em tempo real.

Isso significa que o entendimento não só qualitativo como também quantitativo de como a altura de camada é influenciada pela variação da Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame e Offset-x se torna essencial na busca da manufatura de peças que respeitem as geometrias de seus respectivos modelos 3D dentro das tolerâncias dimensionais definidas. A complexidade do processo é elevada devido ao fato das geometrias das camadas resultantes não serem influenciadas somente pelos três parâmetros avaliados neste trabalho (Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame e Offset-X), mas também por diversos outros, como a Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) e a Temperatura Interpasse. Em uma situação real, os valores destes parâmetros que não foram avaliados neste trabalho (DBCP, Temperatura Interpasse...) devem se apresentar constantes uma vez que todo o processo se encontre bem ajustado, o que leva a necessidade de mantê-los constantes, também, durante a manufatura das paredes inclinadas utilizadas como corpos de prova neste trabalho.

Era de interesse prático que o manipulador realizasse determinadas sequências de movimentos após a deposição de cada camada a fim de facilitar a retirada do bocal de proteção e o ajuste da DBCP. Além disto, era de interesse do ponto de vista metrológico que o valor de cada um dos ajustes de DBCP fosse registrado de uma maneira precisa e eficiente. E, por fim, também era de interesse do ponto de vista do controle geométrico que cada camada fosse depositada em iguais condições, principalmente de Temperatura Interpasse, de acordo com o ex-

posto na Seção 2.4. Dessa maneira, tornou-se necessário o desenvolvimento de uma forma eficiente não só para depositar cada cordão em mesmas condições de DBCP e de Temperatura Interpasse, mas também de mensurar a altura de cada cordão depositado.

Foi com foco nestes detalhes que um algoritmo foi desenvolvido para este trabalho diretamente em linguagem INFORM III (MOTOMAN-Yaskawa) com funcionalidades que buscam ajudar no levantamento de dados e na caracterização dos depósitos de material realizados pelo processo de manufatura em questão. Desta maneira, garantiu-se não só que todas as amostras fossem manufaturadas em iguais condições de DBCP e de Temperatura Interpasse, mas também se realizou o registro da altura de cada camada depositada de maneira precisa e em tempo de processo.

Apesar da ISO/ASTM 52900:2015 - *Additive Manufacturing -- General Principles – Terminology* definir que Manufatura Aditiva é um processo de fabricação que necessariamente utiliza modelos CAD para a definição das trajetórias que deverão ser realizadas pelo manipulador durante o processo de deposição de material, o algoritmo desenvolvido para a manufatura das paredes utilizadas como corpos de prova neste trabalho não se baseia em CAD. O autor deste trabalho reconhece a definição da ISO/ASTM em relação a obrigatoriedade da utilização de modelos CAD na Manufatura Aditiva por enxergar ser essa uma característica que a torna, de fato, um processo de fabricação do ponto de vista da engenharia e não apenas um amontoado de material [7]. Esta fundamentação em desenhos técnicos com dimensões e tolerâncias bem definidas também é o que torna o processo de fabricação Usinagem diferente de uma mera escultura artística ou amadora. Porém o algoritmo descrito nesta seção utiliza a abordagem Iterativa exposta na Seção 3.1.1 e foi desenvolvido para ser utilizado na etapa de caracterização do processo através da manufatura de amostras representativas, as quais exigiam garantias de que determinados parâmetros (DBCP, Temperatura Interpasse...) fossem mantidos constantes durante o processo.

Na Figura 4.6 é exposto o esquemático de toda sequência de movimentação do manipulador necessária para a deposição de camadas em iguais condições de DBCP e Temperatura Interpasse.

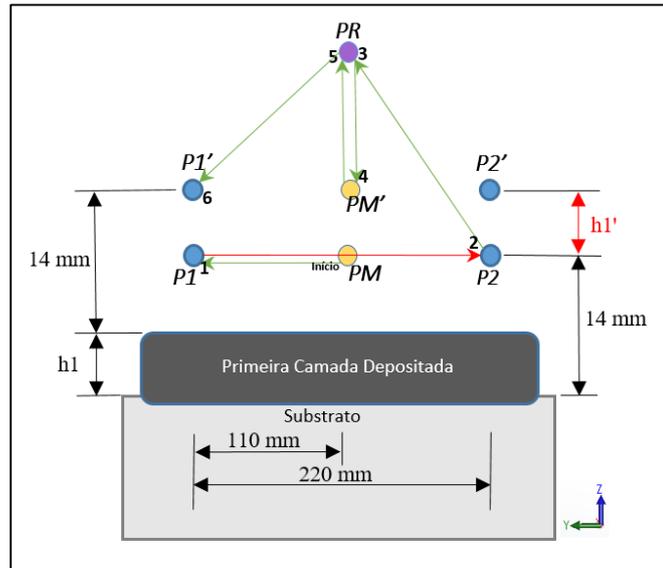


Figura 4.6 – Sequência de Movimentações com Ponto de Recuo.

A estratégia implementada nos algoritmos utilizados para a manufatura dos corpos de prova define, de forma dinâmica e em tempo de processo, dois pontos no espaço, chamados de **Ponto 1** (P1) e **Ponto 2** (P2), para serem utilizados como trajetórias na deposição de cada uma das camadas das paredes manufaturadas. Ambos os pontos, P1 e P2, são configurados automaticamente pelo algoritmo a partir de um **Ponto Médio** (PM) definido pelo operador através do modo *teaching*. O PM deve ser localizado a 14 mm acima do Substrato⁵ para que os pontos P1 e P2 sejam, então, definidos matematicamente pelo algoritmo posicionando-os na mesma altura do PM, porém afastados deste em 110 mm na direção do eixo-Y e em sentidos opostos. A seta vermelha no esquemático indica a direção e o sentido da movimentação realizada pelo manipulador com o arco aberto, ou seja, depositando material, e as setas verdes representam as movimentações realizadas sem com o arco apagado (sem deposição de material).

Após a deposição da camada atual, o novo Ponto Médio, intitulado PM' no esquemático apresentado, é registrado a 14 mm acima da aresta superior da parede sob manufatura com o auxílio de um gabarito, conforme ilustrado na Figura 4.7, e toda a sequência se repete. O ponto de cor roxa intitulado PR (Ponto de Recuo) representa o ponto no espaço no qual a retirada e a reinserção do bocal de proteção da tocha são realizadas antes de cada reajuste de DBCP.

⁵ A Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) adotada para este trabalho é 14 mm.



Figura 4.7 – Reajuste da DBCP.

As seqüências relativas a deposição de camadas e ao reajuste da DBCP são representadas pelo fluxograma da Figura 4.8.

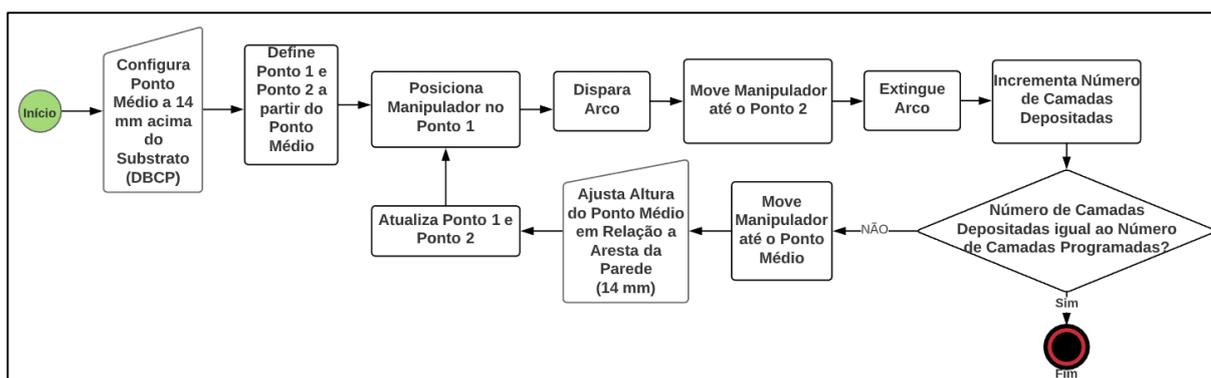


Figura 4.8 – Fluxograma do Ajuste da DBCP.

Para se atingir os objetivos deste trabalho era necessário obter o valor da altura de cada uma das camadas depositadas, individualmente, para que prováveis variações neste valor fossem percebidas e investigadas. Desta maneira, algum Sistema de Medição que fosse capaz de obter a altura de cada uma das camadas logo após sua respectiva deposição teria que ser obrigatoriamente utilizado. Inúmeros sistemas poderiam ser considerados, desde os mais simples até os mais complexos, porém os mais simples, como réguas e paquímetros, poderiam não possuir resolução e nem precisão suficientes para a aplicação deste trabalho; já os mais complexos, que utilizam câmeras e tratamento de imagem, poderiam se tornar inviáveis pela difícil disponibilidade e elevado tempo de implementação. A alternativa encontrada foi utilizar o próprio manipulador antropomórfico para realizar as medições das alturas de cada uma das camadas depositadas por possuir características que o assemelham de uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC).

Para se obter uma medição da altura de cada um dos cordões depositados foi utilizada uma estratégia na qual as coordenadas do Ponto Médio são obtidas tanto antes quanto após o Reajuste de DBCP. É possível observar na Figura 4.7 que a distância relativa entre o Ponto Médio (PM), utilizado para depositar uma camada, e um novo Ponto Médio (PM'), configurado a 14 mm acima da última camada e utilizado para a geração da trajetória necessária para a deposição da próxima camada, corresponde à altura da camada que acabara de ser depositada. Assim, desenvolveu-se uma lógica na qual os valores das coordenadas do eixo-Z de dois Pontos Médios consecutivos eram subtraídos e os resultados destas operações eram registrados em variáveis do tipo Real para serem transferidas para um computador pelo operador ao fim de todo o processo. Ao final, foram representados em gráficos com o auxílio de *softwares* como o Microsoft Excel e MATLAB. O fluxograma destas operações está representado na Figura 4.9

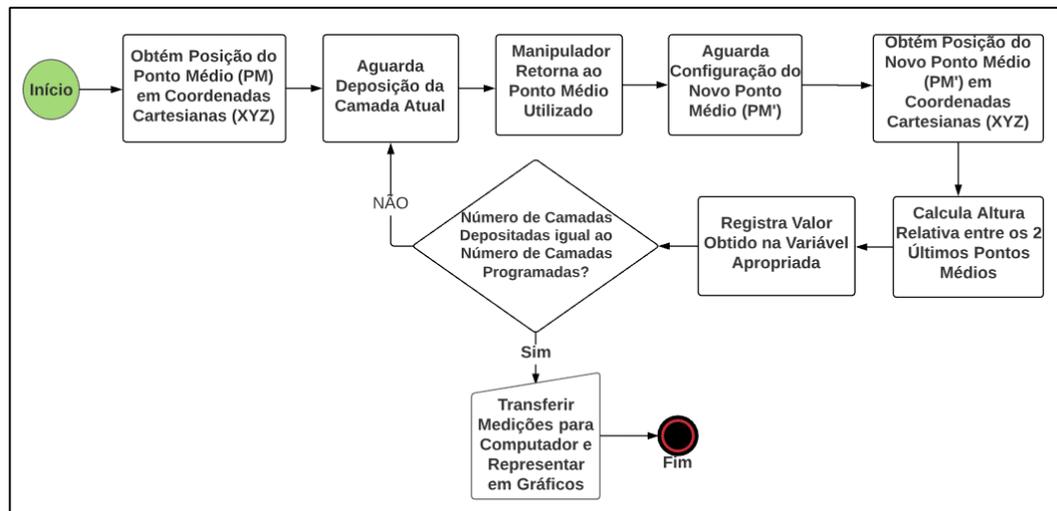


Figura 4.9 – Fluxograma da Medição, Registro e Visualização das Alturas das Camadas.

O resultado da operação de subtração que determina a altura da última camada depositada é registrado na variável do tipo Real relativa ao número da camada, ou seja, o valor da altura da primeira camada é registrado na variável R001; o valor da altura da segunda camada é registrado na variável R002; e assim por diante. Por padrão, existem 128 variáveis do tipo Real disponíveis para uso, mas essa quantidade pode ser expandida de acordo com a necessidade da aplicação. Porém como neste trabalho o número de camadas depositadas foi fixado em 30 o número de variáveis disponíveis se apresentou suficiente. A forma com que a lista de variáveis do tipo Real é exibida ao operador é demonstrada na Figura 4.10.


```

MOVL P002 V=33.3
INC I000
*DBCP
MOVL C00001 V=33.3
PAUSE
GETS PX0000 $PX001
GETE D003 P000 (3)
SETE P001 (3) D003
SETE P002 (3) D003
SET R[I000] EXPRESS D003 - D099
SET D010 EXPRESS D010 + D003 - D099
SET D009 EXPRESS D010 / I000
SET D099 D003
GETE D000 P001 (1)
ADD D000 D001
SETE P001 (1) D000
SETE P002 (1) D000
JUMP *INICIO IF I000<I001
END

```

4.3 Aferição do Manipulador Antropomórfico

Foi realizado um procedimento de aferição do manipulador antropomórfico HP20D antes da realização da manufatura aditiva das paredes utilizadas como amostras neste trabalho. Este procedimento de aferição se consistiu na Definição da *Home Position* do manipulador, na Calibração da TCP e, por fim, na Verificação da Aferição realizada através da medição de gabarito e da velocidade definida pelo usuário para as movimentações.

4.3.1 Definição da *Home Position*

O manipulador utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi um robô antropomórfico de seis eixos, assim como descrito na Seção 2.3, e, como todo manipulador deste tipo, sua cinemática é definida através de cálculos matriciais realizados por seu controlador. Porém, para que estes cálculos resultem na trajetória desejada é necessário posicionar o manipulador em uma postura bem definida e registrar os valores dos encoders absolutos relativos a esta postura na função apropriada do sistema operacional do manipulador utilizando o *Teach Pedant*. A função a ser acessada é a chamada *Home Position* na aba *Robot* e a postura que o manipulador deve ser posicionado antes da execução da função é a definida pelo alinhamento das marcações presentes em cada um dos seis eixos do manipulador e exibidas na Figura 4.11.

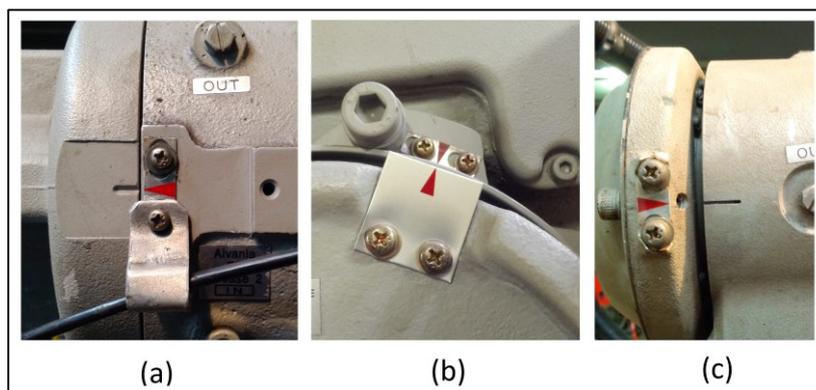


Figura 4.11 – Marcações a serem alinhadas para a definição do *Home Position*.

Com todas as marcações alinhadas e a execução da função de *Home Position*, o sistema de controle do manipulador possui a informação exata do atual posicionamento de cada um de seus eixos e desta maneira é capaz de realizar a dinâmica apropriada para que o *Tool Center Point* (TCP) realize a trajetória programada, principalmente as que envolvem rotações.

4.3.2 Calibração da TCP

No sistema operacional do manipulador HP-20D existe uma função chamada *Tool Calibration* (Calibração de Ferramenta), sobre a qual detalhes podem ser encontrados em [41] e se difere da função de definição do *Home Position*. Após a realização do procedimento de definição da *Home Position* o sistema de controle projeta o *Tool Center Point* (TCP), ou, em português, o Ponto do Centro da Ferramenta, exatamente no centro do flange e considera que uma ferramenta com tamanho 0 (zero) mm nas direções X, Y e Z, além de uma orientação (Rx, Ry e Rz) alinhada a orientação do flange, esteja sendo utilizada. Já a função *Tool Calibration* é a responsável por deslocar e rotacionar o ponto considerado pelo controlador como o Ponto do Centro da Ferramenta do flange para o ponto central da ferramenta real acoplada ao flange. Este procedimento se consiste no registro de cinco posturas diferentes sobre um mesmo ponto no espaço para que a função utilize os valores destes registros para realizar os cálculos necessário para a definição não só das dimensões da ferramenta utilizada (X, Y e Z), mas também da orientação da ferramenta no espaço (Rx, Ry e Rz) desta. No caso do trabalho exposto nesta dissertação, a ferramenta utilizada foi sempre uma tocha de soldagem, mais especificamente o modelo *Robacta* desenvolvida para ser utilizada exclusivamente com o sistema CMT da *Fronius*. Exemplo das posturas utilizadas podem ser visualizadas na Figura 4.12.

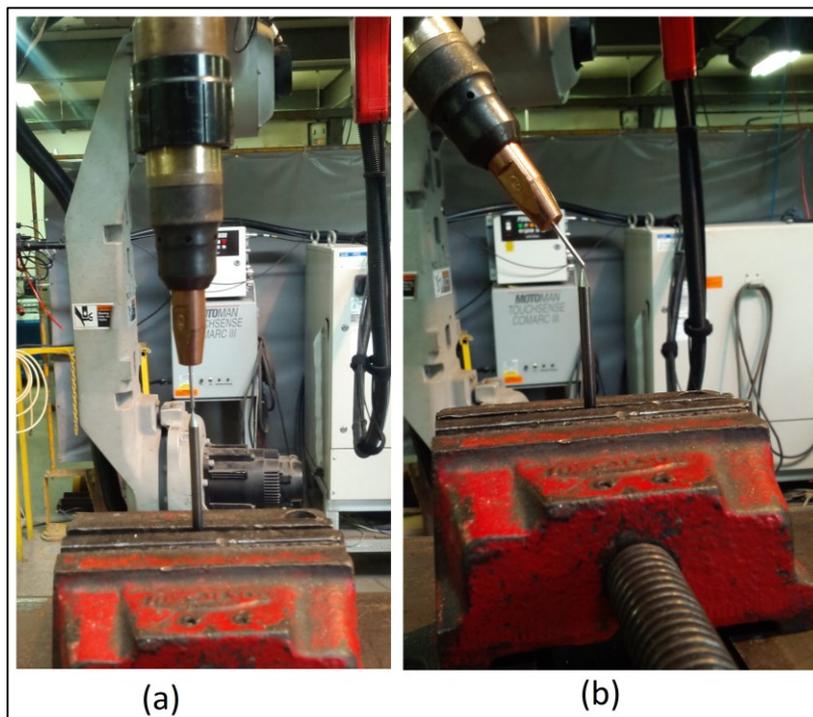


Figura 4.12 – Exemplos de Posturas para Calibração da Ferramenta.

No caso, foi utilizado um eletrodo de tungstênio afiado e fixado com uma morsa sobre a bancada para definir o ponto fixo no espaço. Um *stick-out* (comprimento do arame) de 14 mm foi definido com a utilização de um gabarito e cinco posturas com a ponta do arame coincidindo com a ponta do eletrodo foram registradas. Após o registo e a execução da função foram obtidas as dimensões de $X = 0,567$ mm, $Y = -32,730$ mm, $Z = 415,219$ mm e a orientação $R_x = -2,7253^\circ$, $R_y = -53,3700^\circ$ e $R_z = 89,9580$ para a ferramenta (tocha de soldagem) utilizada.

4.3.3 Verificação da Aferição

Alguns procedimentos foram realizados para verificar se a definição do *Home Position* e a Calibração da Ferramenta foram realizadas de forma apropriada. Para realizar a verificação da Calibração da Ferramenta foram realizados movimentos de rotação, utilizado o *Teach Pendant*, em torno de cada um dos três eixos cartesianos (X, Y e Z) e monitorou-se o deslocamento da *Tool Center Point* (TCP), ou seja, monitorou-se a ponta do arame relativo a um *stick-out* de 14 mm. Apesar das deposições neste trabalho terem sido realizadas com a tocha de soldagem sempre perpendicular ao substrato, rotações em torno dos eixos X, Y e Z foram realizadas para a verificação da Calibração da Ferramenta, pois este tipo de movimentação é totalmente dependente desta calibração – quanto menos a TCP se alterar durante as rotações melhor a qualidade

da calibração. Desta maneira, foram constatadas deslocamento da TCP de ordens menores do que 1 mm ao serem realizadas rotações próximas de 180°, o que constatou que a função de Calibração de Ferramenta determinou valores satisfatoriamente próximos ao real.

Já para verificar a definição do *Home Position* foram realizados procedimentos que envolvessem deslocamentos lineares da TCP. Uma peça com dimensões bem definidas no plano XY (70 x 58 mm) foi utilizada como gabarito e comandos para que deslocamentos idênticos às dimensões da peça foram programados através do *Teach Pendant*. Ou seja, quatro pontos foram configurados através de suas coordenadas cartesianas considerando os valores das dimensões da peça e foi verificado que durante os deslocamentos entre os pontos a TCP se manteve exatamente sobre as arestas da mesma constatando a coerência dos deslocamentos lineares no plano XY, procedimento ilustrado através da Figura 4.13.



Figura 4.13 – Gabarito para Verificação dos Deslocamentos no Plano-XY.

Já para verificar os deslocamentos na direção do eixo-Z foi utilizado um gabarito muito comum no campo da soldagem utilizado para a medição da Distância Bico de Contato-Peça (DBCP). Este gabarito é obtido através da usinagem e possui medidas que variam de 8 a 24 mm com incrementos de 1 mm, ou seja, com a utilização deste gabarito é possível ajustar a DBCP em valores como, por exemplo, 8, 9, 10, 11 mm e assim por diante. O gabarito em questão, assim como a tocha de soldagem e o substrato sobre o qual a verificação desta aferição foi realizada podem ser visualizados na Figura 4.14.

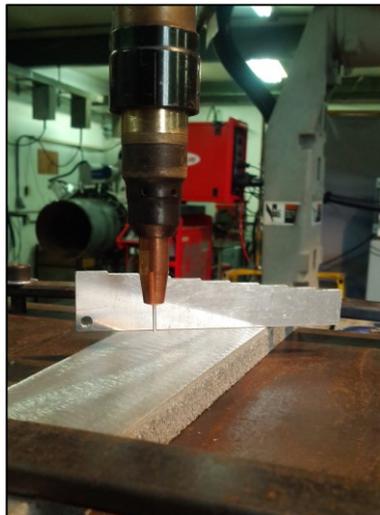


Figura 4.14 – Gabarito para Verificação das Medições de Altura de Camada.

O algoritmo desenvolvido para a deposição e medição da Altura das Camadas, detalhado na Seção 4.2, também foi utilizado neste procedimento. Porém, além de deposições serem realizadas e a DBCP reajustada sempre para o mesmo valor, as trajetórias foram realizadas com a fonte de soldagem desligada e a DBCP foi reajustada para um valor 1 mm maior, de acordo com o gabarito utilizado, a cada suposta deposição. Na prática, a DBCP foi inicialmente ajustada em 13 mm e após a realização da trajetória de uma suposta deposição a DBCP foi reajustada para 14 mm e, após a realização da próxima suposta deposição, a DBCP foi reajustada para 15 mm e assim por diante, sempre com a utilização do gabarito de DBCP citado e exibido na figura anterior.

Como o algoritmo fornece medições relativas ao posicionamento anterior do manipulador, em um cenário ideal os valores das medições realizadas deveriam ser todos de 1 mm, mas no cenário real existem incertezas de posicionamento do manipulador ($\pm 0,1$ mm) além das incertezas do processo de usinagem utilizado para a confecção do gabarito. Os resultados de cada uma das dez medições e o valor médio destas medições podem ser visualizados na Figura 4.15.

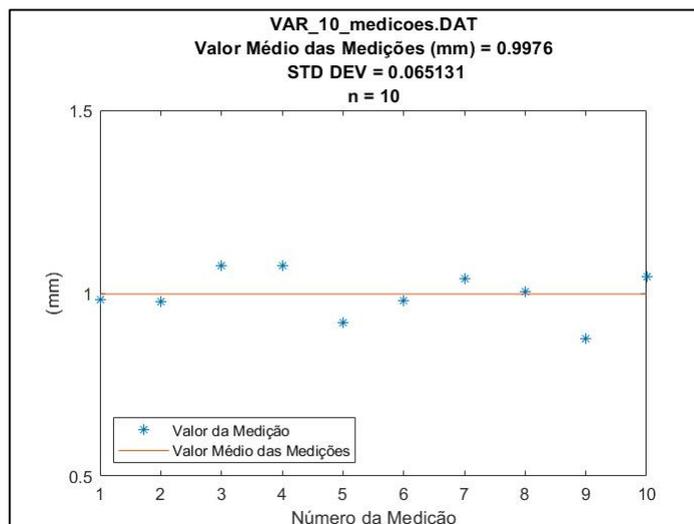


Figura 4.15 – Resultado das Medições do Gabarito.

É possível observar que os valores das medições se encontram todos em torno de 1 mm com o valor médio sendo de 0,983 mm que, considerando a incerteza de posicionamento do manipulador, fornece um resultado de medição de 0,983 +/- 0,1 mm, o que engloba o valor teórico de 1 mm, demonstrando o condicionamento da estratégia de medição adotada.

Além da verificação da correspondência entre os deslocamentos programados e os realmente executados, foi também verificado se a velocidade de deslocamento programada correspondia a velocidade executada pelo manipulador durante

4.4 Matriz de Experimentos

É conveniente que todas as camadas de um sólido a ser manufaturado aditivamente possuam a mesma Altura de Camada não importando o ângulo formado entre elas, assim como descrito na Introdução desta dissertação. Dessa forma, definiu-se uma Matriz de Experimentos para o levantamento dos dados necessários para a implementação de uma funcionalidade nos “Geradores de Trajetórias CAD/CAM” já utilizados para que a sequência de pontos da trajetória gerada seja sincronizada com valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame definidos como necessários para garantir que todas as camadas possuam sempre a mesma altura indiferentemente do ângulo formado entre elas.

As paredes manufaturadas aditivamente que serviram como amostras neste trabalho se diferenciaram uma das outras pela variação de apenas um dos três parâmetros avaliados: **Velocidade de Soldagem**, **Velocidade de Arame** e **Offset_x**. A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3 exibem os parâmetros utilizados nos experimentos realizados neste trabalho.

Tabela 4.2– Parâmetros para Manufatura das Amostras. Parte I.

Va (m/min)	Offset_x (mm)	Vs (m/min)	h (mm/camada)	Θ (°)	Va (m/min)	Offset_x y (mm)	Vs (m/min)	h (mm/camada)	Θ (°)	
2,2	0	0,35			2,5	0	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			
	0,5	0,35				0,5	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			
	1	0,35				1	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			
	1,5	0,35				1,5	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			

Tabela 4.3– Parâmetros para Manufatura das Amostras. Parte II.

Va (m/min)	Offset_x (mm)	Vs (m/min)	h (mm/camada)	Θ (°)	Va (m/min)	Offset_x y (mm)	Vs (m/min)	h (mm/camada)	Θ (°)	
2,8	0	0,35			3,1	0	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			
	0,5	0,35				0,5	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			
	1	0,35				1	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			
	1,5	0,35				1,5	0,35			
		0,50					0,50			
		0,65					0,65			

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As paredes que foram manufaturadas como amostras no desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas para avaliar características geométricas (Altura de Camada e Ângulo) de paredes de alumínio manufaturadas aditivamente através da deposição de cordões sobrepostos através do processo de soldagem **CMT Advanced**, que é definido como uma variante do processo MIG/MAG Convencional. Todas as deposições foram realizadas com a tocha de soldagem mantida em posição perpendicular ao substrato, ou seja, em nenhum momento ocorreu a rotação da tocha o que significa que um manipulador com apenas 3 eixos, como uma mesa cartesiana, é capaz de reproduzir as trajetórias utilizadas nos experimentos descritos neste documento.

Para avaliar o efeito da variação da **Velocidade de Soldagem**, **Velocidade de Arame** e **Offset-x** na manufatura aditiva de paredes de alumínio utilizando o processo de soldagem

CMT Advanced, foram manufaturadas 49 paredes durante a fase de experimentos deste trabalho. É importante ressaltar que as características geométricas das paredes manufaturadas, dentre elas a Altura de Camada e o Ângulo formado com a Normal, são efeitos, em maior escala, dos valores selecionados para os três parâmetros citados e, em menor escala, de outras condições inerentes ao processo como Vazão de Gás, Temperatura Ambiente, Massa do Substrato, Distância Bico de Contato-Peça, Temperatura Interpasse, dentre outras.

5.1 Velocidade de Arame Setada e Velocidade de Arame Medida

Após a manufatura da primeira parede que seria utilizada como amostra ($V_a = 2,2$ m/min, $V_s = 0,5$ m/min e $\text{Offset}_x = 0$ mm) foi observado que a Altura de Camada de uma região próxima ao início das deposições resultou em uma altura consideravelmente menor do que a altura do restante da parede, o que pode ser facilmente observado na Figura 5.1. A seta vermelha indica o sentido e direção das deposições.

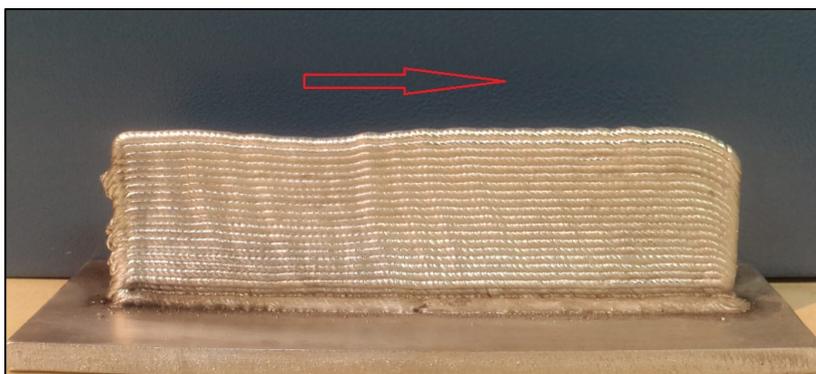


Figura 5.1 – Primeira Parede Manufaturada.

Ao analisar os dados da medição da Velocidade de Arame das deposições referentes a manufatura da parede em questão, exibidos na Figura 5.2, é possível observar ao menos duas características que impactam diretamente na geometria da parede: um longo período transitório e um valor de regime permanente acima do valor setado, consistindo em $V_{a_setado} = 2,2$ m/min e $V_{a_medido} = 2,6$ m/min.

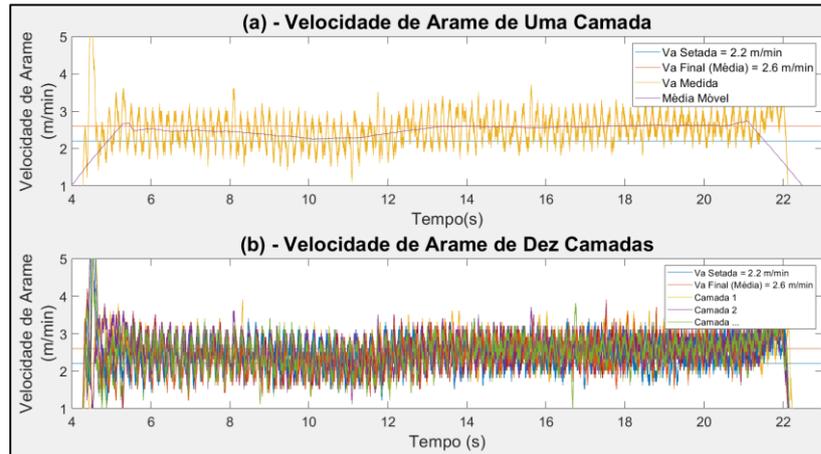


Figura 5.2 – Velocidade de Arame das Camadas Depositadas.

O gráfico da Velocidade de Arame ao longo do tempo do CMT Advanced assume formato senoidal devido ao fato da dependência entre a taxa de fusão de arame e a forma com que o eletrodo está polarizado: direta ou reversamente. Esta diferença na taxa de fusão de arame, que ocorre a cada mudança de polaridade do eletrodo, faz o cabeçote responder a esta variação acelerando ou retardado a velocidade com que os roletes alimentam arame de velocidade. O valor médio desta onda senoidal corresponde ao valor da Velocidade de Arame que está sendo aplicada ao processo. Tal comportamento é verificado pela correlação entre a frequência de oscilação do gráfico da Velocidade de Arame e a frequência da mudança de polaridade do eletrodo, sendo ambas $\cong 6$ hertz.

O valor médio da onda senoidal em questão define o valor da Velocidade de Arame Medida do processo e deve corresponder ao valor da Velocidade de Arame Setada na tela da fonte de soldagem pelo operador. Porém, de acordo com [10], [15], a estratégia de controle adotada pelo fabricante fixa um determinado formato de onda de corrente (intensidades e tempos de duração) baseado no valor da Velocidade de Arame Setada pelo operador e realiza o ajuste na Velocidade de Arame Real para que a frequência de transferência de material seja a esperada. Este controle é realizado através da monitoração do *buffer* do equipamento, ou seja, se está ocorrendo um número menor de eventos de transferência metálica do que o esperado o *buffer* tende a esvaziar e o sistema de controle tende a aumentar a Velocidade de Arame no cabeçote até que a frequência de transferência seja a esperada. Por outro lado, caso um número maior de eventos de transferência metálica esteja ocorrendo, o *buffer* do equipamento tenderá a encher e o sistema de controle implementado pelo fabricante tenderá diminuir a Velocidade de Arame no cabeçote a fim de equiparar a frequência de transferência esperada com a frequência de transferência real.

Como as curvas sinérgicas utilizadas foram desenvolvidas pelo fabricante considerando aplicações tradicionais de soldagem (união e revestimento), cogitou-se derivar das condições de deposição pouco ortodoxas a maior taxa de fusão observada. Desta maneira, foram realizados ensaios sobre chapa utilizando os mesmos parâmetros para verificar alguma não conformidade, o qual pode ser observado no gráfico da Figura 5.3.

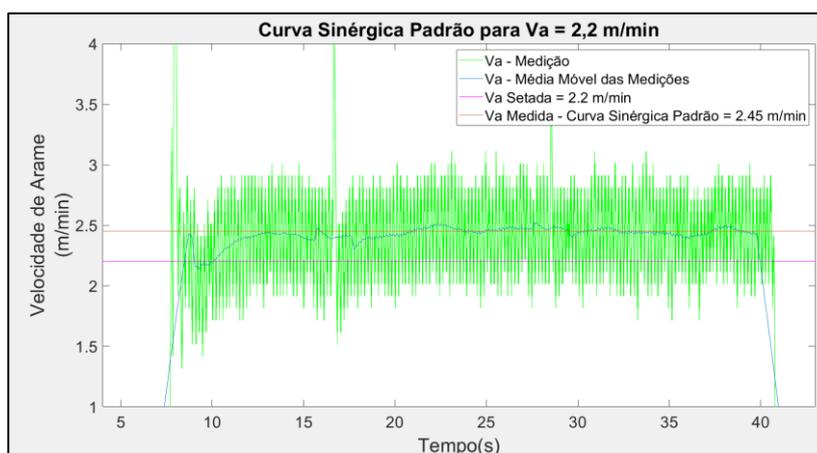


Figura 5.3 – Experimento Sobrechapa antes da Otimização da Curva Sinérgica.

A observação do gráfico torna evidente que mesmo quando a deposição foi realizada sobre uma chapa de alumínio a Velocidade de Arame Medida foi maior do que a Velocidade de Arame Setada, assim como quando depositadas uma sobre a outra na manufatura aditiva da parede. Ou seja, a taxa de fusão de arame resultante dos parâmetros definidos pela curva sinérgica do fabricante se apresentava maior do que a esperada mesmo quando o processo era realizado em condições favoráveis. O mesmo comportamento foi observado para todos os outros três valores de Velocidade de Arame utilizados neste trabalho: 2,5, 2,8 e 3,1 m/min.

Os procedimentos de medição da resistência e indutância do circuito de soldagem do próprio equipamento Fronius [42] foram realizados e os valores se atualizaram automaticamente de **10,0 mOhm** e **14 μ H** para **22,6 mOhm** e **15 μ H**. Porém a repetição dos experimentos não demonstrou nenhuma diferença perceptível. Também foram realizados ensaios variando os parâmetros **Correct Arco Voltag** e **Correção Dinâmica** que atuam no comprimento do arco e estão disponíveis ao operador no equipamento Fronius. Entretanto, mais uma vez, nenhuma alteração considerável na Velocidade de Arame Medida foi percebida.

Um fator que influencia diretamente a taxa de fusão nos processos CMT e tratado por [10], [15] e também na Seção 2.6.1 deste documento está relacionado ao comprimento do *stick-out*. É de conhecimento que tanto no CMT quanto nos processos MIG convencionais o aumento do com-

primimento do *stick-out* gera um aumento na taxa de fusão do arame devido a maiores contribuições do Efeito Joule para o aquecimento do arame além de outros fatores [21]. De maneira oposta, a diminuição do comprimento do *stick-out* resulta em uma diminuição da taxa de fusão de arame. Desta maneira, foram realizadas deposições sobrechapa utilizando diferentes comprimentos de *Stick-out* e a Velocidade de Arame resultante pode ser observada no gráfico da Figura 5.4.

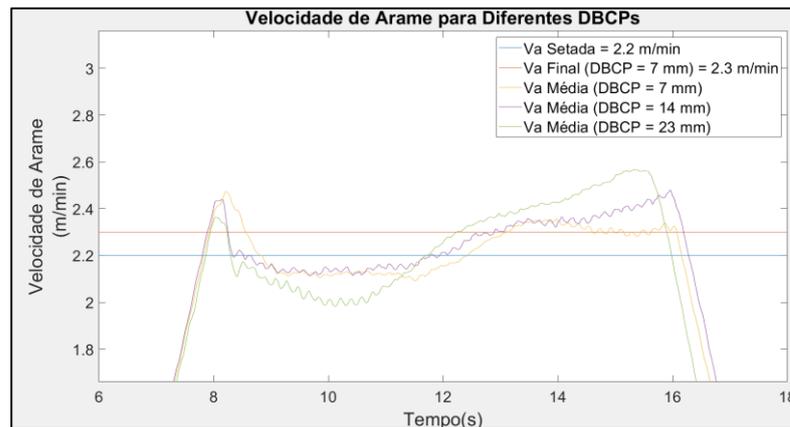


Figura 5.4 – Experimento Sobre Chapa Variando Comprimento do *Stick-out*.

É possível observar que o aumento da DBCP realmente aumenta a taxa de fusão de arame e que, por outro lado, a diminuição da DBCP diminui a taxa de fusão de arame. Porém, de acordo com o gráfico, para atingir a Velocidade de Arame Setada de 2,2 m/min seria necessário a utilização de uma DBCP menor do que 7 mm, o que tornaria o processo inviável. Desta maneira, a tentativa de atingir o valor de Velocidade de Arame Setada através da diminuição da DBCP foi descartada.

A fim de igualar a Velocidade de Arame Medida com a Velocidade de Arame Setada, também foram realizados ensaios relacionados a quantidade de curtos-circuitos e, consequentemente, de transferências realizadas com o eletrodo em polaridade direta (eletrodo assumindo polaridade positiva) e reversa (eletrodo assumindo polaridade negativa). O período da forma de onda padrão do CMT Advanced é constituído de 7 eventos de curto-circuito com o eletrodo polarizado diretamente e 7 eventos de curto-circuito com o eletrodo polarizado reversamente. Intuitivamente, esperava-se que a taxa de fusão de arame aumentasse caso o número de curtos-circuitos realizados com o eletrodo em polaridade negativa fosse aumentado, porém ocorreu exatamente o oposto: a taxa de fusão diminuiu e, consequentemente, a Velocidade de Arame Medida se apresentou menor. A explicação para este comportamento se baseia no fato das intensidades de corrente na porção negativa da forma de onda original serem suficientemente menores ao ponto de que o aumento da sua contribuição no período total da onda diminuiu a

corrente eficaz de maneira a diminuir a taxa de fusão de arame e, conseqüentemente, a Velocidade de Arame Medida. Por outro lado, quando a quantidade de eventos de curto-circuito com o eletrodo em polaridade positiva aumenta em relação a quantidade de eventos de curto-circuito com o eletrodo em polaridade negativa, a corrente eficaz tende a aumentar ao ponto de aumentar também a taxa de fusão de arame e, conseqüentemente, a Velocidade de Arame Medida.

Através da realização destes experimentos observou-se que pequenas alterações no Valor da Corrente RMS da forma de onda utilizada influenciava consideravelmente na taxa de fusão de arame (e também na Velocidade de Arame). Desta maneira, decidiu-se manter a proporção do número de eventos de curto-circuito com o eletrodo positivo e a quantidade de eventos de curto-circuito com o eletrodo negativo assim como na forma de onda original (7 eventos no positivo e 7 eventos no negativo) e ajustou-se os valores das Correntes de Arco (*boost* e *burn*) e da Corrente de Curto-Circuito (*sc - short circuit*) até que a Velocidade de Arame Medida correspondesse a Velocidade de Arame Setada. Para realizar estes ajustes utilizou-se a função de Otimização da Onda, dedicada a esta finalidade e disponível ao operador no próprio equipamento Fronius. Os gráficos da Velocidade de Arame Medida antes e depois dos ajustes realizados nas intensidades das correntes citadas podem ser visualizados nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 para as Velocidades de Arame de 2,2, 2,5, 2,8 e 3,1 m/min, respectivamente. A Velocidade de Soldagem utilizada foi de 0,50 m/min para todos os quatro gráficos.

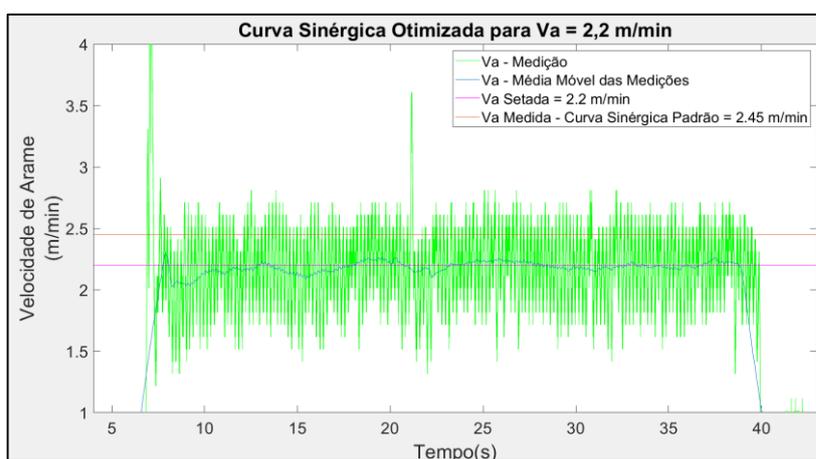


Figura 5.5 – Experimento Sobre Chapa após Otimização da Curva Sinérgica.



Figura 5.6 – Ensaio Sobre Chapa antes e após Otimização da Curva Sinérgica.

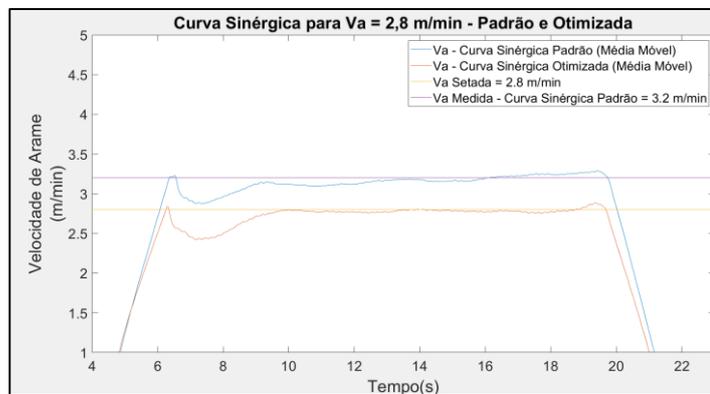


Figura 5.7 – Ensaio Sobre Chapa antes e após Otimização da Curva Sinérgica.

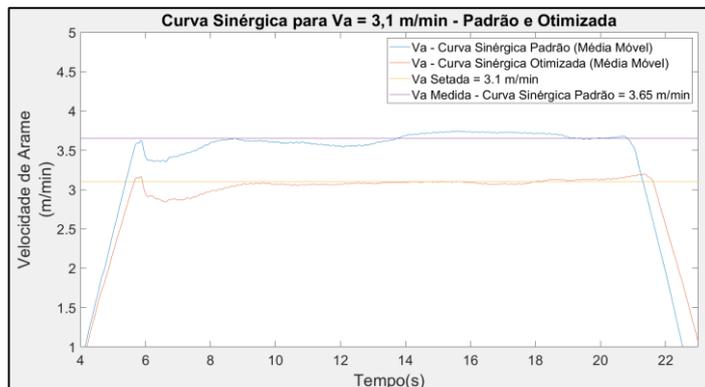


Figura 5.8 – Ensaio Sobre Chapa antes e após Otimização da Curva Sinérgica.

Como é possível observar nos gráficos apresentados, após os ajustes (otimização) realizados na forma de onda através da função disponibilizada ao operador, o valor da Velocidade de Arame Medida pelo Sistema de Aquisição Portátil II (SAP II) passou a corresponder ao valor da Velocidade de Arame Setada no próprio equipamento. Em outras palavras, a Velocidade de Arame em regime permanente passou a corresponder ao valor de Referência setado pelo operador. Este ajuste garante uma maior coerência entre o Valor Setado e o Valor Real, porém um longo período transitório, responsável pela menor altura apresentada na região à esquerda da

parede manufaturada, ainda era claramente observável mesmo na resposta da Velocidade de Arame da curva otimizada.

5.2 Redução da Duração dos Transitórios

Nos processos de soldagem baseados no MIG/MAG Convencional, o início do cordão de alumínio geralmente possui algumas características indesejáveis devido à baixa temperatura em que o substrato se encontra. Como este é um problema recorrente, os fabricantes se habituaram a oferecer rotinas de início de processo que visam contornar ou ao menos minimizar estas características de “solda fria” no início dos cordões.

Duas destas rotinas que atuam no início no cordão e disponibilizadas pela fabricante Fronius na fonte de soldagem CMT Advanced são chamadas de **Tempo de Ignição** e **HotStart**. Na Figura 5.9 estão apresentados os oscilogramas de Corrente (azul) e Tensão (vermelho) desde antes da abertura do arco até o início da rotina de curtos-circuitos e alternância do sentido da corrente.

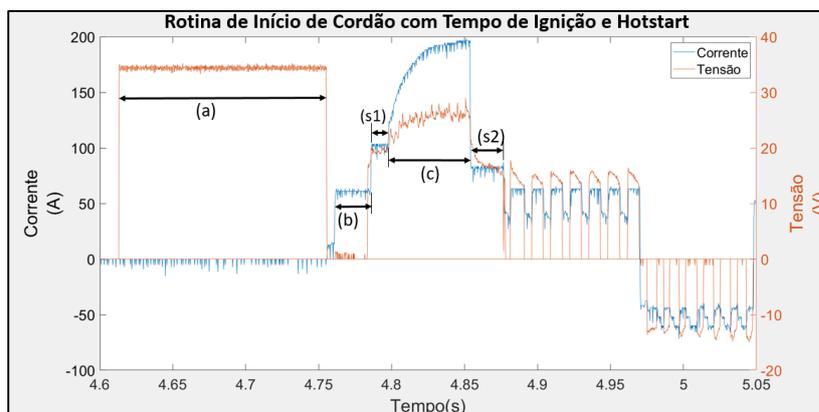


Figura 5.9 – Forma de Onda da Corrente com Tempo de Ignição e HotStart.

A região destacada como (a) é referente ao momento no qual ainda não há arco elétrico, a Tensão a Vazio é aplicada ao processo e o arame é alimentado continuamente até o contato com a peça (curto-circuito). Já na região destacada como (b) é referente ao momento no qual há contato entre o eletrodo e a peça (curto-circuito), há passagem de corrente elétrica (Corrente de Soldagem), mas não há arco elétrico (tensão tendendo a zero). O valor da corrente imposta pela fonte nesta região (b) é definido pelo parâmetro “Corrente de Ignição” no equipamento Fronius, que no caso do oscilograma exposto está setada em 60 A; já o tempo durante o qual esta corrente é aplicada é definida pelo parâmetro “Tempo de Ignição”, que no caso estava setada em 50 ms.

A região “s1” (e também a “s2”) recebeu esta denominação neste documento devido a palavra “sempre” porque é uma região que está sempre presente no início do processo CMT Advanced não importando se as opções de “Tempo de Ignição” e “HotStart” estejam habilitadas ou desabilitadas. Já a região denominada como “c” corresponde ao “HotStart”, o qual faz a corrente atingir o valor configurado pelo operador (200 A, no caso) com uma dinâmica sobre-amortecida (sem sobressinal) e bem definida. Para efeito de comparação, os oscilogramas das quatro combinações de rotina de início de cordão possíveis de serem formadas com o “Tempo de Ignição” e “HotStart” são exibidos na Figura 5.10.

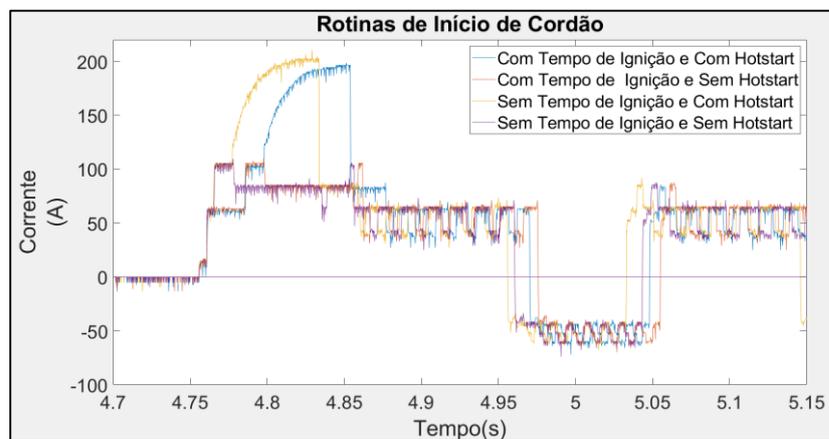


Figura 5.10 – Diferentes Configurações de Rotina de Inicialização.

Apesar das diferenças evidentes nos oscilogramas da corrente e da tensão das quatro combinações de início de cordão possíveis quando utilizando “Tempo de Ignição” e/ou “HotStart”, nenhuma diferença considerável foi notada entre as dinâmicas das respostas da Velocidade de Arame Medida de cada um dos casos. Os gráficos das dinâmicas das respostas da Velocidade de Arame para cada um dos casos podem ser visualizados na Figura 5.11.

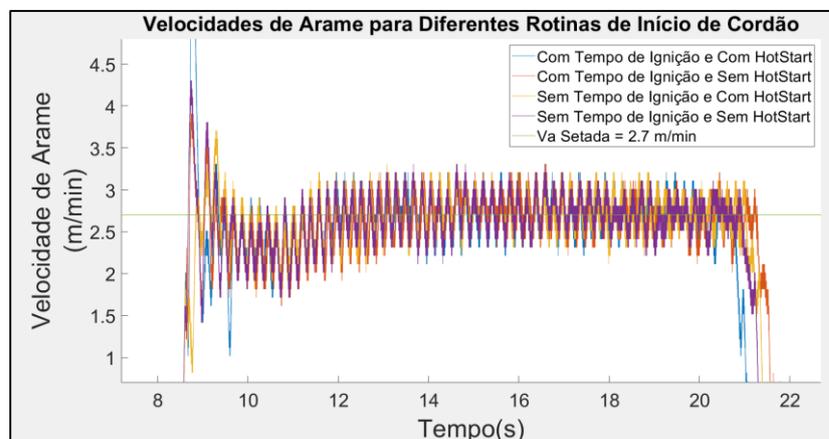


Figura 5.11 – Respostas da Velocidade de Arame.

Como é possível observar, não ocorreram diferenças significativas na duração dos transitórios das respostas das velocidades de arame em cada um dos casos, as quais assumiram dinâmicas idênticas, salvo nos primeiros instantes que são relativos à aceleração de arame antes da abertura do arco. Porém, apesar das diferenças nas dinâmicas das respostas das velocidades de arame não serem perceptíveis, o início dos cordões relativos a cada uma das combinações se mostraram consideravelmente diferentes, como é possível observar na Figura 5.12.

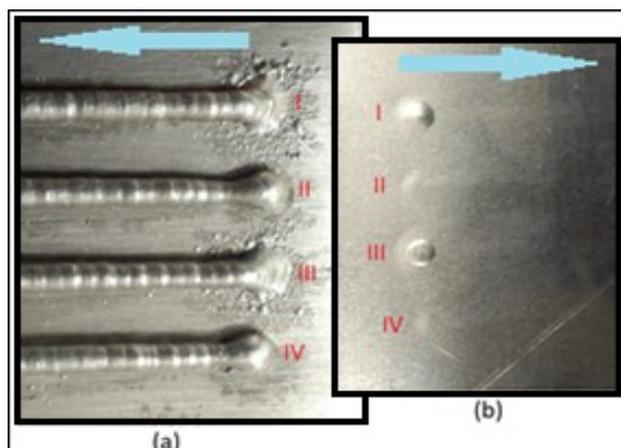


Figura 5.12– Aspecto Superficial (a) e Penetração nos Inícios de Cordão (b).

À esquerda da figura, na porção referenciada como (a), são exibidos os aspectos superficiais através de uma imagem obtida de cima da chapa utilizada para o experimento. Já à direita da figura, na porção referenciada como (b), são exibidos os aspectos de penetração resultante de cada uma das combinações. As setas azuis indicam a direção da deposição e as combinações seguem a ordem dos gráficos exibidos anteriormente, sendo **I – Com Tempo de Ignição e Com HotStart**, **II – Com Tempo de Ignição e Sem HotStart**, **III – Sem Tempo de Ignição e Com Hotstart** e **IV – Sem Tempo de Ignição e Sem HotStart**.

É possível observar que as combinações “Com HotStart” (I e III) apresentaram uma diluição consideravelmente maior do que as combinações “Sem HotStart” (II e IV). Já a presença ou não do “Tempo de Ignição” não demonstrou gerar alguma diferença em relação a penetração no início do cordão. Somado a isto, em relação ao aspecto superficial dos cordões, as combinações que consistiam “Com HotStart” adquiriram uma maior homogeneidade em relação à altura ao não apresentar sem o acúmulo de material que adota aspecto circunferencial devido a tensões superficiais. Desta maneira, devido à maior penetração e homogeneidade, a combinação “I - Com Tempo de Ignição e Com HotStart” foi escolhida para ser utilizada na manufatura das paredes utilizadas como corpos de provas neste trabalho.

Como exposto nos parágrafos acima, a combinação das duas rotinas de início de cordão disponíveis ao operador (Tempo de Ignição e HotStart) não influenciaram na duração dos transitórios da resposta da Velocidade de Arame. Porém, como segunda abordagem para diminuir a duração dos transitórios no início dos cordões, foi utilizada uma outra função disponibilizada pela fabricante Fronius em sua fonte de soldagem CMT Advanced. Esta função, também direcionada a resolução do problema de “solda fria” recorrente no início dos cordões na soldagem de alumínio, consiste em aplicar um diferente **Nível de Corrente de Início**, mensurado em porcentagem (%) do valor da corrente de soldagem que será aplicada durante o regime permanente, por um determinado período também configurado pelo operador, e que nada tem a ver com as duas funções de início de processo citados nos parágrafos anteriores (Tempo de Ignição e HotStart). Também é possível configurar o **Tempo do Nível de Corrente de Início** e o tempo no qual a corrente utilizará para transitar do Nível de Corrente Início para o nível de regime permanente, o qual indiretamente configura a **Rampa de Corrente** que consiste em um parâmetro relacionado ao valor da sua derivada.

Foram realizados experimentos sobre chapa fina ajustando o Nível de Corrente Início, o Tempo do Nível de Corrente de Início e o tempo da Rampa de Descida a fim de diminuir a duração dos transitórios na resposta da Velocidade de Arame. Ou seja, desejava-se que o valor da Velocidade de Arame Medida atingisse o quanto antes o valor da Velocidade de Arame Setada de preferência sem sobressinal. Os gráficos das Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 exibem as respostas da Velocidade de Arame para as quatro velocidades de arame utilizadas na manufatura das paredes inclinadas utilizadas como corpos de prova neste trabalho – 2,2, 2,5, 2,8 e 3,1 m/min, respectivamente. Exibiu-se apenas a média móvel de cada uma das medições para que as dinâmicas fossem mais facilmente interpretáveis.

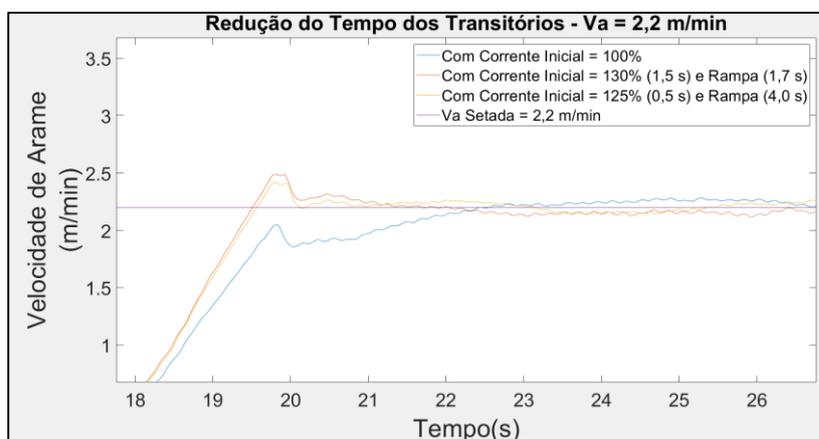


Figura 5.13 – Dinâmica da Velocidade de Arame. Va Setada = 2,2 m/min.

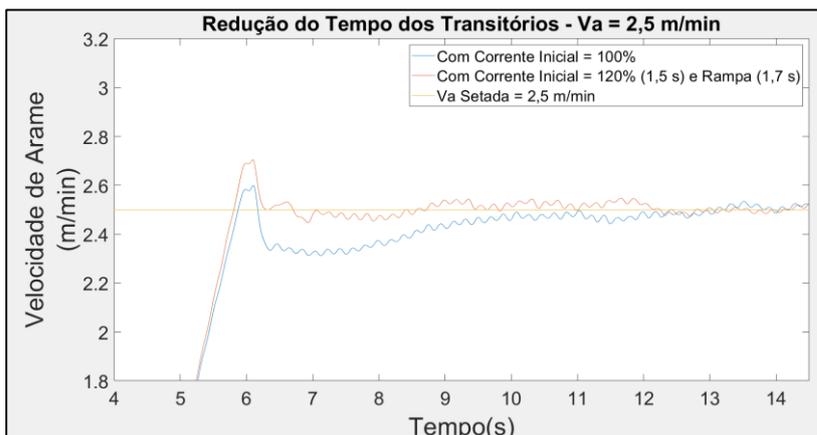


Figura 5.14 – Dinâmica da Velocidade de Arame. Va Setada = 2,5 m/min.

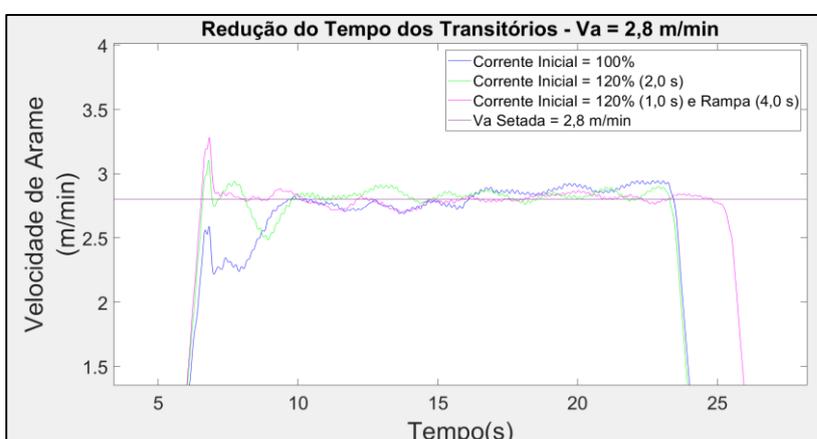


Figura 5.15 – Dinâmica da Velocidade de Arame. Va Setada = 2,8 m/min.

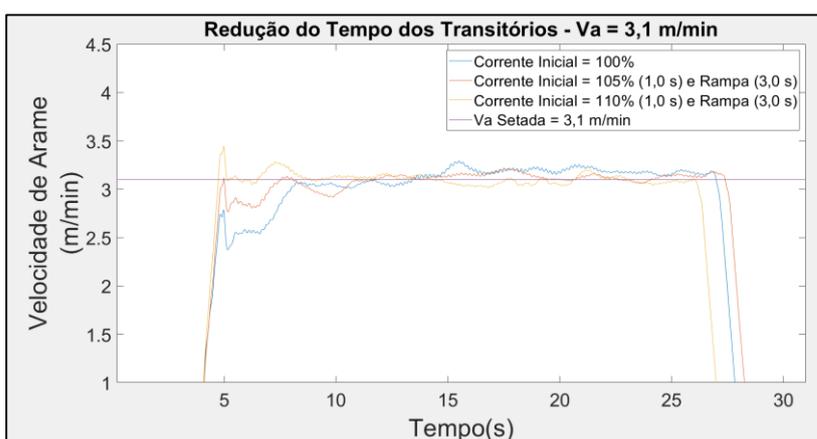


Figura 5.16 – Dinâmica da Velocidade de Arame. Va Setada = 3,1 m/min.

Como é possível observar nos gráficos acima, a duração dos transitórios foram todos consideravelmente reduzidos através de ajustes apropriados do **Nível de Corrente de Início** (Corrente Inicial, nos gráficos), da duração do **Tempo de Corrente de Início** e da **Rampa de Corrente**. Para cada um dos pontos operação foi encontrado uma ou mais combinações que resultaram em dinâmicas distintas, como a presença ou não de sobressinal. Desta maneira, com

o Valor de Regime Permanente (valor de regime) da Velocidade de Arame Medida correspondendo a Velocidade de Arame Setada na fonte de soldagem Fronius, descritos na seção anterior, e com as diversas possibilidades de redução da duração dos transitórios, descritos nesta seção, expectou-se que todos os ajustes necessários para a manufatura das paredes estavam realizados. Porém, ao realizar a manufatura de novas paredes utilizando os parâmetros levantados, observou-se que, tanto os valores da Velocidade de Arame em regime permanente quanto a duração dos transitórios não se comportaram como o esperado - ambos apresentaram valores maiores do que os ajustados através dos experimentos sobre chapas finas.

O comportamento citado foi atribuído às características intrínsecas de cada uma das condições, dentre as quais as condições das deposições sobre chapas resultou em uma menor taxa de fusão do que as condições das deposições realizadas sobre camadas. Maiores detalhes e os valores da forma de onda ajustados para as condições de deposição sobre camadas serão expostos na próxima seção.

5.3 Parâmetros da Onda CMT Advanced Setados e Medidos

Como citado no fim da seção anterior, os ajustes nos parâmetros da forma de onda do processo CMT Advanced foram realizados com o auxílio de experimentos baseados em deposições sobre chapas finas. Mas, ao repetir os mesmos parâmetros em experimentos baseados em deposições sobre camadas, os valores de regime permanente da Velocidade de Arame e duração dos transitórios obtidos não foram os esperados.

Desta maneira, toda uma nova série de reajustes dos parâmetros da forma de onda do processo CMT Advanced necessitou ser realizada, sendo que desta vez estes parâmetros foram ajustados com o auxílio de experimentos baseados em deposições sobre camadas. Mais do que isto, durante a manufatura de paredes que consideravam Velocidade de Soldagem mais alta (0,65 m/min), observou-se que a taxa de fusão de arame recorrente das condições de deposição tendeu a diminuir ao ponto de que novos ajustes nos parâmetros da forma de onda necessitaram ser realizados. Da maneira análoga, para deposições sobre camadas realizadas com Velocidade de Soldagem mais baixa (0,35 m/min), observou-se um aumento na taxa de fusão ao ponto de que, também, novos ajustes necessitaram ser realizados. Isto significa que, como a utilização de cada uma das Velocidades de Soldagem resulta em condições de deposição de material consideravelmente diferentes, necessitou-se ajustar um conjunto de parâmetros da forma de onda do processo de soldagem CMT Advanced para cada uma das três Velocidades de Soldagem (0,35, 0,50 e 0,65 m/min) adotadas para a realização dos experimentos deste trabalho.

Em relação a diferença nas condições de deposição ao se manufaturar uma parede sem inclinação (deposições sobrepostas sem Offset-x) e ao se manufaturar uma parede inclinada (cada deposição deslocada um valor constante em relação à deposição anterior), foi observado uma leve tendência à diminuição da taxa de fusão de arame conforme maior o ângulo objetivado. Porém as variações observadas na taxa de fusão de arame, nestes casos, não foram grandes o suficiente ao ponto de exigir novos ajustes nos parâmetros da forma de onda. Esta tendência à diminuição na taxa de fusão de arame observada na manufatura de paredes inclinadas pode ser recorrente da menor poça de fusão formada nestes casos devido à ancoragem pendular da poça. Entretanto novos estudos devem ser realizados a respeito deste comportamento em específico.

Os parâmetros da forma de onda do processo CMT Advanced tão citados nesta altura do documento são compreendidos basicamente por três: **I-sc**, que corresponde ao valor da Corrente de Soldagem imposta pela fonte durante as fases nas quais o arame está em contato com a peça/substrato e o movimento do arame tende de ser de retração; **I-boost**, que corresponde ao valor de Corrente de Soldagem imposta pela fonte logo após os momentos de destacamento da gota e reabertura do arco; e **I-burn**, que corresponde a fase que antecede o curto circuito e o movimento do arame tende a ser de avanço até o inevitável contato do arame-eletrodo com a peça/substrato (curto circuito).

Outro fator a ser considerado é a diferença entre os valores dos Parâmetros da Forma de Onda do CMT Advanced configurados pelo operador através da interface homem-máquina do equipamento e os valores das medições realizadas pelo Sistema de Aquisição Portátil II (SAP II). A diferença entre valores setados e valores medidos chegou a 5 Amperes em algumas situações, sendo que tanto as intensidades de corrente fornecidas pela fonte de soldagem quanto a calibração do sistema de medição (SAP II) utilizado podem ser a fonte de discrepância. Desta maneira, arbitrou-se que tanto os valores setados quanto os valores observados nas aquisições serão considerados e exibidos nas tabelas seguintes.

Tabela 5.1– Parâmetros da Onda Setados e Medidos para $V_s = 0,35$ m/min e Deposições Sobre Camadas.

Parâmetro (CMT Adv)	Valor Setado (A)	Valor Medido SAP II – (A)	I_{rms} (A)	Va_Medida (m/min)
I-sc (elet+ / elet-)	37,0/-58,8	39,1/-61,8	49,2	2,2
I-boost (elet+ / elet-)	50,0/-33,0	54,3/-33,6		
I-burn (elet+ / elet-)	50,0/-33,0	54,3/-33,6		
I-sc (elet+ / elet-)	36,7/-58,6	39,1/-59,8	51,6	2,5
I-boost (elet+ / elet-)	53,5/-39,3	61,6/-39,6		
I-burn (elet+ / elet-)	53,5/-38	62,1/-38,4		
I-sc (elet+ / elet-)	36,4/-58,4	39,1/-59,8	53,8	2,8
I-boost (elet+ / elet-)	59,0/-45,6	59,9/-48,0		
I-burn (elet+ / elet-)	59,0/-43,0	60,1/-45,7		
I-sc (elet+ / elet-)	36,0/-58,2	39,1/-59,8	56,1	3,1
I-boost (elet+ / elet-)	64,0/-52,0	69,4/-53,7		
I-burn (elet+ / elet-)	65,0/-48,0	69,4/-49,2		

Tabela 5.2– Parâmetros da Onda Setados e Medidos para $V_s = 0,50$ m/min e Deposições Sobre Camadas.

Parâmetro (CMT Adv)	Valor Setado (A)	Valor Medido SAP II – (A)	I_{rms} (A)	Va_Medida (m/min)
I-sc (elet+ / elet-)	37,0/-58,8	39,1/-61,6	50,4	2,2
I-boost (elet+ / elet-)	52,5/-34,4	56,3/-34,6		
I-burn (elet+ / elet-)	52,5/-36,0	56,6/-36,6		
I-sc (elet+ / elet-)	36,7/-58,6	39,1/-59,4	53,6	2,5
I-boost (elet+ / elet-)	55,8/-41,3	63,3/-42,6		
I-burn (elet+ / elet-)	58,8/-39,5	63,3/-39,4		
I-sc (elet+ / elet-)	36,4/-58,4	39,1/-60,0	55,8	2,8
I-boost (elet+ / elet-)	60,1/-55,6	63,1/-58,6		
I-burn (elet+ / elet-)	60,4/-44,5	63,5/-46,7		
I-sc (elet+ / elet-)	36,0/-58,2	39,1/-60,8	59,1	3,1
I-boost (elet+ / elet-)	64,5/-52,0	68,2/-54,7		
I-burn (elet+ / elet-)	64,5/-48,0	68,0/-49,8		

Tabela 5.3– Parâmetros da Onda Setados e Medidos para $V_s = 0,65$ m/min e Deposições Sobre Camadas.

Parâmetro (CMT Adv)	Valor Setado (A)	Valor Medido SAP II – (A)	I _{rms} (A)	Va_Medida (m/min)
I-sc (elet+ / elet-)	37,0/-58,8	39,1/-61,8	52,1	2,2
I-boost (elet+ / elet-)	55,5/-35,5	59,3/-37,2		
I-burn (elet+ / elet-)	55,5/-39,0	59,3/-41,6		
I-sc (elet+ / elet-)	36,7/-58,6	39,1/-59,8	55,6	2,5
I-boost (elet+ / elet-)	58,8/-43,5	63,3/-45,6		
I-burn (elet+ / elet-)	58,8/-41	63,3/-41,4		
I-sc (elet+ / elet-)	36,4/-58,4	39,1/-59,8	57,6	2,8
I-boost (elet+ / elet-)	62,1/-63,0	65,1/-66,4		
I-burn (elet+ / elet-)	62,1/-46,0	65,1/-48,7		
I-sc (elet+ / elet-)	36,0/-58,2	39,1/-59,8	61,2	3,1
I-boost (elet+ / elet-)	65,5/-54,0	69,4/-55,7		
I-burn (elet+ / elet-)	65,5/-50,0	69,4/-51,8		

5.4 Primeira Camada e Tensões Residuais

Desde os primeiros experimentos realizados no LABSOLDA envolvendo manufatura aditiva via soldagem com alumínio como material de adição, foi adotado um procedimento no qual a deposição da primeira camada é realizada utilizando parâmetros mais energéticos (maiores Velocidades de Arame e conseqüentemente maiores Correntes de Soldagem) como forma de criar condições mais adequadas para a deposição das camadas utilizando os parâmetros nos valores de interesse. Dentre os aspectos que melhoram as condições de deposição através deste procedimento pode ser citada a maior temperatura do substrato atingida devido à alta quantidade de calor aportada pelo processo. Outro aspecto possível de ser citado é a de que a geometria sobre qual a primeira deposição com os parâmetros de interesse já é realizada sobre camada e não sobre chapa.

O procedimento citado é especialmente importante quando os parâmetros de interesse consistem de valores que aportam pouco calor, ou seja, aqueles que depositam a menor quantidade de arame por tempo e/ou possuem maiores Velocidade de Soldagem, pois as camadas depositadas com a utilização destes apresentam maiores probabilidades de apresentarem falhas de descontinuidade devido à baixa temperatura inicial do substrato. Porém, mesmo que uma

primeira camada seja depositada com parâmetros mais energéticos, se os parâmetros das camadas subsequentes (que utilizam os parâmetros de interesse) não aportarem calor suficiente para a obtenção de uma boa adesão à primeira, poderá ocorrer o “descolamento” da parede sob manufatura, mesmo que estejam obtendo geometria homogênea, como é possível observar na Figura 5.17.



Figura 5.17 – “Descolamento” como consequência das tensões residuais.

A ocorrência dos eventos de “descolamento” das camadas depositadas ao se utilizar os parâmetros de interesse é devido a **tensões residuais** que surgem como consequência do aporte térmico necessário para a deposição de material via soldagem. Estes efeitos são estudados na soldagem convencional há muito tempo por diversos autores, mas com o *adventum* da Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco estes efeitos tem sido especificamente estudados, como em [43], [44]. A Figura 5.18 exhibe detalhes das tensões residuais na manufatura aditiva de uma parede via soldagem a arco.

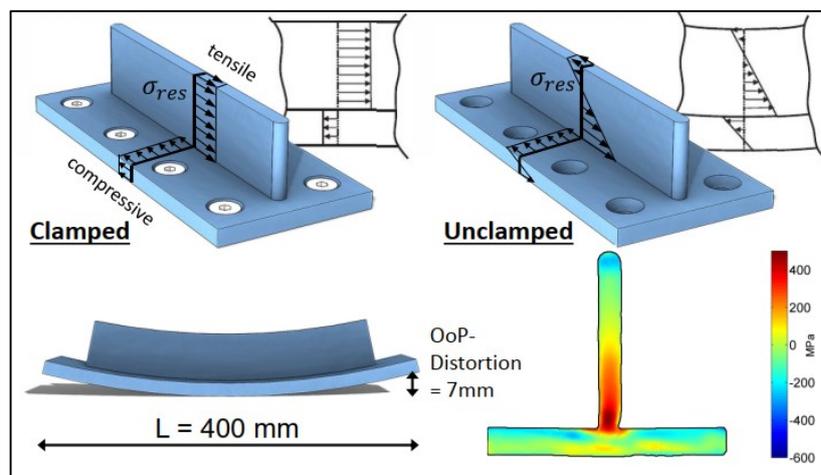


Figura 5.18 – Tensões Residuais e Distorções em MA de Paredes Simples [43].

Após algumas tentativas e muitos erros, foi definido que uma camada com parâmetros intermediários (em relação ao aporte térmico) deveria ser depositada entre a primeira camada e as camadas de interesse para que a probabilidade de “descolamento” da parede ao substrato

fosse reduzida. Desta maneira, definiu-se o procedimento no qual as duas primeiras camadas de cada uma das paredes são depositadas com parâmetros pré-fixados de acordo com a Tabela 5.4. Assim, não foram mais observados eventos de descolamentos da parede em relação ao substrato.

Tabela 5.4 – Camada e Parâmetros

CAMADA	PROCESSO	Va (m/min)	Vs (m/min)
1 ^a	CMT Pulse	5,0	0,5
2 ^a	CMT Advanced	3,4	0,5
Todas as Demais	CMT Advanced	*	*

* Parâmetros específicos de cada uma das paredes de interesse.

5.5 Paredes Manufaturadas

Após os ajustes nos parâmetros da forma de onda do processo CMT para que as deposições sobre camada fossem realizadas de acordo com a taxa (m/min) ajustada na tela do equipamento de soldagem pelo operador (Seções 5.1 e 5.3), e também dos ajustes da potência inicial do processo para redução da duração dos transitórios (Seção 5.2) e da definição de um procedimento para a deposição das primeiras camadas das parede (Seção 5.4), as 49 paredes que foram utilizadas como corpos de prova para a realização deste trabalho foram manufaturadas. O algoritmo em linguagem INFORM III (Motoman/Yaskawa), descrito na Seção 4.2, foi projetado não só para realizar as deposições sobre camadas, mas também para obter a medição individual da altura de cada uma das camadas depositadas. A Figura 5.19 exhibe uma visão geral de grande parte das paredes manufaturadas utilizadas como corpo de prova neste trabalho.



Figura 5.19 – Paredes Manufaturadas Utilizadas como Corpos de Prova.

Como foi descrito na Seção 5.2, foi realizado esforço para encontrar patamares de Potência Inicial apropriadas para a redução da duração dos transitórios na resposta da Velocidade de Arame no sentido de induzir a taxa de deposição atingir o valor de regime permanente, que no caso corresponde ao valor ajustado pelo operador na tela do equipamento, o quanto antes. Apesar dos ajustes da potência inicial realizados sobre chapa funcionarem muito bem para reduzir o tempo dos transitórios na resposta da Velocidade de Arame, ao utilizá-los em deposições sobre camadas o objetivo de efeito de obter paredes com altura mais homogênea não foi atingido. Como é possível observar na Figura 5.20, a porção inicial de cada uma das paredes inclinadas resultarem tanto em alturas quanto em ângulos diferentes quando comparado à porção restante de sua respectiva parede. A seta azul indica a direção e o sentido das deposições.



Figura 5.20 – Deformação no Início das Paredes.

O maior ângulo observado no início de cada uma das paredes se deve ao fato do ângulo resultante ser consideravelmente dependente da potência aplicada ao processo, ou seja, ao fundir uma mesma quantidade de material, quanto mais calor for aportado ao processo maior a inclinação da parede resultante. Este fenômeno é entendido ao considerarmos o grau de viscosidade da poça como determinante para a formação do ângulo da parede manufaturada devido a diferentes condições de ancoramento [8]. Desta maneira, como as medições da altura das camadas são realizadas no ponto médio do comprimento das paredes, região sobre a qual a Velocidade de Arame se encontra em regime permanente, não se desprende maiores esforços nem tempo para obter inícios de paredes com o mesmo grau de inclinação e altura de camada que as do restante da parede.

Assim, após a manufatura de todas as paredes, os valores das leituras obtidos pelo algoritmo implementado (Seção 4.2) foram transferidos para o computador e analisados para a definição dos resultados das medições das alturas de camada de cada um dos conjuntos de parâmetros. A média das medições de ao menos 10 camadas foi considerada em cada caso.

Tabela 5.5 – Alturas de Camada e Ângulo (Parte I de II)

(#)	Vs (m/min)	Va (m/min)	Offset_x (mm)	Altura Média (mm/camada)	STD DEV (mm/camada)	n	Ângulo (°)
1	0.35	2.2	0	2.519	0.091	12	90.043
2	0.35	2.2	0.4	2.445	0.120	12	80.750
3	0.35	2.2	0.8	2.366	0.096	12	71.355
4	0.35	2.2	1.2	2.181	0.067	13	61.211
5	0.35	2.5	0	2.601	0.099	11	90.043
6	0.35	2.5	0.5	2.525	0.082	13	78.839
7	0.35	2.5	1.0	2.378	0.091	16	67.226
8	0.35	2.5	1.2	2.240	0.115	16	61.853
9	0.35	2.8	0	2.697	0.077	11	90.044
10	0.35	2.8	0.5	2.671	0.067	11	79.437
11	0.35	2.8	1.0	2.501	0.078	13	68.241
12	0.35	2.8	1.5	2.317	0.176	10	57.110
13	0.35	3.1	0	2.816	0.038	10	90.044
14	0.35	3.1	0.5	2.726	0.072	13	79.647
15	0.35	3.1	1.0	2.589	0.095	11	68.916
16	0.35	3.1	1.5	2.340	0.105	15	57.368
17	0.5	2.2	0	1.972	0.127	20	90.043
18	0.5	2.2	0.4	2.042	0.071	9	78.957
19	0.5	2.2	0.8	1.781	0.105	11	65.844
20	0.5	2.2	1.2	1.490	0.113	16	51.179
21	0.5	2.5	0	2.076	0.090	10	90.043
22	0.5	2.5	0.5	1.967	0.060	11	75.776
23	0.5	2.5	1.0	1.756	0.151	16	60.370
24	0.5	2.5	1.5	1.350	0.098	9	42.009

Tabela 5.6– Alturas de Camada e Ângulo (Parte II de II)

(#)	Vs (m/min)	Va (m/min)	Offset_x (mm)	Altura Média (mm/camada)	STD DEV (mm/camada)	n	Ângulo (°)
25	0.5	2.8	0	2.165	0.096	11	90.043
26	0.5	2.8	0.5	2.072	0.136	15	76.472
27	0.5	2.8	1.0	1.848	0.156	16	61.612
28	0.5	2.8	1.5	1.406	0.142	9	43.169
29	0.5	3.1	0	2.206	0.067	9	90.043
30	0.5	3.1	0.5	2.109	0.111	14	76.701
31	0.5	3.1	1.0	1.974	0.081	24	63.166
32	0.5	3.1	1.5	1.582	0.127	20	46.548
33	0.65	2.2	0	1.728	0.093	14	90.042
34	0.65	2.2	0.4	1.657	0.067	13	76.467
35	0.65	2.2	0.8	1.607	0.071	10	63.567
36	0.65	2.2	1.2	1.276	0.231	10	46.782
37	0.65	2.5	0	1.850	0.100	16	90.043
38	0.65	2.5	0.5	1.750	0.094	16	74.092
39	0.65	2.5	1	1.540	0.150	14	57.031
40	0.65	2.5	1.25	1.315	0.157	11	46.475
41	0.65	2.8	0	1.888	0.068	16	90.043
42	0.65	2.8	0.5	1.762	0.119	14	74.195
43	0.65	2.8	1.0	1.485	0.079	13	56.072
44	0.65	2.8	1.25	1.341	0.072	10	47.035
45	0.65	3.1	0	1.830	0.114	13	90.043
46	0.65	3.1	0.5	1.815	0.113	17	74.636
47	0.65	3.1	1.0	1.780	0.117	12	60.704
48	0.65	3.1	1.25	1.384	0.110	15	47.937
49	0.65	3.1	1.5	1.095	0.087	12	36.148

A princípio, a grande quantidade de dados remete a uma sensação de dificuldade em sua interpretação, porém uma rápida análise inicial permite a extração de algumas informações importantes. Primeiro, a média dos Desvios Padrões das leituras remete a 0,102 mm, o que condiz com o valor da incertezas de posicionamento do manipulador fornecida pelo fabricante de 0,1 mm [41]. Segundo, é possível observar uma forte correlação exponencial entre o Offset_x e a Altura de Camada no sentido de que a segunda diminui exponencialmente com o aumento da primeira. Outra correlação possível de ser observada ao analisar os dados das tabelas acima é a que relaciona a já esperada diminuição da Altura de Camada com a diminuição da Velocidade de Arame.

Os resultados das medições das Alturas de Camadas correspondem a um sistema que pode ser interpretado por 3 entradas (Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame e Ângulo

ou Offset_x) e 1 saída (Altura de Camada). $\hat{\text{Ângulo}}$ e Offset_x podem e devem ser consideradas como uma mesma variável, pois estão fortemente atreladas uma a outra no sentido de não haver como alterar o valor de uma sem alterar o valor da outra de forma direta. Desta maneira, visando um dos objetivos deste trabalho que consiste em manufaturar aditivamente sólidos formados por regiões inclinadas baseando-se em seus respectivos modelos CAD, adota-se que a variável $\hat{\text{Ângulo}}$ corresponde a uma das três entradas do sistema, como representado na Figura 5.21.

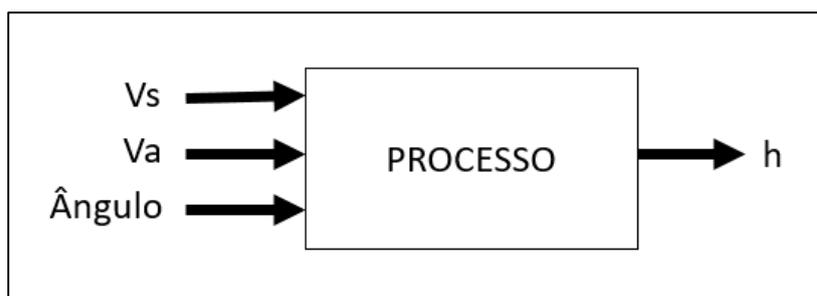


Figura 5.21– Representação do Sistema em Malha Aberta – 3 Entradas e 1 Saída.

No caso, a Velocidade de Soldagem (V_s), dada em m/min, é a velocidade com que o robô manipulador realiza os deslocamentos entre os pontos programados. A Velocidade de Arame (V_a), também dada em m/min, representa a taxa de deposição de arame e é fortemente dependente da Potência Eficaz fornecida pelo processo de soldagem. Já o $\hat{\text{Ângulo}}$, representado em graus ($^\circ$), é dependente da geometria do modelo CAD da peça que se pretende manufaturar.

Para exibir ao mesmo tempo todos os dados levantados através dos experimentos realizados e já exibidos nas Tabelas I e II se torna necessária a utilização de alguma forma de representar dados em 4 dimensões. Porém, também se apresentam relevantes algumas análises que podem ser realizadas com a utilização de gráficos mais convencionais ao fixarmos alguma das variáveis de entrada, como no caso da Figura 5.22, na qual é possível analisar a variação do valor das Alturas de Camada em relação a variação da Velocidade de Arame e da Velocidade de Soldagem em paredes com $\hat{\text{Ângulo}}$ de 90° .

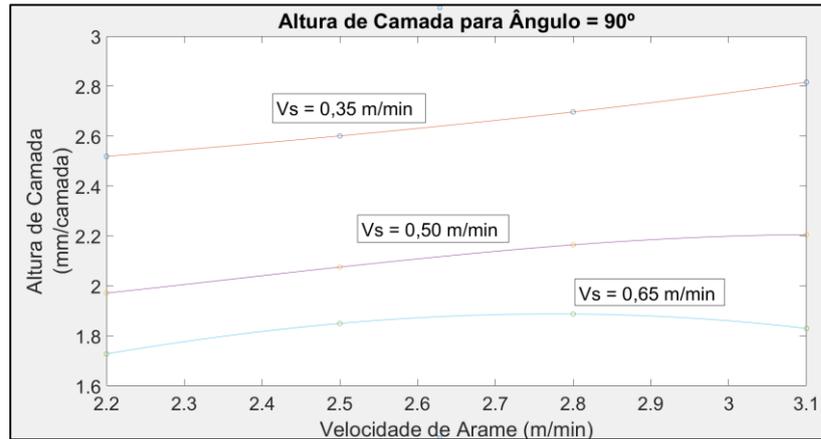


Figura 5.22– Relação entre Velocidade de Arame e Altura de Camada – $V_s = 0,35, 0,50$ e $0,65$ m/min, Ângulo = 90° .

Os círculos plotados no gráfico acima representam os valores dos resultados das medições obtidos através da realização dos experimentos descritos e as curvas traçadas foram ajustadas em relação a polinômios de ordem 3 (equações cúbicas) com o auxílio da ferramenta de “Curve Fitting” do Software MATLAB. O claro comportamento não-linear é característico dos processos de soldagem e devem sempre ser interpretados considerando os fenômenos de transferência de calor e de massa. Por exemplo, para Velocidades de Soldagem próximas a $0,65$ m/min, a tendência de o valor da Altura de Camada ser positiva para baixas Velocidades de Arame e negativa para Velocidades de Arame maiores só pode ser compreendida se o fato de uma maior potência de soldagem ser exigida para transferir uma maior quantidade de material for considerado. Isto significa que apesar de mais material estar sendo depositado a altura de camada resultante está sendo menor devido aos efeitos do maior nível de calor gerado e aportado ao processo para que mais material seja transferido. Este efeito se torna mais evidente em maiores velocidades de soldagem e comportamento análogo pode ser encontrado em estudos que comparam Velocidade de Soldagem, Potência de Soldagem e Penetração [45].

Outro aspecto que se demonstra importante para ser analisado é a relação entre o Ângulo da parede manufaturada e a Altura de Camada correspondente, ou seja, com a ajuda de um gráfico enxergar a margem de valores de Altura de Camada possíveis de serem obtidos de acordo com o Ângulo resultante da parede manufaturada. Esta relação é expressa nos gráficos das Figuras 5.23, 5.24 e 5.25.

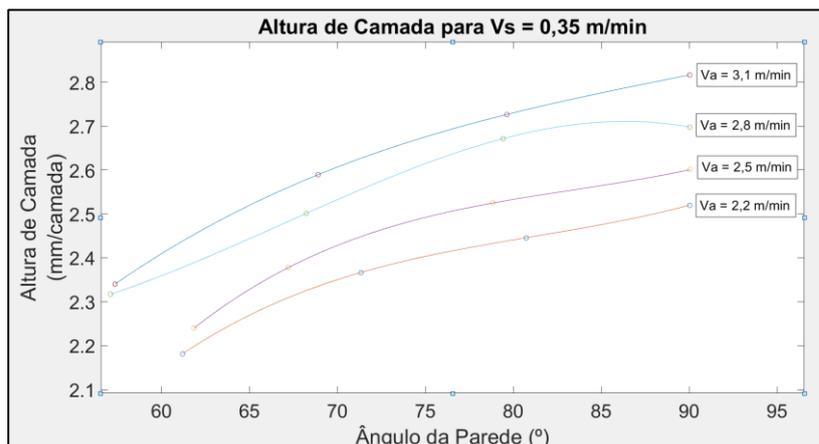


Figura 5.23– Relação entre Ângulo e Altura de Camada – $V_a = 3,1, 2,8, 2,5$ e $2,2$ m/min, $V_s = 0,35$ m/min.

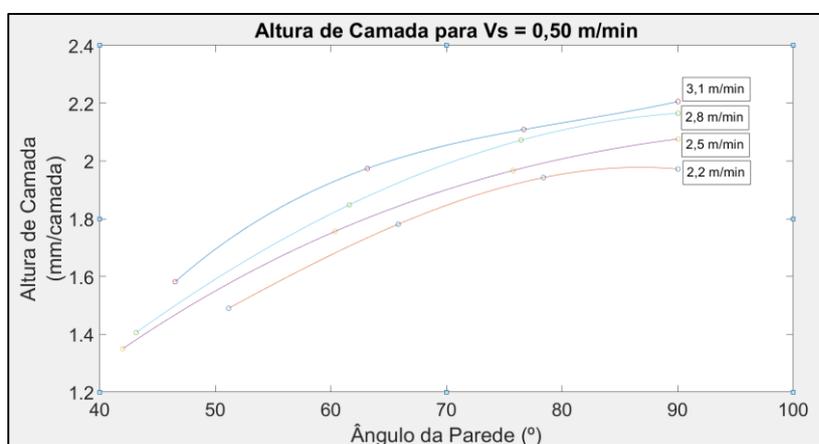


Figura 5.24– Relação entre Ângulo e Altura de Camada – $V_a = 3,1, 2,8, 2,5$ e $2,2$ m/min, $V_s = 0,50$ m/min.

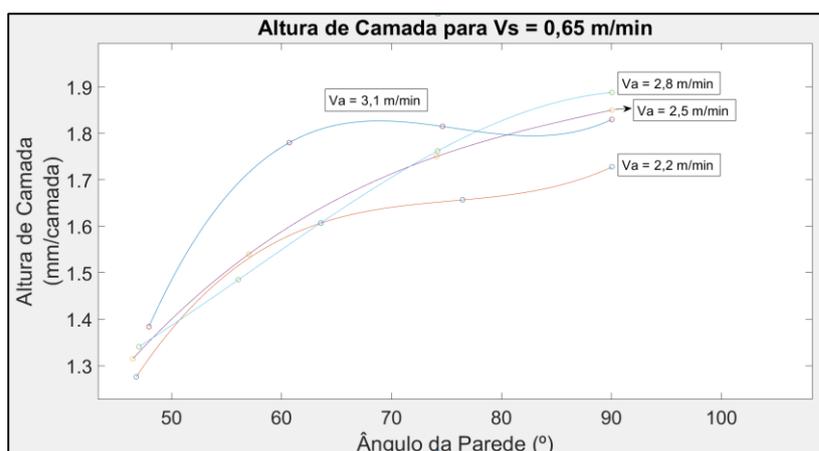


Figura 5.25– Relação entre Ângulo e Altura de Camada – $V_a = 3,1, 2,8, 2,5$ e $2,2$ m/min, $V_s = 0,65$ m/min.

Dos gráficos expostos, é possível observar que o valor da Altura de Camada se comportou conforme a maneira esperada ao aumentar de forma quase linear à medida que a parede manufaturada se torna menos inclinada. É possível observar, também, que quanto menor a Velocidade de Soldagem mais influente a Velocidade de Arame se torna sobre o valor da Altura

de Camada; ou, em outras palavras, quanto maior a Velocidade de Soldagem, menor a capacidade de variação do valor da Altura de Camada através de variações na Velocidade de Arame. Como já dito, o processo de manufatura como vem sendo abordado neste trabalho pode ser entendido como um sistema em malha aberta de 3 entradas (V_s , V_a e $\hat{\text{Ângulo}}$) e 1 saída (Altura de Camada). Para traçar os gráficos até aqui expostos nesta seção, fixaram-se uma ou mais variáveis a fim facilitar a visualização de informações relevantes, como a variação da Altura de Camada em relação a Velocidade de Arame ou em relação ao $\hat{\text{Ângulo}}$ da parede manufaturada. Para que as informações obtidas através dos experimentos fossem todas visualizadas ao mesmo tempo o uso de um gráfico que utilize 4 dimensões se torna necessária. Desta maneira, utilizou-se o software MATLAB para representar todos os dados obtidos dos experimentos em um único gráfico, como é possível observar na Figura 5.26.

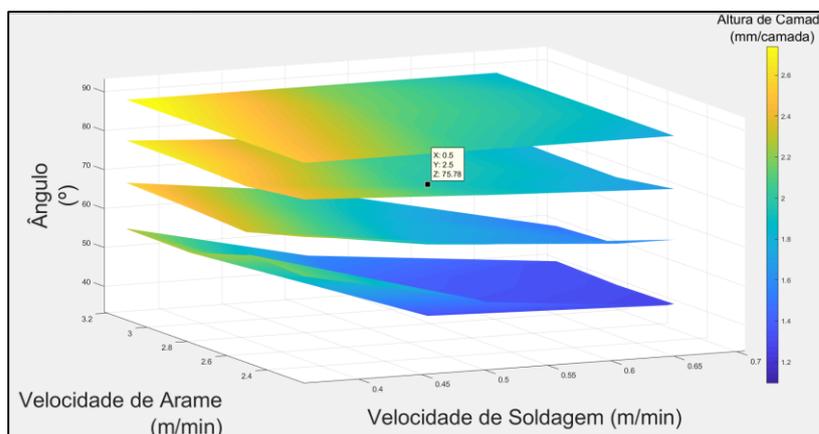


Figura 5.26 – Gráfico em 4 Dimensões que Relaciona 3 Entradas e 1 Saída - I.

As cores mais quentes e próximas do tom de amarelo representam os maiores valores de Alturas de Camada obtidos que podem chegar a 2,8 mm/camada. É possível observar que estas cores se concentram nas regiões as quais representam uma maior quantidade de material depositada por área além de inclinações de parede quase nulas, próximas de 90°. Por outro lado, as cores mais frias e próximas do azul representam os menores valores de Altura de Camada e são encontradas nas regiões de menores taxas de deposição de material e maiores velocidades de movimentação do manipulador, ou seja, nas regiões que correspondem a deposição de menores quantidade de material por área.

Uma outra maneira de representar as mesmas informações, mas que pode proporcionar uma visão diferente na interpretação dos dados, consiste em representar a Altura de Camada no eixo-Z e os $\hat{\text{Ângulos}}$ das paredes com as cores, como no gráfico exibido na Figura 5.27.

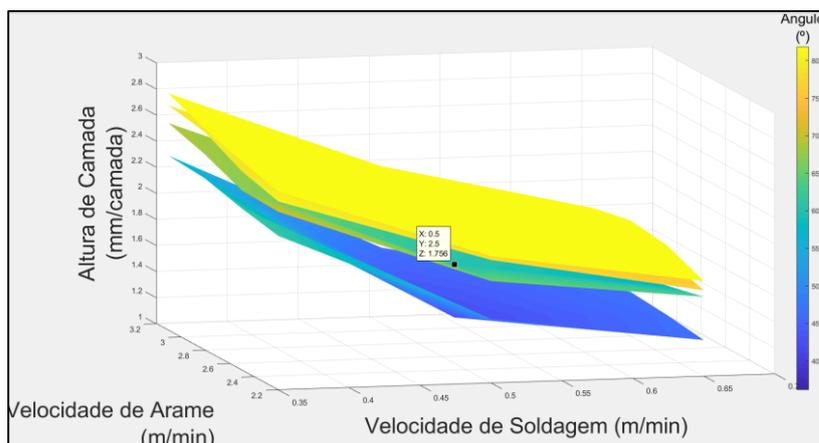


Figura 5.27 – Gráfico em 4 Dimensões que Relaciona 3 Entradas e 1 Saída - II.

Esta forma de representação pode transparecer um maior conforto ao interpretar os dados por ser usual a representação do resultado de uma função no eixo vertical. Neste gráfico é possível observar pela proximidade dos planos de cores mais quentes e a maior distância entre os planos de cores mais frias que a diminuição do valor da Altura de Camada não se dá de forma linear conforme o nível de inclinação da parede, mas, sim, de forma exponencial aproximando cada vez mais rapidamente de 0 (zero).

Todos os resultados dos experimentos e os gráficos demonstrados nesta seção informam sobre como o valor da Altura de Camada se comporta de acordo com os valores de três outros parâmetros: Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame e Ângulo da Parede. Apesar da representação gráfica e a interpretação dos dados levantados possuírem determinada importância própria, muito melhor seria, do ponto de vista dos Processos de Fabricação, se estas informações puderem ser utilizadas como forma de contribuir nos procedimentos. A próxima seção demonstrará como as informações levantadas através dos experimentos foram utilizadas para melhorar o processo de manufatura aditiva de peças constituídas por regiões inclinadas.

5.6 Seleção de Parâmetros

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento do processo de fabricação denominado Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco ao explorar os desafios da fabricação de paredes inclinadas pelo fato de muitas peças utilizadas na indústria serem formadas por regiões com esta característica. Na Manufatura Aditiva, é desejado que camadas inteiras sejam depositadas com a mesma altura, porém alguns aspectos levam a alterações no valor da

Altura da Camada depositada, entre elas a existência de regiões com diferentes inclinações e, deste modo, ações devem ser tomadas para evitar variações na altura da camada depositada. Como visto na Seção 5.5, o processo em questão pode ser representado por um sistema de 3 entradas (V_s , V_a e $\hat{\text{Ângulo}}$) e 1 saída (Altura de Camada) – este é o comportamento natural, sem controle, do processo. Porém, ao utilizarmos este processo na Manufatura Aditiva de uma peça, é necessário que alguma forma de controle da geometria das deposições seja implementada para que a peça manufatura condiga com seu modelo 3D (modelo CAD).

Indo direto ao ponto, o que deve ser controlado é a saída do sistema em questão (valor da Altura de Camada) atuando em duas das entradas (Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame) sendo que a terceira entrada ($\hat{\text{Ângulo}}$) inevitavelmente se torna uma “Referência Aleatória”. Em outras palavras, a saída do processo (valor da Altura de Camada) deve ser mantida no valor utilizado pelo operador no fatiamento do modelo 3D para a geração das trajetórias necessárias para a manufatura do sólido, como por exemplo, 2,2 mm/camada. O valor da entrada $\hat{\text{Ângulo}}$ se torna uma Referência Aleatória pelo fato do $\hat{\text{Ângulo}}$ da parte a ser manufaturada é ditada pelo modelo CAD do sólido não podendo o operador influir sobre este valor. Desta maneira, sobram as variáveis Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame para serem manipuladas a fim de manter a Altura de Camada no valor especificado pelo operador ao mesmo tempo que a entrada $\hat{\text{Ângulo}}$ varia conforme o modelo CAD. Graficamente, a solução do problema é representada na Figura 5.28 e se encontra na região de intersecção do plano horizontal de cor roxa localizado na altura de 2,2 mm/camada (valor aqui utilizado como exemplo) e as curvas coloridas que representam os valores de Alturas de Camadas possíveis de serem obtidas de acordo com o $\hat{\text{Ângulo}}$ de inclinação correspondente. Se o valor de Altura de Camada desejada for de 2,2 mm/camada, os valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame a serem escolhidos serão definidos pela intersecção do plano localizado a esta altura com a curva de cor correspondente ao definido pelo modelo CAD na região em que o depósito de material é realizado.

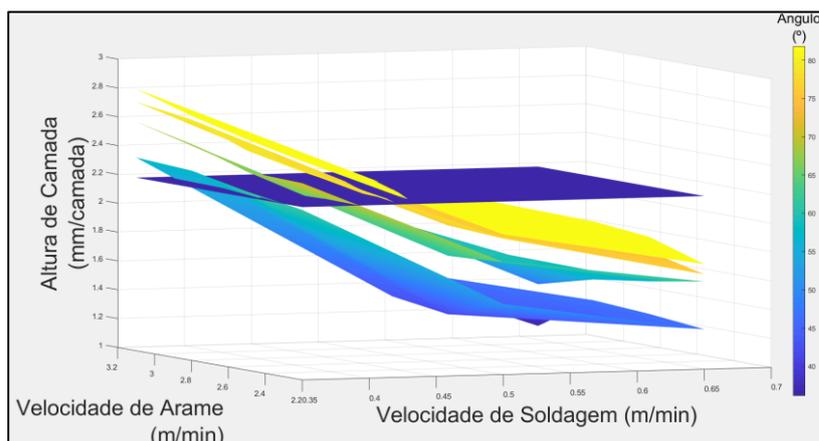


Figura 5.28 – Região de Trabalho para Altura de Camada = 2,2 mm/camada.

Encontrar os valores das variáveis de atuação (Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame) necessários para o controle da Altura de Camada pode se tornar uma tarefa árdua se for resolvida analiticamente devido ao número elevado de equações de 3ª ordem necessárias para descrever os dados como um todo. Desta maneira, utilizou-se dos conceitos de Inteligência Artificial para implementar uma Rede Neural capaz de encontrar os valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame necessários para manter a Altura de Camada no valor especificado, funcionando, assim, como um controlador em malha aberta do processo. Em outras palavras, a Rede Neural implementada recebe valores de referência para a Altura de Camada definida pelo operador, considera o Ângulo de parede a ser manufaturada definida pelo modelo CAD e define tanto em qual Velocidade de Soldagem o manipulador deve se deslocar quanto a Velocidade de Arame que a fonte de soldagem deve alimentar material. Um esquemático do controle implementado pode ser visualizado na Figura 5.29.

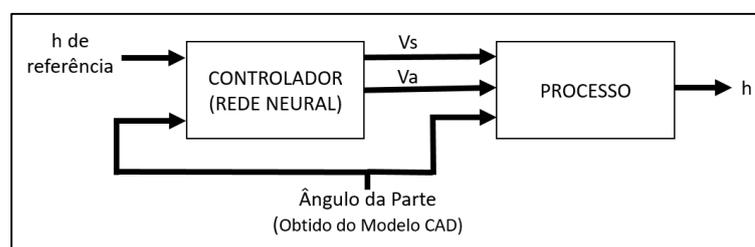


Figura 5.29 – Representação do Controle em Malha Aberta do Processo.

Sistemas de controle em malha-fechada visam medir o valor de uma variável controlada, que é a saída de um processo ou planta, e calcular o(s) valor(e)s que a(s) variável(eis) manipulada(s) deve(em) assumir para manter a variável controlada no valor desejado. Este tipo de controle é chamado de “Controle Realimentado”. Entretanto, no trabalho descrito neste documento, não havia um sistema de medição capaz de obter o valor da Altura de Camada (variável

controlada) em tempo real. Desta maneira, uma comparação entre o valor real e o valor desejado para a variável controlada (Altura de Camada) não se torna viável e a forma de controle possível de ser implementada é a de malha-aberta, ou seja, o controlador aplica os valores para as variáveis manipuladas (Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame) e não é realimentado com o valor atual e real da variável controlada (Altura de Camada). Já a variação do Ângulo da parede se comporta como uma perturbação no sistema que tende a fazer a variável controlada (Altura de Camada) se desviar do valor desejado, forçando o controlador atuar sobre os valores das variáveis manipuladas (Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame) a fim de manter a variável controlada no valor desejado (h de referência).

Desta maneira, uma Rede Neural Artificial foi criada com o auxílio do Software MATLAB e treinada com a utilização dos dados levantados através dos experimentos expostos neste trabalho. A rede neural em questão foi criada e treinada com a estrutura de 2 entradas e 2 saídas, sendo que as 2 entradas são compostas pelo valor da Altura de Camada desejada e pelo valor do Ângulo de inclinação da parede extraído do modelo CAD da peça a ser manufaturada. Já as saídas desta rede neural consistem nos valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame necessários para que as deposições resultem nos valores de Altura de Camada e Ângulo da parede esperados. Na Figura 5.30 é exibida a rede neural criada através do Software MATLAB.

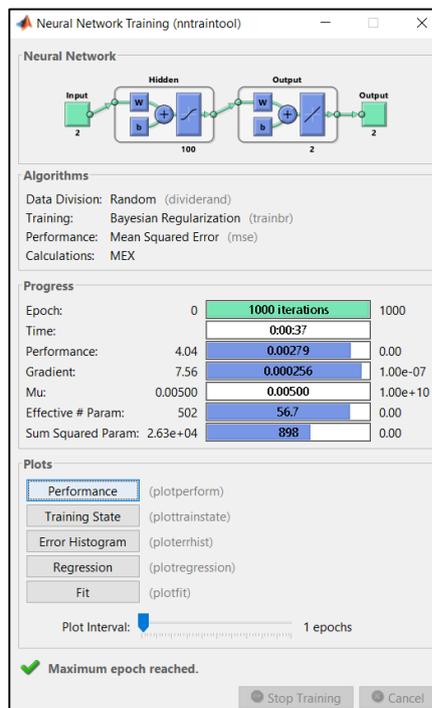


Figura 5.30 – Rede Neural Artificial Criada em MATLAB.

A Rede Neural treinada com os dados levantados através dos experimentos apresentados neste trabalho foi integrada com o Gerador de Trajetórias utilizado na manufatura aditiva de algumas peças no LABSOLDA e apresentado na Seção 3.1 deste documento. Como já descrito, o Gerador de Trajetória desenvolvido utiliza informações de um modelo CAD para “fatiá-lo” e obter a sequência de pontos representados em coordenadas cartesianas que compõe as trajetórias que representam a geometria da peça a ser manufaturada. Estes pontos são incorporados a um algoritmo estruturado no padrão exigido pela linguagem INFORM III para ser executado pelo manipulador Motoman HP20D. Além das informações sobre as coordenadas cartesianas de cada um dos pontos pertencentes a trajetória desejada, informações sobre a velocidade de movimentação entre os pontos e funções de comunicação com periféricos externos (como o disparo da fonte de soldagem, por exemplo) também podem estar presentes nos algoritmos.

Desta maneira, o arquivo fornecido pelo Gerador de Trajetórias deve conter o algoritmo completo já com todas as velocidades de movimentação (Velocidade de Soldagem), comandos de disparo e seleção de programas sinérgicos da fonte de soldagem (Velocidade de Arame). Assim como é possível obter informações sobre trajetórias que representam a geometria de um sólido através do seu respectivo modelo CAD, de maneira análoga também é possível obter informações sobre o Ângulo que as paredes de suas regiões formam com o plano horizontal (ou com a Normal). Com a posse destas duas informações (Espessura do Fatiamento e Ângulo de cada parte) foi possível aplicá-las à Rede Neural treinada para obter os valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame necessária a cada momento para se obter a geometria desejada. Cada região da peça é manufaturada com os valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame ditas como ideais para manter o valor da Altura de Camada definida pelo usuário e formar regiões com inclinações que correspondam ao modelo CAD. Na Figura 5.31 é possível observar uma interface do Gerador de Trajetórias e a utilização dos parâmetros fornecidos pela Rede Neural.

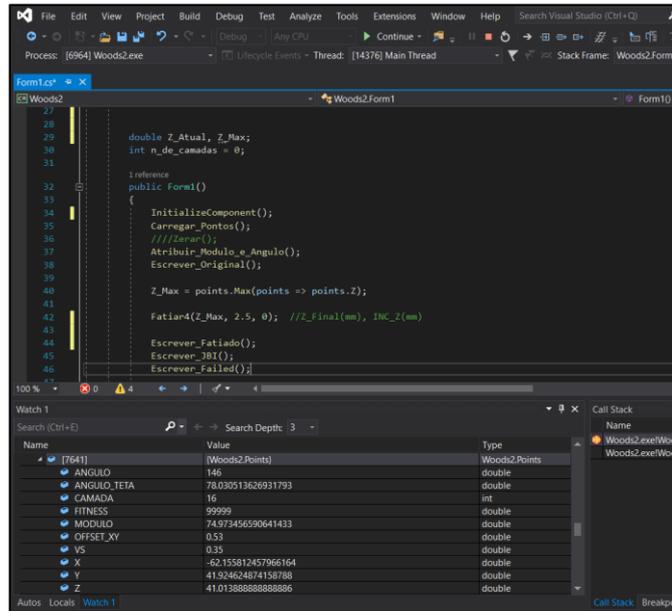


Figura 5.31 – Interface do Gerador de Trajetórias.

No corpo da interface é possível observar as funções executadas pelo Gerador de Trajetórias como, por exemplo, Carregar Pontos, Atribuir Módulo e Ângulo, Fatiar e Escrever_JBI (Algoritmo em INFORM III). Na parte inferior é possível observar detalhes de um ponto específico, como, de baixo para cima, os valores de suas coordenadas Z, Y e X, o OFFSET_XY que corresponde ao deslocamento no plano horizontal relativo ao seu ponto correspondente da camada inferior, seu Módulo (distância até o centro geométrico da peça no plano horizontal), Fitness (critério de qualidade do ponto adquirido), Camada (relativo a qual camada o ponto pertence), Ângulo Teta (ângulo relativo ao plano horizontal) e Ângulo (Ângulo relativo a coordenada polar do ponto em questão).

A integração da Rede Neural Artificial criada em MATLAB com o ambiente de desenvolvimento Visual Studio, ambiente no qual o Gerador de Trajetórias utilizado é desenvolvido, foi realizado com a ajuda de tutoriais disponibilizados em [46] pela própria empresa *Mathworks*, desenvolvedora do Software MATLAB.

5.7 Manufatura de Peças com Regiões Inclinadas

Com a intenção de validar a metodologia de parametrização do processo de manufatura aditiva apresentada neste trabalho, uma peça composta por regiões inclinadas foi projetada com o auxílio do software de desenvolvimento CAD Solidworks, a qual pode ser observada na Figura 5.32.



Figura 5.34 – Primeiro Sólido Manufaturado com Seleção Automatizada de Parâmetros.

A principal questão relativa a inviabilidade do processo foi creditada a um valor de Temperatura Interpasse crescente e demasiadamente alto quando comparado ao valor de Temperatura Interpasse no qual os parâmetros foram determinados ($\cong 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Desta maneira, considerou-se a adição de água no interior do sólido durante seu processo de manufatura, de forma manual, como estratégia de arrefecimento para que as chances de sucesso fossem ampliadas. Como não haveria renovação do fluído refrigerante (no caso, água), não foram criadas expectativas que o valor da Temperatura Interpasse se mantivesse no valor no qual os parâmetros foram determinados ($\cong 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Porém foi criada a expectativa de que este valor (Temperatura Interpasse) se mantivesse constante considerando a temperatura de ebulição da água ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) e sua incessante adição pelo operador devido tanto a diminuição do seu volume, consequência da mudança de fase para o estado gasoso, quanto ao gradativo aumento da altura da peça recorrente nos processos de deposição de camadas. Uma imagem do processo com a utilização de água para arrefecimento pode ser visualizada na Figura 5.35.



Figura 5.35 – Adição de Água no Interior do Sólido durante Processo.

Como era esperado que o valor da Altura de Camada resultasse menor dos que os observados nos corpos de prova devido ao maior valor de Temperatura Interpasse, foi realizada uma abordagem na qual fatiou-se o sólido com valor de Altura de Camada de 1,5 mm/camada e foi informado à Rede Neural que o valor de Altura de Camada desejada fosse de 2,0 mm/camada. Ou seja, os parâmetros fornecidos pela Rede Neural foram parâmetros que resultariam em valores de Altura de Camada de 2,0 mm/camada em condições nas quais os valores de Temperatura Interpasse fossem próximos à temperatura ambiente ($\cong 30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Porém, nas condições encontradas na manufatura do sólido projetado, o valor de Altura de Camada resultou muito próximo do valor da Espessura de Fatiamento informado pelo operador (1,5 mm/camada), o que viabilizou o processo do começo ao fim de maneira satisfatória com tempo de fabricação de aproximadamente 30 minutos, como é possível observar na Figura 5.36.

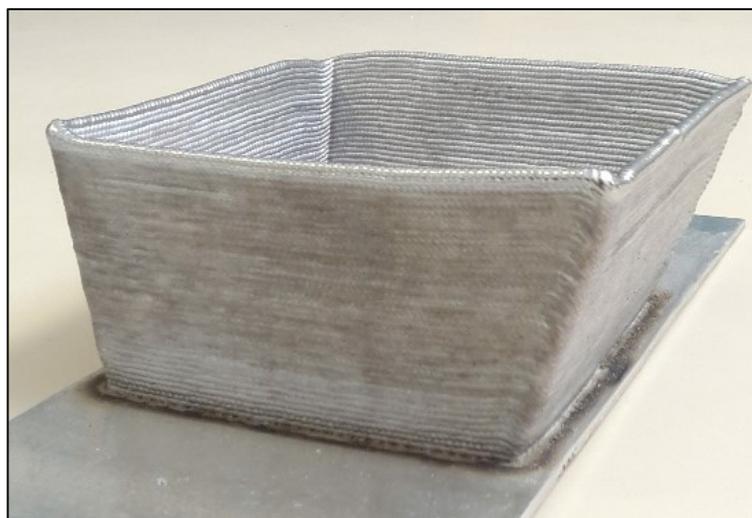


Figura 5.36 – Sólido Manufaturado com uso de Seleção Automatizada de Parâmetros.

Outros sólidos foram projetados em Solidworks e manufaturados aditivamente utilizando a mesma estratégia de arrefecimento (adição constante de água no interior do sólido de forma manual) e a mesma abordagem na Seleção Automatizada de Parâmetros. Os resultados podem ser observados nas Figuras 5.37 e 5.38.

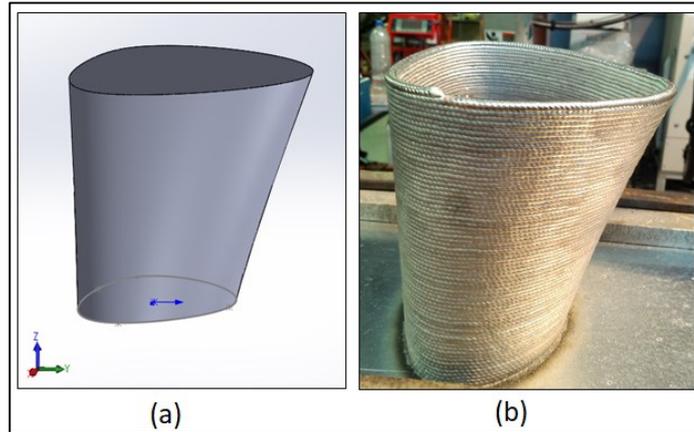


Figura 5.37 – Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco. (a) Projeto em CAD. (b) Sólido Resultante.

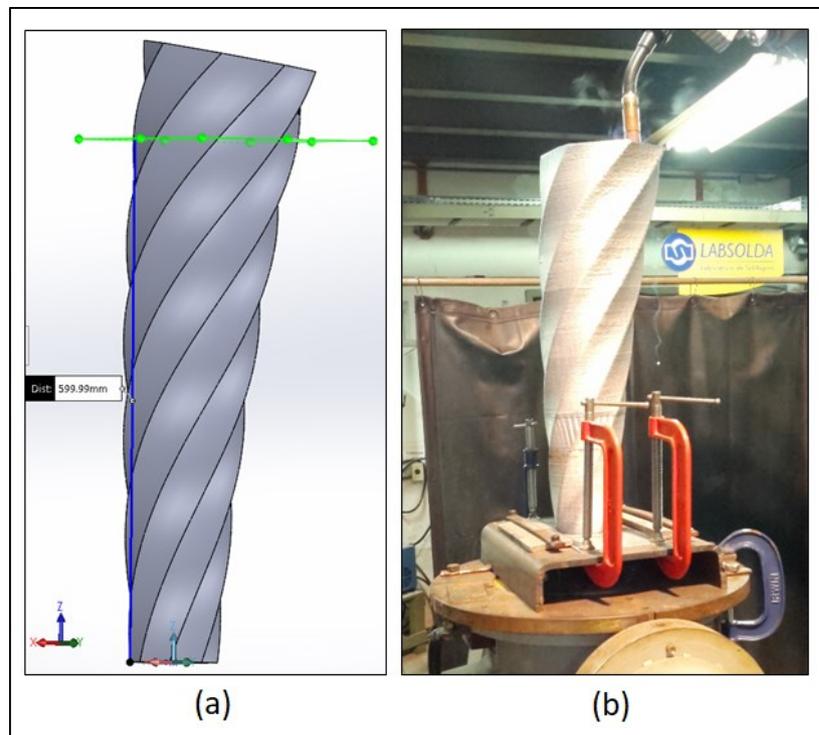


Figura 5.38 – Sólido Manufaturado. (a) Projeto em CAD. (b) Sólido Resultante.

Em relação ao sólido exibido na Figura 5.38, seu projeto foi realizado com altura de 700 mm, porém ao testar a trajetória resultante no manipulador real observou-se que este não alcançaria a altura necessária para a completa manufatura do sólido – uma bancada mais baixa necessitaria ser utilizada. Desta maneira, limitou-se o sólido à altura de 600 mm, que pode ser observado através de um plano horizontal de cor verde expresso na figura em questão. O sólido inteiro foi manufaturado em somente um passo, ou seja, o arco foi iniciado somente uma vez e se manteve do começo ao fim com sua extinção sendo realizada somente após o término da manufatura, que durou aproximadamente 5 horas. Já o tempo de fabricação do sólido anterior, exibido na Figura 5.37, foi de aproximadamente 30 minutos.

Finalmente, a peça que motivou todo este estudo sobre manufatura aditiva de paredes inclinadas (molde para fabricação do encosto de cabeça de bancos automotivos de espuma), exibida na Figura 1.3 na Introdução deste documento, foi manufaturada novamente utilizando, agora, a metodologia aqui apresentada. Apesar das condições de deposição não serem as ideias devido à falta de um sistema controlado de arrefecimento, o resultado obtido foi considerado satisfatório e pode ser observado na Figura 5.39. A peça foi manufaturada a partir dos 40 mm de altura devido ao fato da parte inferior apresentar ângulo de 36° com a horizontal, o que inviabilizava sua manufatura com os parâmetros estudados sem a utilização de inclinação da tocha e tempo de fabricação de aproximadamente 60 minutos.

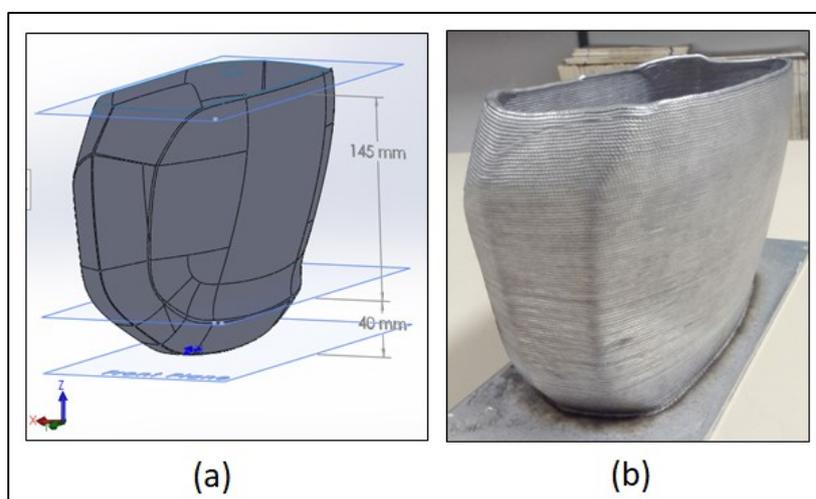


Figura 5.39 – Molde de Encosto de Cabeça de Banco Automotivo. (a) Projeto em CAD. (b) Sólido Resultante.

5.8 Discussão

Quase a totalidade dos equipamentos utilizados na manufatura aditiva via soldagem a arco foram desenvolvidos visando a soldagem de união e/ou revestimento. A utilização destes equipamentos em condições para as quais não foram especificamente projetadas pode evidenciar características e efeitos que devem ser considerados. Por exemplo, o fato de a quantidade de material depositada por área ser um fator importante na manufatura aditiva faz com que os valores da Velocidade de Soldagem e da Velocidade de Arame possuam tolerâncias limitadas de variação. A Velocidade de Soldagem é relativa a velocidade de movimentação do manipulador antropomórfico e é garantida pela fabricante dentro de tolerâncias exigidas na indústria [41]. Já a Velocidade de Arame no processo CMT é dependente da taxa de fusão que resulta da

potência aplicada pela fonte de soldagem e das condições do processo durante a deposição, como já explorado em [15] e [10] e evidenciado nos resultados apresentados na Seção 5.1 deste documento. Este comportamento de ajustar a Velocidade de Arame de acordo com a taxa de fusão do momento é a estratégia de controle implementada pela fabricante Fronius na busca de oferecer um processo estável e robusto, porém sem se preocupar garantir a Velocidade de Arame ajustada pelo operado. Em aplicações de soldagem de união, e até nas de revestimento, a discrepância entre a Velocidade de Arame Setada pelo operador e a Velocidade de Arame Real passaria despercebida, mas em aplicações de manufatura aditiva, nas quais dezenas ou centenas de camadas são depositadas, esta diferença de quantidade de material rapidamente se acumula e se torna relevante, assim como evidenciado nos resultados das Seções 5.1 e 5.2.

Logo na primeira parede manufaturada os problemas relacionados a taxa de fusão e alimentação de arame se evidenciaram tanto no valor da Velocidade de Arame em regime permanente ser diferente do valor especificado pelo operador quanto no elevado tempo de seus transitórios. Como os resultados da Seção 5.3 demonstraram, ajustando os parâmetros da forma de onda aplicada ao processo foi possível coincidir a Velocidade de Arame configurada na tela do equipamento pelo operador com a Velocidade de Arame medida através do Sistema de Aquisição de Dados (SAP-II). Porém, os resultados Seção 5.3 também demonstraram que o ajuste dos parâmetros da onda deve ser realizado através de ensaios envolvendo deposições camada sobre camada e na Velocidade de Soldagem específica, pois tanto deposições sobre chapa quanto diferentes Velocidades de Soldagem resultam diferentes taxas de fusão de arame. Ainda em relação a variação da taxa de fusão, foi observado uma leve tendência de sua elevação conforme mais camadas são depositadas e uma leve tendência de sua redução quanto maior o ângulo de inclinação da amostra manufaturada, entretanto em nenhuma destas situações novos ajustes nos parâmetros da forma de onda exigiram ser realizados.

Além disto, em experimentos sobre chapas, foi possível utilizar a estratégia de manter patamares maiores de potência (110, 120%...) durante determinado período no início do processo para reduzir a duração dos transitórios na resposta da Velocidade de Arame e uma maior homogeneidade de um cordão tanto na taxa de deposição quanto no valor da Altura de Camada. Porém, ao utilizar esta abordagem em deposições sobre camadas, a Velocidade de Arame não respondeu da maneira esperada, pois o maior aporte de calor, decorrente da maior potência nos segundos iniciais das deposições, influenciou consideravelmente tanto o valor da Altura de Camada quanto o Ângulo formado pela parte resultante com a Normal, ambos explicados pelo maior espalhamento de material devido ao maior aporte de calor [8], como já mencionado. Ou seja, a aplicação de uma maior potência nos segundos iniciais de um cordão ajudou a diminuir

os transitórios em deposições sobre chapas, mas em deposições sobre camadas acabou por não contribuir para a homogeneidade nem dos valores da Altura de Camada nem dos valores dos Ângulos formados com a Normal, resultando ambas em valores menores do que as regiões manufaturadas com a Velocidade de Arame e a taxa de fusão já em regime permanente. Esta dificuldade em iniciar o processo em condições já próximas da do regime permanente reforça o interesse em manufaturar peças em “somente um passe”, ou seja, do começo ao fim com apenas um evento de abertura de arco.

Os resultados também demonstraram a importância de um procedimento específico para as deposições das primeiras camadas o qual consiste em não só depositar uma primeira camada mais espessa, que necessariamente aporta mais calor, mas também depositar uma camada com parâmetros intermediários antes dos parâmetros de interesse para garantir completa coesão das primeiras camadas ao substrato. Os resultados demonstraram que a não deposição desta camada intermediária proporciona episódios de destacamento da parede manufaturada em relação ao substrato devido ao aparecimento de tensões residuais originárias do aporte e da retirada de calor de forma repetitiva [43]. Tais destacamentos não só interrompem o processo de manufatura por deposição em camadas como também inutilizam a parede para ser utilizada como amostra válida.

Após os ajustes dos parâmetros da forma de onda para cada Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame (Seção 5.3) e da definição da sequência de deposições para evitar o destacamento da parede durante a sua manufatura (Seção 5.4), todas as paredes foram manufaturadas e medições da altura de cada camada depositada foram realizadas em tempo de fabricação de acordo com o algoritmo exposto na Seção 4.2; ou seja, uma leitura do valor da altura de cada uma das camadas foi realizada após cada uma das deposição, aguardando somente o tempo necessário para a diminuição da temperatura da peça a níveis próximos aos da temperatura ambiente. Os resultados das medições foram expressos na Seção 5.5 tanto em gráficos que utilizam duas quanto em gráficos que utilizam quatro dimensões, dentre os quais cada um proporciona visões diferentes sobre o processo focando em uma região de trabalho mais específica (gráficos em duas dimensões) ou obtendo uma visão mais global do processo (gráficos em quatro dimensões).

A visão e o entendimento sobre as variáveis do processo não bastam se estas informações não podem ser utilizadas de maneira prática. A Seção 5.6 demonstrou a integração de uma Rede Neural Artificial treinada com os valores obtidos do processo a um Gerador de Trajetórias que já vinha sendo desenvolvido no próprio laboratório. O papel da Rede Neural Artificial foi

a de se comportar como um Controlador fornecendo valores de Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame baseando-se tanto no valor de Altura de Camada referenciada pelo operador quanto no valor do Ângulo que a parede da parte forma com a Normal. A Rede Neural Artificial foi criada e treinada com a utilização do Software MATLAB e, em seguida, integrada ao Software Visual Studio, ambiente de programação C# utilizado no desenvolvimento do Gerador de Trajetória, através de API dedicada.

Após a integração dos dados levantados através dos experimentos com o Gerador de Trajetórias, peças compostas por regiões inclinadas projetadas em Software CAD (Solidworks) foram manufaturadas para a validação da metodologia. Como os parâmetros utilizados para treinar a Rede Neural foram levantados com valor de Temperatura Interpasse equivalente a temperatura ambiente ($\cong 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), adição de água foi realizada no interior dos sólidos durante suas respectivas manufaturas a fim de limitar a escalada do valor da Temperatura Interpasse. Além disto, uma abordagem diferenciada necessitou ser utilizada para que fosse possível a manufatura aditiva dos sólidos em somente um passe, ou seja, sem que ocorresse a extinção e a reignição do arco durante o processo, evento o qual é considerado crítico na soldagem. A abordagem citada consistiu em fatiar o sólido utilizando valor de Espessura de Camada menor do que a informada à Rede Neural, pois o maior valor de Temperatura Interpasse presente na manufatura das peças inevitavelmente faz resultar em menores valores de Altura de Camadas quando comparados aos obtidos através da manufatura das paredes utilizadas como corpos de prova neste trabalho, nos quais o valor da Temperatura Interpasse decaía próximo a temperatura ambiente.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Um dos Objetivos Específicos deste trabalho foi desenvolver um método de deposição de material em camadas e de medição do valor de suas respectivas alturas de uma força suficientemente ágil e precisa. Alguns métodos de medições foram considerados, como por imagem ou feixe laser. Ao buscar um equilíbrio entre precisão, agilidade e disponibilidade, decidiu-se utilizar o próprio manipulador antropomórfico como uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) ao utilizar de sua capacidade de registrar pontos no espaço para realizar o cálculo da distância entre um ponto registrado na superfície da aresta superior da parede em manufatura antes e após cada deposição. A metodologia de medição foi descrita na Seção 4.2 deste documento e, ao considerar a precisão de posicionamento fornecido pelo fabricante do manipulador ($0,060 \cong 0,1$ mm) e a média dos desvios padrão das medições (0,102 mm), pode ser considerada como apropriada apesar da influência do operador ao se utilizar de um gabarito para registrar manualmente os pontos no espaço através do *teach pendant*.

Outro objetivo deste trabalho foi avaliar a variedade de paredes com diferentes inclinações possíveis de serem manufaturadas aditivamente, com deposições sempre perpendiculares (sem rotação de tocha), ao se manipular dois dos parâmetros de soldagem (Velocidade de Soldagem e Velocidade de Arame) e o posicionamento dos cordões (Offset-x/Ângulo com a Normal). Cada par destes parâmetros de soldagem resulta em uma geometria de camada particular e, dependendo de como estas camadas são sobrepostas sequencialmente (Offset-x de 0 a 1.5mm), a parede resultante adquire um ângulo correspondente. Se o Offset-x possuir valor 0 a parede resultante evidentemente formará um ângulo de 90° com a Normal, mas se possuir qualquer valor diferente de 0 nem o ângulo formado com a Normal nem a Altura de Camada resultante são facilmente determinadas. Os experimentos realizados neste trabalho demonstraram que, com a utilização do processo de soldagem CMT Advanced e arame de alumínio ER4043 de 1,2 mm de diâmetro como material de adição, foi possível manufaturar paredes com ângulos formados com a Normal de **90 até 47°** sem a rotação de tocha. Ou seja, se o manipulador utilizado possuísse apenas 3 eixos de movimentação (X, Y e Z) já seria possível utilizá-lo para reproduzir as mesmas paredes. Já os valores da Altura de Camada obtidos variaram de **1,28** a

2,82 mm/camada. Porém, a forma como estes valores se relacionam entre si respeita determinadas características delimitadas pelas superfícies representadas em gráficos expostos na seção dos Resultados deste trabalho.

Devido à estratégia de controle implementada pela fabricante Fronius para o processo de soldagem CMT que aumenta ou diminui a Velocidade de Arame para manter constante a frequência de transferência de material, as formas de onda sinérgicas tiveram que ser ajustadas para que os valores da Velocidade de Arame Setada pelo operador coincidisse com a Velocidade de Arame Medida pelo Sistema de Aquisição de Dados utilizado (SAP II). Deve-se atentar no fato de as condições de deposição sobre camadas serem diferentes das condições de deposição sobre chapa devido a distintas capacidades de dissipação de calor, formato da poça de fusão, ancoramento do arco, entre outros aspectos encontrados em cada uma das situações (sobre camada ou sobre chapa). Portanto os ajustes na forma de onda para fazer coincidir a Velocidade de Arame Setada com a Velocidade de Arame Medida devem ser realizados utilizando deposições sobre camadas de maneira a refletir as condições que serão encontradas durante a manufatura aditiva de uma peça, já que deposições sobre chapas fornecem condições consideravelmente diferentes mesmo que as chapas sejam de pequena espessura.

Os dados que relacionam os parâmetros de Velocidade de Soldagem, Velocidade de Arame, Altura de Camada e Ângulo formado com a horizontal levantados a partir da manufatura das paredes que serviram como corpos de prova alimentaram uma Rede Neural desenvolvida no Software MATLAB e integrada ao Gerador de Trajetórias descrito na Seção 3.2.2. As peças manufaturadas como forma de validação, a princípio, não apresentaram fidelidade aos seus respectivos modelos CAD devido ao fato do elevado valor de Temperatura Interpasse resultante das consecutivas deposições de camadas sem extinção do arco. Porém, a utilização de constante adição de água no interior dos sólidos durante o processo de manufatura aditiva limitou a escalada do valor de Temperatura Interpasse de maneira que os cordões se sustentassem apesar do menor valor de Altura de Camada resultante, que foi contornado utilizando uma abordagem que fatiou o modelo CAD em um valor menor do que o especificado a Rede Neural seletora de parâmetros. Desta maneira foi possível a manufatura de peças de até 600 mm de altura compostas por regiões de diferentes inclinações.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Possuir uma boa estimativa *a priori* do valor da Altura de Camada resultante de parâmetros de soldagem selecionados se tornou necessário no contexto deste trabalho devido à ausência de algum sistema de medição que informasse, em tempo real, a que altura o processo de manufatura aditiva se encontrava a cada instante. Se no laboratório houvesse algum sistema já implementado capaz de realizar medições em tempo real da Altura de Camada depositada seria possível utilizar alguma estratégia que abordasse o conceito de controle em malha-fechada, ou seja, fazer com que o sistema se comporte, ou se adapte, de acordo com as leituras realizadas a cada instante. É possível encontrar na literatura sistemas de medições para este propósito que utilizam câmeras CCD [47][48], feixe-laser [49] e até ultrassom [50], sobre as quais o início dos trabalhos podem se apoiar.

Os sistemas citados acima são todos sistemas de medição sem contato o que os tornam viáveis para a implementação de um sistema de controle em malha-fechada com o objetivo de manter constante o valor da Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) durante todo o processo de deposição sem a necessidade extinção do arco. Também seria possível utilizá-los somente para obter o valor da altura de cada camada depositada substituindo o procedimento de Reajuste de DBCP com o auxílio de um gabarito utilizado neste trabalho o qual sofre forte influência do operador sobre as incertezas de medição. Porém, uma outra maneira de eliminar a influência do operador nas medições dos valores de Altura de Camada seria implementar um sistema que identificaria o momento do toque do Bico de Contato com a aresta superior da peça sob manufatura aplicando uma pequena tensão entre eles e criando um procedimento para o manipulador se aproximar lentamente de encontro a peça enquanto monitora-se a tensão. O momento do contato é quando a tensão cair à 0 V e o manipulador deve encerrar a movimentação, registrar a posição no espaço que se encontra para que a altura da camada seja calculada através da distância relativa entre esta posição e posição registrada como a aresta da camada anterior. Além disto é possível que o manipulador se mova 14 mm acima da aresta atual como forma de reajustar a DBCP sem a influência do operador.

Em trabalho recente [51], foi desenvolvido no LABSOLDA um sistema de alimentação dinâmica baseado no processo CMT da Fronius no qual utilizou-se a mesma estratégia de controlar a taxa de transferência de arame. Para trabalhos futuros, pode-se aproveitar de toda acessibilidade deste desenvolvimento próprio para implementar uma estratégia de controle a qual atue sobre a potência aplicada ao processo a fim de manter a Velocidade de Soldagem no ponto

de operação referenciado pelo operador; em outras palavras, esta forma de controle aqui sugerida aumentaria ou diminuiria a potência aplicada ao processo (Tensão e Corrente) através da variação em tempo real dos parâmetros da forma de onda a fim de atingir a taxa de fusão necessária para transferir material no valor de Velocidade de Arame setada pelo operador, aproveitando a elevada flexibilidade do binômio Potência – Velocidade de Arame permitida pelas tecnologias de alimentação dinâmica e corrente pulsada. É certo que desafios intrínsecos à esta abordagem surgirão durante o desenvolvimento desta abordagem, mas as vantagens que recorreriam de um controle de Velocidade de Arame bem ajustado junto com a alta capacidade de posicionamento dos manipuladores modernos seriam consideravelmente grandes devido ao elevado nível de controle da quantidade de material depositada por área que se poderia atingir, como já mencionado anteriormente.

Um trabalho relacionado a este que já vem sendo realizado no LABSOLDA é o desenvolvimento de um sistema de controle de nível de tanques de inundação que serão utilizados para se atingir uma alta dissipação de calor das peças em tempo de manufatura. O controle deve ser capaz de elevar o nível de fluido refrigerante do tanque na mesma medida em que a peça aumenta de altura pelo processo de deposição de material. Desta forma é esperado que o gradiente térmico se mantenha constante durante todo o processo de deposição e seja atingida uma alta homogeneidade em relação as propriedades da peça final.

Por fim, é sugerido que trabalhos sejam realizados no campo da simulação para que questões relacionadas ao ciclo térmico, crescimento de grãos, tensões residuais e distorções não só possam ser previstas *in silico* a partir do modelo CAD e dos parâmetros de soldagem inseridos, mas também que ajustes na geometria e nos parâmetros possam ser sugeridos para as chances de sucesso na primeira tentativa de fabricação sejam maximizadas – este é o conceito de *Right First Time* [52].

7 REFERÊNCIAS

- [1] K. Santos, E. Loures, F. Piechnicki, and O. Canciglieri, “Opportunities Assessment of Product Development Process in Industry 4.0,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, no. June, pp. 1358–1365, 2017.
- [2] Al Dean, “3D Printing vs Additive Manufacturing | PTC,” 2017. [Online]. Available: <https://www.ptc.com/en/cad-software-blog/3d-printing-vs-additive-manufacturing/>. [Accessed: 13-Jan-2019].
- [3] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, “Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM),” *Materials*, vol. 12, no. 7, p. 1121, 2019.
- [4] Ivántabernero, A. Paskual, P. Álvarez, and A. Suárez, “Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 68, no. April, pp. 358–362, 2018.
- [5] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014.
- [6] “LABSOLDA - Apresentação.” [Online]. Available: <http://www.labsolda.ufsc.br/sobre-o-labsolda/apresentacao>. [Accessed: 14-Jan-2019].
- [7] “ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. [Accessed: 30-Jan-2019].
- [8] J. Xiong, Y. Lei, H. Chen, and G. Zhang, “Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, pp. 397–403, 2017.
- [9] “USA.” [Online]. Available: <https://www.fronius.com/en-us/usa>. [Accessed: 08-Feb-2019].
- [10] C. Marques, “Prospecções da natureza física da soldagem MIG automática de ligas de alumínio,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [11] C. Marques, “Análise de Técnicas e Efeitos Físicos da Alimentação Dinâmica do Arame no Processo de Soldagem MIG/MAG com Vistas ao Desenvolvimento de um Sistema Flexível Nacional,” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- [12] “Better Quality with CMT and TPS/i - Fronius International.” [Online]. Available: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/cmt-voestalpine-application>. [Accessed: 08-Feb-2019].
- [13] S. Selvi, A. Vishvaksean, and E. Rajasekar, “Cold metal transfer (CMT) technology - An overview,” *Defence Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 28–44, 2018.
- [14] B. Cong, J. Ding, and S. Williams, “Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 9–12, pp. 1593–1606, 2015.
- [15] F. Sartori, “Tecnologias e técnicas modernas do processo MIG/MAG para o passe de raiz em soldagem orbital de tubos,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- [16] “Manufatura - Conceito, Definição e O que é Manufatura.” [Online]. Available: <https://www.meusdicionarios.com.br/manufatura>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [17] D. José Horst, C. Adriano Duvoisin, and R. De Almeida Vieira, “Additive Manufacturing at Industry

- 4.0: a Review,” *Article in International Journal of Engineering and Technical Research*, no. 8, p. 3, 2018.
- [18] M. Silva, “Simulação e Programação Off-line de robôs de montagem.,” Tese de Doutorado, Porto, Portugal., 1996.
- [19] D. F. M. Pereira, “INTRODUÇÃO A MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS.” [Online]. Available: <http://www.dequi.eel.usp.br/~felix/MSP.pdf>. [Accessed: 21-Jan-2019].
- [20] H. Gonçalves, J. C. Dutra, and R. Gohr, “Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG / MAG por Curto- Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura . Parte 3 de 3 : Princípios dos Sistemas MIG / MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente,” *Soldagem & Inspeção*, vol. 13, no. 1, pp. 70–81, 2008.
- [21] R. H. G. e Silva, L. E. dos Santos Paes, R. C. Barbosa, F. Sartori, and M. B. Schwedersky, “Assessing the effects of solid wire electrode extension (stick out) increase in MIG/MAG welding,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 1, p. 31, 2018.
- [22] F. A. C. R. Sérgio Rodrigues Barra, Jair Calors Dutra, “AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS / PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM E AUTOMAÇÃO SOBRE A PLANICIDADE E ASPECTO SUPERFICIAL DOS REVESTIMENTOS,” in *XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem*, 1998, no. 091, pp. 1–9.
- [23] R. R. de Gouveia, A. G. M. Pukasiewicz, A. R. Capra, S. L. Henke, and P. C. Okimoto, “Efeito da temperatura interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por GTAW do aço ASTM A743-CA6NM,” *Soldagem e Inspecao*, vol. 18, no. 2, pp. 127–136, 2013.
- [24] B. W. Z. P. S. van D. and H. Li, “Thermal Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing: Characteristics, Effects and Control.,” *Antimicrobial Compounds*, pp. 1–26, 2019.
- [25] Z. Li *et al.*, “Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 742, no. September 2018, pp. 287–294, 2019.
- [26] J. Shi, F. Li, S. Chen, Y. Zhao, and H. Tian, “Effect of in-process active cooling on forming quality and efficiency of tandem GMAW-based additive manufacturing,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 5–8, pp. 1349–1356, 2019.
- [27] J. Xiong, R. Li, Y. Lei, and H. Chen, “Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 251, no. August 2017, pp. 12–19, 2018.
- [28] K. Derekar, J. Lawrence, G. Melton, A. Addison, X. Zhang, and L. Xu, “Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 269, p. 05001, 2019.
- [29] “O que são Redes Neurais? - TecMundo.” [Online]. Available: <https://www.tecmundo.com.br/programacao/2754-o-que-sao-redes-neurais-.htm>. [Accessed: 24-Jun-2019].

- [30] P. J. Moisés and M. Villanueva, “Redes Neurais Artificiais (RNA) Definições.”
- [31] “Redes Neurais Artificiais.” [Online]. Available: <https://www.gsigma.ufsc.br/~popov/aulas/rna/aprendizado/>. [Accessed: 25-Aug-2019].
- [32] V. Y. Matsunaga, “Curso de Redes Neurais utilizando o MATLAB,” 2012.
- [33] M. Berger *et al.*, “A Survey of Surface Reconstruction from Point Clouds,” *Computer Graphics Forum*, 2016.
- [34] E. A. Alberti, L. J. Da Silva, and A. S. C. M. D’Oliveira, “Manufatura Aditiva: O papel da soldagem nesta janela de oportunidade,” *Soldagem e Inspecao*, vol. 19, no. 2, pp. 190–198, 2014.
- [35] “Grupo de Educação Tutorial do Curso de Engenharia Computacional – GET Engenharia Computacional.” [Online]. Available: http://www.ufjf.br/get_engcomp/atividades/atividades-de-ensino/. [Accessed: 16-Feb-2019].
- [36] “Cartão LABSOLDA 2017.” [Online]. Available: <http://www.labsolda.ufsc.br/temp/cartao2017/index.html>. [Accessed: 16-Feb-2019].
- [37] “About Us | Metavision.” [Online]. Available: <http://www.meta-vs.com/about-us.html>. [Accessed: 06-Feb-2019].
- [38] F. L. Sandos e Silva, “Desenvolvimento de Estratégias para Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco,” Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- [39] IMCSOLDAGEM, “Manual SAP V4,” 2014. [Online]. Available: https://www.imc-soldagem.com.br/media/com_eshop/attachments/manual_SAP_V4Ti_4aEd.pdf.
- [40] Minipa, “TERMÔMETRO INFRAVERMELHO - Modelo MT-350.” [Online]. Available: http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/Mt-350-1301-BR.pdf. [Accessed: 27-Jun-2019].
- [41] Yaskawa/Motoman, “DX100 Controler - Instructions - Part Number: 155494-1CD.” .
- [42] F. International, *RCU 5000i - Operating Instruction* . .
- [43] S. Williams, “Residual Stress Characterization and Control in the Additive Manufacture of Large Scale Metal Structures,” *Residual Stresses 2016*, vol. 2, pp. 455–460, 2016.
- [44] B. A. Szost *et al.*, “A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components,” *Materials and Design*, vol. 89, pp. 559–567, 2016.
- [45] K. M. de Figueiredo, “MAPEAMENTO DOS MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO,” no. 215, p. 3, 2000.
- [46] “Call MATLAB Function from C# Client - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/call-matlab-function-from-c-client.html. [Accessed: 25-Jun-2019].
- [47] J. Xiong, Z. Yin, and W. Zhang, “Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 233, pp. 100–106, 2016.
- [48] J. Xiong and G. Zhang, “Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision,” *Measurement Science and Technology*, vol. 24, no. 11, 2013.
- [49] A. Heralić, A. K. Christiansson, and B. Lennartson, “Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, no. 9, pp.

- 1230–1241, 2012.
- [50] A. W. Schumann and Q. U. Zaman, “Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 47, no. 1, pp. 25–40, 2005.
- [51] A. G. Rodrigues, “DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE ALIMENTAÇÃO DINÂMICA APLICADO EM SOLDAGEM MIG/MAG,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.
- [52] M. Megahed *et al.*, “LPBF Right the First Time—the Right Mix Between Modeling and Experiments,” *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, pp. 194–216, 2019.
- [53] V. Bhavar, B. Forge, and P. Kattire, “A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing Business development of Additive Manufacturing View project additive manufacturing View project,” 2014, no. April 2016.
- [54] Frost & Sullivan, “Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025,” no. May, pp. 1–61, 2016.
- [55] “What is Generative Design | Tools & Software | Autodesk.” [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [56] “Electron Beam Melting - EBM Process, Additive Manufacturing | Arcam AB.” [Online]. Available: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [57] C. K. Chua, K. . Leong, and C. S. Lim, “Rapid prototyping. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.,” 2010.
- [58] “Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University.” [Online]. Available: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [59] D. Gill, J. Smugersky, and C. Atwood, “Laser Engineered Net Shaping™(LENS®) for the Repair and Modification of NWC Metal Components,” *Prod.Sandia.Gov*, no. November, 2006.
- [60] “Laser Engineered Net Shaping Manufacturing Technologies Processing Blade H13 Tooling.”
- [61] “Homepage - Merlin Project.” [Online]. Available: <http://www.merlin-project.eu/home/index.jsp>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [62] E. A. Alberti, B. M. P. Bueno, and A. S. C. M. D’Oliveira, “Additive manufacturing using plasma transferred arc,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 9–12, pp. 1861–1871, 2016.
- [63] M. I. Marconi, *I Riporti duri con polveri saldate con il processo P.T.A. (Plasma ad Arco Transferito)*. 2002.
- [64] L. Dilthey, U; Kabatbik, “Zentrale Pulverzufuhr beim Plasma-Pulverauftragschweissen.,” *Schweissen & Schneiden*, no. 12, pp. 766–771.
- [65] F. Martina, J. Mehnen, S. W. Williams, P. Colegrove, and F. Wang, “Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 6, pp. 1377–1386, 2012.
- [66] “Wirefeed Additive Manufacturing vs. Powder Methods | Sciaky.” [Online]. Available: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [67] L. G. : N. HQ, “From Nothing, Something: One Layer at a Time,” 2015.

- [68] A. Heralic, "Towards Full Automation of Robotized Laser Metal-wire," Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden., 2009.
- [69] R. N. Blumenschein, "Análise de Ciclo de Vida: conceitos e função," *Palestra*. [Online]. Available: http://www.inmetro.gov.br/qualidade/responsabilidade_social/apresentacoes/3.pdf. [Accessed: 14-Jan-2019].

APRENDICE A - PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA DE PEÇAS METÁLICAS

A Manufatura Aditiva de peças metálicas permite a obtenção de objetos complexos que seriam caros, quando não impossíveis, de se produzirem através dos processos de fabricação mais tradicionais. Muitas aplicações vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos e indústrias como a aeroespacial, a automotiva e a médica estão se beneficiando diretamente destes avanços. Primeiramente, Manufatura Aditiva pode reduzir consideravelmente a relação *buy-to-fly*, que é a razão entre a quantidade total de material utilizado e a quantidade de material na peça finalizada. Nos processos convencionais de manufatura, a relação *buy-to-fly* para motores e estrutura de aviões podem chegar a 10:1 e 20:1, respectivamente. Já com a Manufatura Aditiva é possível produzir peças muito próximas a suas geometrias finais e a relação *buy-to-fly* pode chegar perto de 1:1 [53]. O crescimento da indústria de Manufatura Aditiva está prevista por muitos a ser rápida e substancial conforme mais empresas desenvolvem novos equipamentos, mais materiais se tornam disponíveis e mais usuários finais adotam a tecnologia. O valor global desta indústria está estimado em atingir 10 bilhões de Dólares em 2021 [54].

A Manufatura Aditiva de Peças Metálicas tem se demonstrado uma ótima ferramenta para designers industriais que finalmente ganharão a possibilidade de fabricar no mundo real componentes com geometrias otimizadas e obtidas com ajuda de uma nova abordagem de softwares de simulação que até então ficavam limitadas ao mundo virtual - Design Generativo, no qual uma abordagem similar a evolução encontrada na natureza é adotada. No Design Generativo, os designers ou engenheiros definem as especificações que o produto deve respeitar juntamente com os materiais utilizados, custo máximo, entre outras restrições. O software, então, utilizando simulações baseadas em Inteligência Artificial e Computação em Nuvem, evolui uma solução inicial para encontrar a melhor, ou a mais próxima da melhor, solução possível [55]. Um exemplo é exibido na Figura 7.1.



Figura 7.1– Exemplo de Design Generativo. Fonte: Autodesk.

Geralmente, o resultado obtido possui formas impossíveis de serem fabricadas pelos métodos mais tradicionais de manufatura - é nesse sentido que a Manufatura Aditiva entra com grande potencial. Porém é irreal pensar que todos os processos de fabricação atuais serão substituídos por Manufatura Aditiva. A ideia de que uma única máquina será capaz de produzir qualquer geometria com ilimitada variação de material se torna muito improvável ao considerar que somente dentro do campo da própria Manufatura Aditiva de Peças Metálicas já existem inúmeros processos entre os quais a escolha do mais adequado depende da peça que se deseja obter. Os principais processos de manufatura aditiva de peças metálicas serão expostos nas próximas seções.

APÊNDICE A.1 - SISTEMAS COM LEITO DE PÓ

Neste processo, um leito, ou cama, de pó é criado ao se espalhar uma quantidade considerável deste sobre a área de trabalho do sistema por um mecanismo que é habitualmente automatizado. A fonte de energia, que pode ser tanto um feixe de elétrons (*electron beam*) quanto um feixe laser, é programada para bombardear a superfície do leito de tal maneira que a fusão ou a sinterização do pó ocorra somente na geometria desejada. O processo necessita ocorrer no vácuo quando feixe de elétrons é utilizado como fonte de energia.

Em seguida, o sistema decrementa a altura da área de trabalho e mais metal em pó é espalhado sobre o leito. O processo é repetido até que uma peça sólida de três dimensões seja formada. Uma ilustração do sistema é exibida na Figura 7.2.

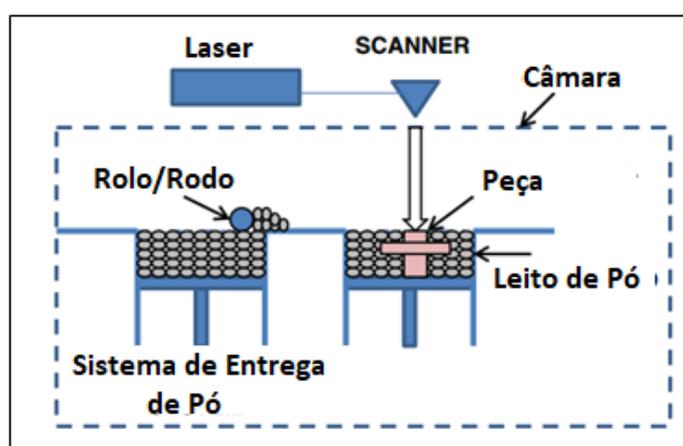


Figura 7.2 – Sistema de Manufatura Aditiva com Leito de Pó. Fonte: [5]

Entre as vantagens deste processo está a habilidade de produzir peças com muitos detalhes e passagens internas devido à grande capacidade de controle dimensional, mas, por outro lado, as peças produzidas possuem pequeno volume – menos do que 0.03m³ [5].

- **Direct Metal Laser Sintering (DMLS)**

O processo *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) sinteriza metal e ligas metálicas em pó usando um laser de alta potência para produzir peças metálicas robustas. Esta tecnologia produz peças metálicas prontas, incluindo ferramentas e peças de produção para diversos setores da indústria. A câmara da área de trabalho possui um controle que mantém a temperatura da peça usualmente apenas alguns graus abaixo do ponto de fusão do material, exigindo menos potência do laser para que uma nova camada seja sinterizada a peça. Muitas vezes a câmara é preenchida com nitrogênio para maximizar a oxidação e melhorar o acabamento final da peça.

Neste processo, períodos de resfriamento são exigidos para que uma sinterização de qualidade seja atingida. Alguns equipamentos baseados em DMLS possuem capacidade de monitorar a temperatura camada por camada e adaptar a potência do laser com o intuito de otimizar a qualidade da peça final. Uma peça manufaturada pelo processo DMLS é ilustrada na Figura 7.3.



Figura 7.3 – Peça manufaturada utilizando o processo DMLS. Fonte: YouTube

- **Selective Laser Melting (SLM)**

SLM utiliza laser para fundir camadas sucessivas de pó metálico. O sistema se baseia em arquivo CAD para fazer o laser bombardear partículas em locais específicos do leito com pó metálico até que haja uma fusão completa do material. Em seguida, o sistema sucessiva-

mente espalha mais metal em pó sobre o leito, até que o objeto seja completamente manufaturado. A principal diferença deste processo em relação ao DMLS está no nível ao que as partículas são aquecidas – enquanto no DMLS a temperatura atinge um nível suficiente somente para a sinterização do pó, no SLM a temperatura chega até o ponto de fusão do material [53].

- Electron Beam Melting (EBM)

Neste processo, camadas são formadas utilizando um feixe de elétrons para fundir metal em pó disposto em um leito. Os equipamentos da Arcam, empresa pioneira neste processo, utilizam bobinas eletromagnéticas para controlar o feixe de elétrons e uma pressão de vácuo na ordem de 1×10^{-5} mbar [56].

O processo EBM é capaz de manufaturar peças com boas propriedades físicas devido a uma distribuição uniforme da temperatura durante a fusão. A alta qualidade das peças produzidas por este processo o torna adequado para a manufatura de peças de alto padrão utilizadas em aplicações de indústrias como a aeroespacial e médica [57]. Na Figura 7.4, é possível visualizar a área de trabalho coberta de metal em pó em seu leito e o feixe de elétrons sendo disparado de acordo com a geometria da peça a ser manufaturada.

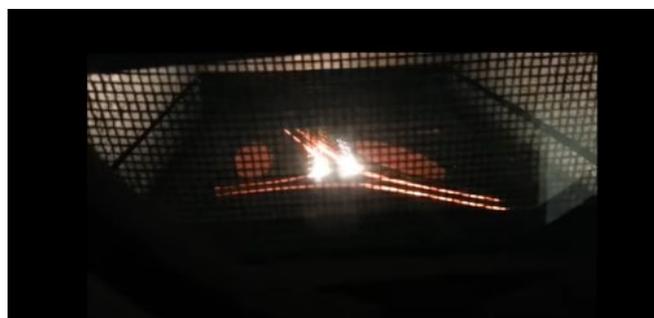


Figura 7.4 – Feixe de Elétrons disparado para fusão de metal em pó. Fonte: YouTube.

Quando comparado ao processo de usinagem CNC, a utilização do EBM com titânio e camadas de 0.1mm de espessura fornece melhores resultados, de modo mais rápido e reduzindo os custos em até 35% [58]. Operações pós-impressão incluem a remoção do excesso de pó e usinagem CNC de acabamento.

APÊNDICE A.2 - SISTEMAS COM ALIMENTAÇÃO DE PÓ

Estes sistemas são capazes de produzir peças muito maiores do que as do sistema anterior, sendo possível obter peças com mais de 1.2m^3 de volume. Nestes sistemas, um Laser,

Feixe de Elétron ou um Arco Elétrico é usado como fonte de energia e o metal em pó é transportado até a poça metálica através de um bico.

Existem dois tipos que predominam no mercado: um no qual a peça que está sendo manufatura é mantida estática e todo o cabeçote se move; e outro no qual o cabeçote se mantém estático e a peça se move. Uma ilustração do sistema é exibida na Figura 7.5.

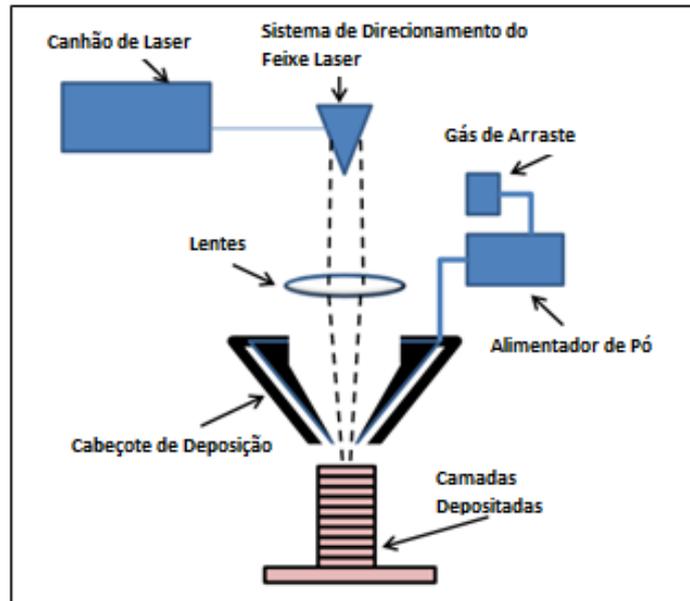


Figura 7.5 – Sistema de Manufatura Aditiva com Alimentação de Pó. Fonte: [5]

Laser Engineered Net Shape (LENS)

LENS é uma tecnologia desenvolvida pela *Sandia National Laboratories* que se baseia em modelos CAD não só para manufaturar peças metálicas aditivamente, mas também para modificar ou reparar peças já existentes como, por exemplo, pás lascadas de turbinas. Em [59], são demonstrados 4 (quatro) procedimentos de reparos: recuperação de uma garrafa metálica goivada, diminuição do diâmetro interno das bases de uma bancada, aumento do diâmetro externo de luvas de conexão e o reparo de grampos utilizados para a fixação de corpos de prova.

Além da utilização das ligas mais tradicionais como aço inoxidável, aço ferramenta, titânio e as baseadas em níquel, materiais compósitos também já foram utilizados com este processo. Por fim, peças que possuem variações de composição ao longo de suas geometrias também podem ser obtidas com este processo. A manufatura de uma lâmina genérica utilizando este processo é ilustrada na Figura 7.6.

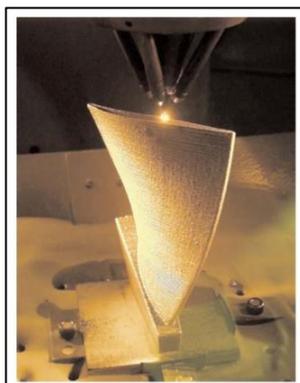


Figura 7.6 – Manufatura de uma lâmina utilizando LENS. Fonte: [60]

- Laser Metal Deposition-powder (LMD-p)

LMD é um processo que foi desenvolvido pela empresa inglesa de pesquisa e desenvolvimento chamada *TWI* para o projeto europeu *MERLIN*. Este projeto visa reduzir o impacto ambiental do transporte aéreo utilizando técnicas de Manufatura Aditiva na produção de aeronaves comerciais. A ideia é atingir aproveitamento de quase 100% de material, sem o uso de produtos químicos e sem custos de ferramentas na fabricação dos componentes destas aeronaves reduzindo drasticamente o custo de fabricação. Além disto, a Manufatura Aditiva permitirá que aviões se tornem mais leves com a utilização de menos material na confecção de seus componentes e com isso gerará uma enorme economia de combustível e grande diminuição na quantidade de gases tóxicos emitidos [61].

O processo de manufatura aditiva LMD-p direciona um fluxo concentrado de pó para dentro da poça de fusão com a utilização de um bocal projetado especificamente para a aplicação. Um esquemático do processo pode ser visualizado na Figura 7.7.

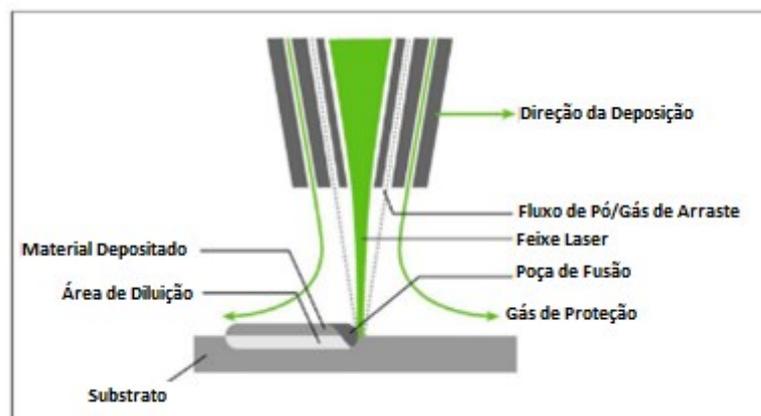


Figura 7.7 – Processo de Manufatura Aditiva LMD-p. Fonte: www.metal-powder.net

- Plasma Transferred Arc-powder (PTA-p)

Aplicações em Manufatura Aditiva que utilizam arco elétrico como fonte de calor estão se tornando cada vez mais comuns. Muito disto é devido à alta produtividade atingida por estes processos quando comparados com processos baseados em feixe laser.

O processo PTA permite um melhor controle da taxa de alimentação de material de adição e possui um menor aporte térmico quando comparado a outros processos de soldagem baseados em arco elétrico, como o MIG e o TIG convencionais. Estas características o torna adequado para aplicações de Manufatura Aditiva principalmente na fabricação de peças mais nobres. Se as vantagens do PTA poderem ser estendidas a fabricação de peças finas e pequenas este processo será muito competitivo quando comparado a processos de Manufatura Aditiva baseados em laser [62].

As Figuras 7.8, 7.9 e 7.10 exibem os três modelos básicos de tochas PTA-p que se diferenciam entre si pela forma de alimentação de pó. É importante ressaltar que o modelo com alimentação central acaba se limitando a teoria devido à enorme dificuldade de usinar um furo passante por todo o comprimento de um eletrodo.

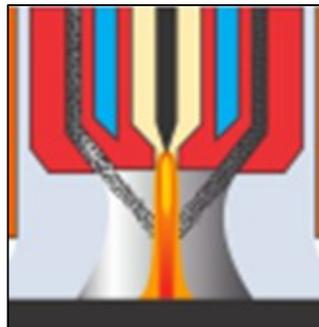


Figura 7.8 – Tocha PTA com injeção externa de pó. Fonte: [62].

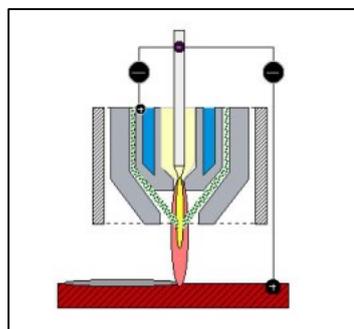


Figura 7.9 – Tocha PTA com injeção interna de pó. Fonte: [63].

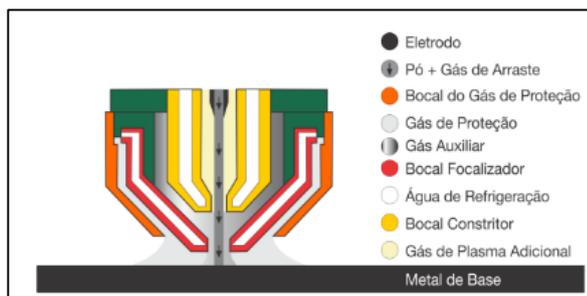


Figura 7.10 – Tocha PTA com injeção central de pó. Fonte: [64].

Resultados obtidos em [62] demonstram que paredes com pequenas espessuras (2mm) podem, sim, ser manufaturadas utilizando PTA-p e indicam que a espessura efetiva destas paredes depende principalmente da composição da liga utilizada. Estes resultados complementam os de outros artigos encontrados na literatura [65] nos quais paredes mais espessas (16mm) são obtidas demonstrando que este processo pode ser utilizado para a manufatura de uma vasta gama de geometrias.

Existem, ainda, muitas questões em aberto em relação a utilização do PTA-p para Manufatura Aditiva como, por exemplo, o aparente menor desperdício de pó quando comparado a processos Laser-p e as vantagens e desvantagens em utilizar tochas com alimentação interna em relação a tochas com alimentação externa de pó.

APÊNDICE A.3 - SISTEMAS COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME

Nestes sistemas de Manufatura Aditiva o material é adicionado em forma de arame e a fonte de energia pode ser por feixe laser, feixe de elétrons ou arco voltaico. Inicialmente, uma camada simples de material é depositada e, subsequentemente, outras camadas são depositadas, uma após a outra, de acordo com a geometria da peça desejada. Uma ilustração do sistema é exibida na Figura 7.11.

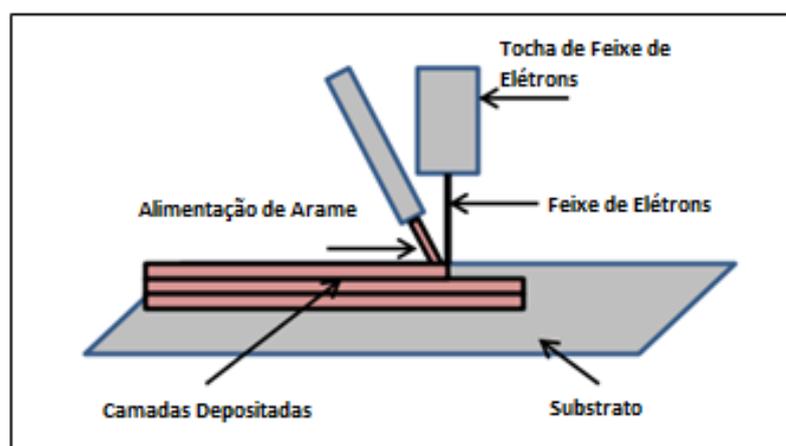


Figura 7.11 – Sistema de Manufatura Aditiva com Alimentação de Arame. Fonte: [17].

Em geral, sistemas com alimentação de arame são indicados na busca de altas taxas de deposição e na construção de peças de grandes volumes. Entretanto, peças manufaturadas por este processo geralmente necessitam receber um trabalho de usinagem de acabamento mais extensivo quando comparadas com peças obtidas com sistemas que utilizam material de adição em pó.

Baseando-se em pesquisas na internet, a utilização de material de adição em forma de pó é mais cara do que a utilização do mesmo tipo de material em forma de arame. Por exemplo, em média, Titânio 6Al-4V em pó é por volta de 141% mais caro do que o custo médio da mesma liga em arame – e o titânio em arame geralmente tem um tempo de entrega menor do que titânio em pó. Tântalo em pó é 7% mais caro do que a média do preço do Tântalo em arame. E, por fim, ligas de Inconel 625 e de Aço Inox 316 são duas vezes mais caras quando fornecidas em pó do que quando fornecidas em forma de arame [66].

Sistemas de Manufatura Aditiva com alimentação de arame também podem ser divididos em 3 grupos quando o tipo da fonte de emissão de energia é considerado: Laser, Feixe de Elétrons ou Arco Elétrico. Cada grupo possui vantagens e desvantagens. É possível encontrar, na literatura, análises detalhadas que os comparam entre si considerando materiais utilizáveis e eficiência. Uma breve descrição sobre alguns deles é dada nas próximas seções.

- **Electron Beam Freeform (EBF)**

Um dos processos de Manufatura Aditiva mais interessantes é o *Electron Beam Freeform* patenteado pela NASA para construir peças complexas próximas as suas dimensões finais. Esse processo surgiu há quase 10 (dez) anos e é fruto da idealização de uma máquina capaz de fabricar peças ou ferramentas assim que a necessidade surgir na Terra, Marte ou na Estação Espacial Internacional.

A técnica utilizada pelo processo EBF consiste em adicionar material de adição em forma de arame à poça metálica em um ambiente de alto vácuo utilizando feixe de elétrons como fonte de energia para a fusão de material. Este processo atinge taxas de deposição de até 2500cm³/h e boa capacidade de manufaturar peças que possuem muitos detalhes. Em relação a esta capacidade de reproduzir detalhes, o tamanho destes é determinado pelo diâmetro do arame de alimentação onde menores diâmetros são capazes de reproduzir detalhes mais finos [10]. Uma peça manufaturada utilizando este processo é exibida na Figura 7.12.



Figura 7.12 – Peça estrutural manufaturada com o processo EBF. Fonte: [67]

Devido a existência de dois alimentadores de arame que podem atuar de forma simultânea é possível misturar, durante a execução do processo, dois materiais distintos para se obter uma liga desejada ou para unir um material em outro. Outro ponto destacado pela NASA é a questão da sustentabilidade ambiental dentro da qual é citado o exemplo onde, para a fabricação de um determinado componente de avião na forma tradicional, é necessário utilizar um bloco de titânio de 2700kg (dois mil e setecentos quilogramas) do qual, após a usinagem, se obtém uma peça final com massa de apenas 150kg (cento e cinquenta quilogramas). Isto significa 2550kg (dois mil quinhentos e cinquenta quilogramas) de titânio para reciclagem e o uso de milhares de galões de fluido de corte. Com a utilização do EBF é possível obter o mesmo componente utilizando apenas 170kg (cento e setenta quilogramas) de titânio dos quais somente 20kg (vinte quilogramas) é usinado. Como se estas já não fossem vantagens suficientes, uma menor quantidade de energia elétrica é requerida para a obtenção do componente em questão [67].

- **Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)**

A empresa Sciaky Inc. começou a desenvolver o processo baseado em feixe de elétrons e arame por volta de 1960. O processo foi, então, refinado para a manufatura de vedações de motores nos anos de 1990. Nos anos 2000, o EBAM foi desenvolvido para ajudar fabricantes a economizar quantidades significativas de tempo e dinheiro na produção de peças metálicas de grande porte e alto valor agregado. Em 2009, Sciaky formalmente lançou o EBAM como uma opção de serviço e, em 2011, Sciaky Inc. foi selecionada pela *Lockheed Martin Aeronautics* para desenvolver pesquisas em manufatura aditiva de componentes estruturais de titânio para o

programa de desenvolvimento da aeronave de combate F-35. Finalmente, em 2014, a Sciaky Inc. começou a comercializar o EBAM e a empresa Lockheed Martin Space Systems estava entre os primeiros clientes a receber um deste sistema para desenvolver e manufaturar aditivamente tanques de propulsores.

O processo utiliza arame como material de adição e feixe de elétrons como fonte de calor para manufaturar aditivamente peças metálicas dentro de uma câmara com vácuo. Baseando-se em modelos CAD, que são convertidos em código CNC, o cabeçote do EBAM deposita material de adição, camada a camada, até que a peça atinja dimensões próximas das finais. Em seguida, o componente recebe tratamento térmico e usinagem de acabamento. O processo é aplicável para a manufatura de peças que possuem desde alguns milímetros até alguns metros de dimensão, sendo a dimensão da câmara de vácuo o fator limitante. Na Figura 7.13, um esquemático do processo é ilustrado:

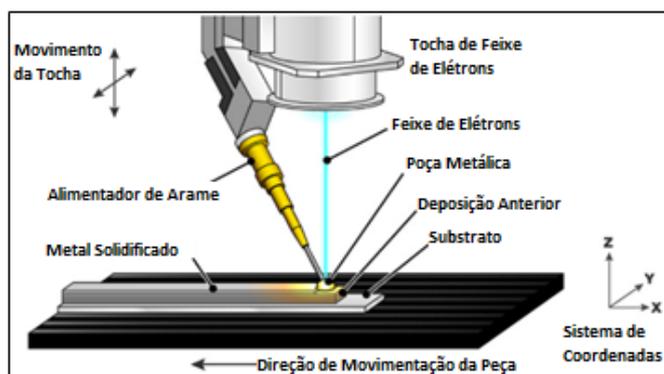


Figura 7.13 – Processo EBAM. Fonte: Sciaky Inc.

O sistema possui controle em malha fechada para se tornar robusto e a taxa de deposição varia de 3 a 9kg de metal por hora, dependendo do material selecionado e, segundo o fabricante, este é o processo de manufatura aditiva mais rápido do mercado. Para efeito de comparação, a maior taxa de deposição já registrada é de 3kg por hora com processos a laser com alimentação de arame e de 0.2kg por hora com processos baseados em leito com pó.

Outra característica deste processo é a possibilidade da utilização de múltiplos alimentadores de arame para um único feixe de elétrons. Esta opção permite a alimentação simultânea de dois ou mais materiais de adição em uma única poça metálica, o que é ideal para a criação de novas ligas que não são usualmente utilizadas hoje. Além disto, esta configuração permite a manufatura de peças que possuem ligas distintas de acordo com a parte da peça. A Figura 7.14 exhibe uma tocha com configuração de duplo arame:



Figura 7.14 – Processo EBAM com configuração de duplo arame. Fonte: Sciaky Inc.

- Laser Metal Deposition-wire (LMD-w)

Laser Metal Deposition-wire é um processo de manufatura aditiva de peças metálicas similar aos dois anteriores em relação a utilização de arame como material de adição, porém se difere quanto a fonte de calor utilizada que neste é um feixe laser ao invés de um feixe de elétrons. Uma poça metálica é formada na região sobre a qual o laser é focado e o arame que é alimentado sobre ela se funde formando, assim, uma nova camada de material que possui união metalúrgica com a anterior. Um esquemático do processo é exibido na Figura 7.15.



Figura 7.15 – Laser Metal Deposition-wire. Fonte: [68]

- Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco+Arame (*Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM*)

Por fim, o último processo que completa os que utilizam alimentação de material em forma de arame é denominado de *Wire+Arc Additive Manufacturing* (WAAM) que pode ser traduzido para o português como Manufatura Aditiva via Soldagem a Arco. Como pode ser subentendido a partir de sua nomenclatura, este processo de Manufatura Aditiva utiliza arco elétrico como fonte de calor baseando-se nas variantes dos processos de soldagem convencionais, principalmente no MIG/MAG, no TIG e no PTA-w.

Este foi o processo de manufatura aditiva utilizado para o desenvolvimento deste trabalho através da aplicação da variante do processo MIG/MAG intitulada de CMT Advanced da fabricante Fronius.

APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DE FERRAMENTA

O HP20D, robô manipulador utilizado no desenvolvimento deste trabalho, é formado por seis juntas. Cada uma destas juntas possui um comprimento particular e tanto suas respectivas posições no espaço quanto suas movimentações podem ser descritas utilizando matrizes. Devido ao fato de conhecer o comprimento exato de cada uma destas juntas e dos procedimentos de calibração que são realizados em fábrica, o software do manipulador possui a informação exata sobre a posição (coordenadas X, Y e Z) e a orientação (Rx, Ry e Rz) do flange no espaço. Porém, o número de formatos e dimensões de tochas que podem ser acopladas pelos operadores pode tender ao infinito. Porém para garantir que o manipulador possa corretamente realizar operações que consistam em movimentos lineares e/ou circulares, informações dimensionais precisas sobre as ferramentas, como as tochas de soldagem, devem ser registradas e a posição do *Tool Center Point* (TCP) deve ser definida. Um esquemático com as coordenadas do flange e da tocha pode ser visualizado na Figura 7.16.

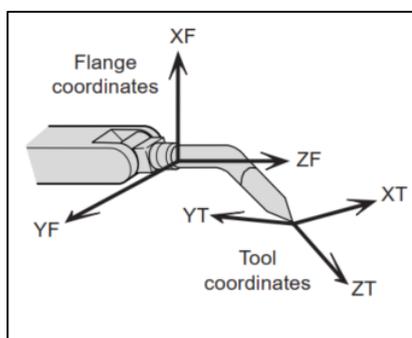


Figura 7.16 – Coordenadas do Flange e da Tocha [41].

A Calibração de Ferramenta é uma função presente no software do manipulador e permite que as informações dimensionais da tocha sejam obtidas e registradas com certa facilidade e precisão. Quando esta função é usada, as coordenadas do TCP são automaticamente calculadas e registradas em um arquivo relativo a tocha em questão. O procedimento de Calibração de Ferramenta obtém não só as coordenadas do TCP, mas também os dados da postura da tocha em relação as coordenadas do flange.

Há três métodos para a calibração da tocha e a seleção é realizada através do **Parâmetro S2C432**. Se para este parâmetro for atribuído valor 0, a função Calibração de Ferramenta obterá somente informações sobre a posição do TCP (X, Y e Z), sendo necessário a marcação de cinco

diferentes posturas no mesmo ponto do espaço. Se o valor 1 é atribuído a este parâmetro, somente a orientação (Rx, Ry e Rz) da TCP será obtida, sendo necessário a marcação de apenas uma postura. Mas se o valor 2 é atribuído a este parâmetro, a função Calibração de Ferramenta obterá tanto a posição quanto a postura da tocha acoplada ao flange e também é necessário a marcação de cinco posturas diferentes sobre o mesmo ponto.

Como mencionado, um ponto fixo no espaço deve ser adotado⁶ e deve-se realizar a marcação sobre este mesmo ponto utilizando cinco posturas diferentes do manipulador. As dimensões e a orientação da tocha são automaticamente calculadas pelo software do manipulador com base nestas marcações. As posturas devem ser arbitrárias e aleatórias, mas a precisão pode diminuir se as rotações de postura forem sempre para a mesma direção [41], ou seja, quanto mais aleatórias forem as posturas, melhor. Um esquemático das marcações é exibido na Figura 7.17.

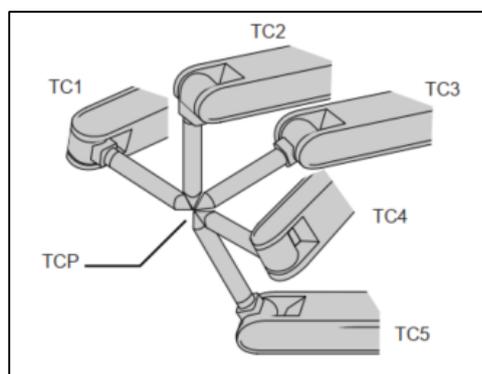


Figura 7.17 – Marcação de cinco posturas para Calibração de Ferramenta [41].

Um detalhe importante que deve ser ressaltado é que a postura da tocha é definida baseada somente na primeira postura registrada (TC1) e não depende das outras quatro. Isto fornece uma maior liberdade aos operadores na orientação desejada para a TCP assim como no esquemático da Figura 7.17, no qual a direção do eixo-Z da coordenada da TCP definida não será no sentido tradicional para baixo. Por outro lado, para que a posição da TCP seja calculada, todos os 5 pontos são considerados. Caso seja impossível para o operador realizar a marcação da primeira postura (TC1) na orientação desejada para a TCP devido a alguma limitação da célula ou área de trabalho, todas as cinco posturas podem ser registradas normalmente com o Parâmetro S2C432 em valor 0 ou 2 e, após a finalização do procedimento, o valor do Parâmetro S2C432 alterado para 1 e a marcação da primeira postura (TC1) realizada em qualquer outro ponto que seja possível no espaço.

⁶ Uma boa prática é utilizar uma morsa para fixar um eletrodo TIG afiado, sendo a ponta do eletrodo o ponto de referência.

É uma boa prática checar toda calibração realizada antes de iniciar os experimentos de soldagem com a tocha desejada. Deve-se atentar para o fato de que a utilização de movimentos lineares não é capaz de revelar uma calibração mal realizada, pois a ferramenta se torna apenas uma extensão do último eixo e todos os pontos de um mesmo eixo se movem igual em movimentos lineares. Porém se o movimento for circular ou rotacional, o algoritmo do controle cinemático do manipulador deve possuir a informação exata do deslocamento da TCP em relação ao flange. Portanto, um procedimento de checar a calibração realizada pode ser rotacionar o manipulador utilizando as teclas Rx, Ry e Rz do *Teach Pendant* ou, como sugerido por [41], rotacionar apenas os eixos R, B e T. Em ambas formas de verificação, o *Tool Center Point* (TCP) não pode se afastar do ponto original, assim como em (a) na Figura 2.31. Já para um procedimento de Calibração de Ferramenta mal realizado, a TCP se afasta proporcionalmente a qualidade da calibração, como em (b) na Figura 7.18.

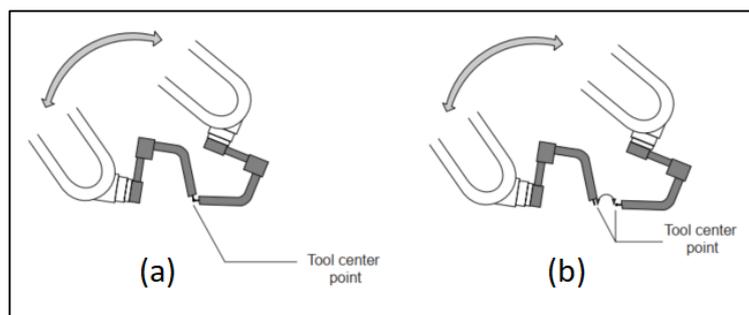


Figura 7.18 – *Teach Pendant* do controlador DX100 da Motoman [41].

Maiores informações sobre a função Calibração de Ferramenta pode ser encontrada na Seção 8.3.2 de [41].

APÊNDICE C – LINGUAGEM INFORM III (YASKAWA)

Os movimentos do manipulador utilizado neste trabalho são programados através de uma linguagem desenvolvida pela própria Motoman chamada INFORM III. Pode-se dizer que esta linguagem se assemelha a uma mistura de Código G (utilizada em máquinas CNC) com Assembly (linguagem de baixo nível utilizada em microcontroladores). É uma linguagem interpretada, ou seja, não é necessário compilar e os comandos são executados em tempo real. Estes comandos são compostos de Instrução e Itens Adicionais, como exibidos na Figura 7.19.

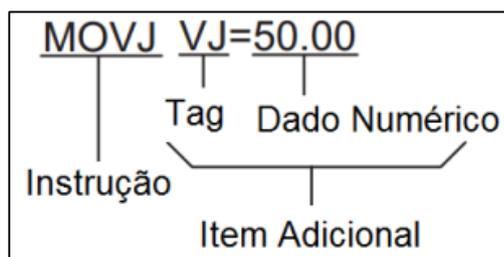


Figura 7.19 – Estrutura de uma Linha de Comando em INFORM III.

A Instrução é usada para executar o movimento ou o processamento de acordo com o desejado pelo programador. As Instruções de movimento se constituem de apenas 4, sendo elas: MOVL (linear), MOVJ (joints), MOVC (circular) e MOVS (spline). Já as Instruções de processamento de informações podem ser diversas como, por exemplo, operações aritméticas ou matriciais, de temporização, de condição e de leitura ou escrita nas portas digitais. As instruções são divididas de acordo com o exibido na Tabela 7.1.

Tabela 7.1– Divisões das Instruções da Linguagem INFORM III.

Type	Content	Instruction Example
I/O Instruction	It is the instruction used to control the I/O.	DOUT, WAIT
Control Instruction	It is the instruction used to control the processing and operation.	JUMP, TIMER
Operating Instruction	It is the instruction by which the variables, etc. are used and operated.	ADD, SET
Move Instruction	It is an instruction concerning the movement and the speed.	MOVJ, REFP
Shift Instruction	It is an instruction used when a present teaching position is shifted.	SFTON, SFTOF
Instruction which adheres to instruction	It is an instruction which adheres to the instruction.	IF, UNTIL
Work Instruction	It is an instruction concerning work, such as arc welding and handling.	ARCON, WVON
Optional Instruction	It is an instruction concerning optional functions. It can only be used when the function is available.	-

O Item Adicional é inserido de acordo com o tipo de instrução e com a necessidade. Alguns exemplos destes itens adicionais são velocidade de movimento, nível de precisão e variáveis diversas. Dentre as variáveis existentes no Controlador DX100, as Variáveis de Usuário merecem atenção especial devido ao escopo deste desenvolvimento e serão detalhadas a seguir.

Variáveis de Usuário são variáveis disponíveis no Controlador DX100 para auxiliar a programação das lógicas desejadas. Diferentemente das Variáveis do Sistema, que representam estados em que o sistema se encontra e não permitem alteração por Software, Variáveis de Usuários permitem mudanças de seus valores de acordo com o desejado pelo usuário. Ou seja, enquanto Variáveis do Sistema permitem somente leitura as Variáveis de Usuários permitem tanto escrita quanto leitura.

Variáveis de Usuários geralmente são utilizadas para armazenar contadores, resultado de cálculos e valores de sinais de entrada. São essenciais em operações onde é importante controlar o número de peças, o número de vezes que o programa já foi executado e para executar troca de informações entre programas distintos. A tabela com os tipos de Variáveis de Usuário disponíveis pode ser visualizada na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Variáveis de Usuário disponíveis no DX100.

Data Format	Variable No. (pcs)	Functions
Byte Type	B000 to B099 (100)	Range of storable values is from 0 to 255. Can store I/O status. Can perform logical operations (AND, OR, etc.)
Integer Type	I000 to I099 (100)	Range of storable values is from -32768 to 32767.
Double Precision Integer Type	D000 to D099 (100)	Range of storable values is from -2147483648 to 2147483647.
Real Type	R000 to R099 (100)	Range of storable values is from -3.4E+38 to 3.4E38. Accuracy: $1.18E-38 < x \leq 3.4E38$
Character Type	S000 to S099 (100)	Maximum storable number of characters is 16.
Position Type	P000 to P127 (128)	Can store position data in pulse form or in XYZ form. XYZ type variable can be used as target position data for move instructions, and as incremental values for parallel shift instructions.
	BP000 to BP127 (128)	
	EX000 to EX127 (128)	

Dentre as Variáveis de Usuário disponíveis no Controlador DX100, as Variáveis de Posição merecem destaque neste documento por permitirem que a programação da manufatura de uma peça seja toda realizada em um computador, testada e, somente então, enviada ao robô. As Variáveis de Usuário do tipo “de Posição” devem ser destacadas nesse relatório devido ao fato de permitirem o armazenamento de informações que representam pontos no espaço para os quais a TCP do manipulador pode ser enviada. Em poucas palavras, Variáveis de Posição armazenam informações que representam posições no espaço. Este tipo de variável permite uma forma de programar mais flexível onde não existe a necessidade de fisicamente mover o manipulador até cada um dos pontos para realizar a marcação, como normalmente é realizado em programação on-line em modo *teaching*.

As variáveis de posição podem ser de dois tipos: Pulsos ou Coordenadas Cartesianas. Variáveis de Posição do tipo Pulsos possuem campos denominados como S, L, U, R, B e T. Cada um destes campos representa um eixo do robô e seus valores representam o valor do contador de pulsos do *encoder* absoluto correspondente ao motor específico daquele eixo. A visualização destes campos pode ser observada na Figura 7.20.



Figura 7.20 – Registro de uma Variável de Posição em modo Pulso.

Os campos relativos a cada um dos eixos podem ser preenchidos manualmente pelo usuário. Uma outra forma de preenchimento destes campos é pressionando as teclas “*Modify+ENTER*”. Desta maneira, os campos são preenchidos automaticamente com valores que representam a posição na qual o manipulador se encontra no momento.

Como dito, Variáveis de Posição do tipo Pulso servem para armazenar informações que representam pontos no espaço. Porém, visualizar o local no espaço que a combinação do giro de cada um dos seis eixos representa é uma tarefa árdua e formidável para os humanos. Esta forma de armazenagem de informação é mais útil para aplicações que exigem rotações de apenas algum eixo em específico como, por exemplo, movimentação de cargas em uma esteira rolante. Desta forma, para aplicações de manufatura aditiva, o usual é que se use Variáveis de Posição do tipo Coordenada Cartesiana.

Os campos das Variáveis de Posição do tipo Coordenadas Cartesianas, que podem ser visualizados na Figura 7.21, são bem mais amigáveis aos humanos por utilizarem um tipo de coordenadas ao qual estamos mais habituados. Os três primeiros campos representam a distância em relação a origem que o ponto representado se encontra e os três últimos representam o nível de inclinação da TCP relativo a cada um dos planos – X, Y ou Z.



Figura 7.21– Registro de uma Variável de Posição do tipo Cartesiano.

Os Compiladores de Trajetórias desenvolvidos no LABSOLDA e utilizados no desenvolvimento deste trabalho utilizaram exclusivamente Variáveis de Posição do tipo Coordenadas Cartesianas pelos motivos expostos acima.

As Instruções disponíveis na linguagem INFORM III, expostas no início deste capítulo, formam linhas de comandos que quando combinadas com Variáveis, expostas na seção anterior,

“/JOB”, considerada como a de enunciação do *Job* e, portanto, de primeiro nível, simplesmente define que o arquivo é um *Job* a ser executado pelo manipulador. Já a segunda linha, “//NAME <JOB NAME>”, define o nome do *Job* em questão e “<JOB NAME>” deve ser substituído por nome de até 8 caracteres.

O comando presente na terceira linha, “//POS”, anuncia que as próximas linhas serão informações relacionadas a posições. Dessa maneira, o comando presente na quarta linha, “//NPOS 2,0,0,4,0,0”, além de possuir três barras para indicar que está relacionada a instrução que possui duas barras logo acima (Posição) possuem números que representam a quantidade de posições de cada tipo presente no algoritmo propriamente dito. O formato padrão pode ser entendido por “//NPOS <C>,<BC>,<EC>,<P>,<BP>,<EX>”, onde <C> deve ser substituído pelo número de posições inseridas por modo *Teaching*. Já <BC> deve ser substituído pelo número de posições da base quando o manipulador é instalado sobre uma base móvel. Já <EC> é relacionado ao número de posições relativas a mesa com dois graus de liberdade, inseridas também por modo *Teaching*. Os campos <P>, <BP> e <EX> representam, respectivamente, o número de posições do manipulador, da base móvel (caso houver) e da mesa com dois graus de liberdade inseridas através da utilização de Variáveis de Posição.

O comando presente na quinta linha, “//TOOL 0” indica o número da ferramenta configurada em qual as posições citadas estão baseadas. Em seguida, o comando “//POSTYPE PULSE” presente na sexta linha, indica que serão definidas as posições inseridas por modo *Teaching*. Como é possível observar nas linhas 8 e 9, estas variáveis inseridas por modo *Teaching* utilizam valores relativos ao número de pulsos do encoder absoluto do motor de cada um dos eixos.

O comando “//USER 1”, na décima linha, define qual será o Sistema de Coordenadas de Usuário que estará selecionado ao se iniciar o *Job*. Em seguida, o comando “//POSTYPE BASE” indica que serão anunciadas Variáveis de Usuário referenciadas a base do robô e o comando “//RECTAN” indica que o sistema de coordenadas é o cartesiano, considerando que o sistema de coordenadas polares também poderia ser usado. O comando “//RCONF” representa informações sobre a postura do manipulador como Flip ou No-Flip, Upper Arm ou Lower Arm, Front ou Rear e se os eixos R, S e T estão com ângulo maior ou menos do que 180°. Maiores informações sobre esta configuração de postura podem ser encontradas em [41], mas na dúvida é possível deixá-la por padrão assim como está na imagem.

Em seguida, o comando da linha 18, “//INST”, anuncia que uma nova categoria de informações será configurada – atentar para o uso de duas barras e não mais três. Estas informações se constituem da data e horário de criação do *Job* em questão e, em seguida, os atributos

relacionados a este *Job*, que podem compreender “SC” (Save Complete) que o autor desta dissertação não sabe direito o que faz, mas imagina seja para indicar que o *Job* continue em memória após a execução e “RW”, que significa que a leitura (*Reading*) e escrita (*Writing*) estão permitidas para operador. Por fim, a última linha do cabeçalho, “///GROUP1 RB1”, define o grupo sobre o qual as configurações realizadas estão baseadas, sendo que, no caso do exemplo, o grupo é formado apenas pelo manipulador (RB1). Na configuração deste manipulador presente no LABSOLDA, a inclusão da mesa com dois graus de liberdade (ST1) poderia ser incluída neste grupo caso a pesquisa esteja relacionada a inclinação ou rotação da base.

A não inclusão ou a inclusão de cabeçalhos que não condizem com o algoritmo que o acompanha resultará em erro durante o upload do arquivo para o controlador DX100 através de uma pendrive. Um guia com maiores detalhes sobre a estrutura do cabeçalho juntamente com a exposição de maiores opções de configurações está presente no Anexo 1 deste documento.

ANEXO I – ESTRUTURA DOS PROGRAMAS INFORM III

- JOB DATA FORMAT

When a relative job is output via the YASNAC FC1 or FC2 or by data transmission, the output file contents are as follows:

```
FILE NAME .JBI
/JOB
//NAME <JOB NAME>
//POS
///NPOS <C>,<BC>,<EC>,<P>,<BP>,<EX>
///USER <N>
///TOOL <N>
///POSTYPE <T>
///RECTAN
///RCONF <l>,<m>,<n>,<o>,<p>,<q>
Cxxxx =X,Y,Z,Rx,Ry,Rz
BCxxx=X0,Y0,Z0
ECxxx=1,2
//INST
///DATE <YYYY>/<MM>/<DD> <HH>:<TT>
///COMM <COMMENT CHARACTER LINE>
///ATTR <ATTRIBUTE 1>,<ATTRIBUTE 2>,<ATTRIBUTE 16>
//FRAME <C>
///GROUP1 <m1>,<m2>,<m3>
///GROUP2 <m1>,<m2>,<m3>
NOP
MOVJ Cxxx BCxxx ECxxx VJ=xxx.x
END
```

A pseudo instruction is distinguished by a single slash (/) at its beginning. Each level of individual instructions are marked with a double slash (//), a triple slash (///), and a fourfold slash (////). A pseudo instruction related to the job is made as follows:

JOB NAME
 POS
 INST
 NPOS
 USER
 TOOL
 POSTYPE
 PULSE
 RECTAN
 RCONF
 DATE
 COMM
 ATTR
 FRAME
 GROUP1
 GROUP2
 LVAR

JOB

Function : Shows that it is a job.
 Format : /JOB

NAME

Function : Represents the job name.
 Format : //NAME <Name>
 <Name> : up to 8 characters

POS

Function : Represents the position data.
 Format : //POS

NPOS

Function : Represents the number of position data items.
 Format : ///NPOS <C>,<BC>,<EC>,<P>,<BP>,<EX>
 <C> : Number of robot axis teaching positions
 <BC> : Number of base axis teaching positions
 <EC> : Number of external (station) axis teaching positions
 <P> : Number of robot axis position variables
 <BP> : Number of base axis position variables
 <EX> : Number of external (station) axis position variables

USER

Function : Represents the currently selected user coordinate system No.
 Format : ///USER <N>
 <N> : User coordinate system No.(0 to 23)

TOOL

Function : Represents the currently selected tool No.
 Format : ///TOOL <N>
 <N> : Tool No.(0 to 23)

POSTYPE

Function : Represents the position data type.
 Format : ///POSTYPE<T>
 <T> : |PULSE||BASE||ROBOT||TOOL||USER||MTOOL|
 <PULSE> : Pulse data
 <BASE> : Cartesian data, base coordinate system
 <ROBOT> : Cartesian data, robot coordinate system
 <TOOL> : Cartesian data, tool coordinate system
 <USER> : Cartesian data, user coordinate system
 <MTOOL> : Cartesian data, master tool coordinate system

PULSE

Function : Represents that pulse data is defined during and after this pseudo instruction.
 Format : ///PULSE
 <Pulse data> : <C>|<BC>|<EC>|<P>|<BP>|<EX>
 <C> : <Cxxxx>=<S>,<L>,<U>,<R>,,<T>,<E1>,<E2>
 <BC> : <BCxxxx>=<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<E1>,<E2>
 <EC> : <ECxxxx>=<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<E1>,<E2>
 <P> : <Pxxx>=<S>,<L>,<U>,<R>,,<T>,<E1>,<E2>
 <BP> : <BPxxx>=<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<E1>,<E2>
 <EX> : <EXxxx>=<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<E1>,<E2>
 <Cxxxx> : Robot axis teaching position
 <BCxxxx> : Base axis teaching position
 <ECxxxx> : External (station) axis teaching position

<Pxxx>: Robot axis position variables
 <BPxxx>: Base axis position variables
 <EXxxx>: External (station) axis position variables
 <S>: S-axis pulse data
 <L>: L-axis pulse data
 <U>: U-axis pulse data
 <R>: R-axis pulse data
 : B-axis pulse data
 <T>: T-axis pulse data
 <E1>: Not used
 <E2>: Not used
 xxxx := A number from 0 to 999

RECTAN

Function : Represents that Cartesian data is defined during and after this pseudo instruction.

Format : ///RECTAN

<Cartesian data>: <C>|<BC>|<P>|<BP>
 <C> : <Cxxxx> = <X>,<Y>,<Z>,<Rx>,<Ry>,<Rz>
 <BC>: <BCxxxx> = <1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>
 <P> : <Pxxx> = <X>,<Y>,<Z>,<Rx>,<Ry>,<Rz>
 <BP>: <BPxxx> = <1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>
 <Cxxxx> : Robot axis teaching position
 <BCxxxx>: Base axis teaching position
 <Pxxx> : Robot axis position variables
 <BPxxx> : Base axis position variables
 <X> : X-axis Cartesian data
 <Y> : Y-axis Cartesian data
 <Z> : Z-axis Cartesian data
 <Rx> : Rx-axis Cartesian data
 <Ry> : Ry-axis Cartesian data
 <Rz> : Rz-axis Cartesian data

RCONF

Function : Represents the manipulator type of the Cartesian data defined during and after this pseudo instruction.

Format : ///RCONF <l>,<m>,<n>,<o>,<p>,<q>

<l>: 0: Flip, 1: No-flip
 <m>: 0: Upper arm, 1: Lower arm
 <n>: 0: Front, 1: Rear
 <o>: 0: R < 180, 1: R >= 180
 <p>: 0: T < 180, 1: T >= 180
 <q>: 0: S < 180, 1: S >= 180

INST

Function : Represents that it is an instruction.

Format : ///INST

DATE

Function : Represents the date.

Format : ///DATE <YYYY>/<MM>/<DD> <HH>:<TT>

<YYYY>: Year
 <MM>: Month
 <DD>: Day
 <HH>: Hour
 <TT>: Minute

COMM

Function : Represents that it is a job comment.

Format : ///COMM <Comment character line>

<Comment character line> : Up to 32 characters

ATTR

Function : Represents the job attribute.

Format : ///ATTR <Attribute 1>,<Attribute 2>,,<Attribute 16>

<Attribute>: JD|DD|SC|{RO|WO|RW}|RJ

<JD>: Job Destroy
 <DD>: Directory Destroy
 <SC>: Save Complete
 {RO|WO|RW}
 <RO>: Writing disabled "Edit-lock"(Read Only)
 <WO>: Reading disabled(Write Only)
 <RW>: Reading/Writing capable(Read/Write)
 <RJ>: Relative job

FRAME

Function : Represents relative job teaching coordinate system.

Format : ///FRAME <C>

<C>: BASE|ROBOT|N|
 <N>: User coordinate system No.(1 to 24)
 <BASE>: Base coordinate system(Cartesian)
 <ROBOT>: Robot coordinate system(Cartesian)
 <USER>: User coordinate system(Cartesian)

GROUP1

Function : Represents 1st MOVE control group.
 Format : ///GROUP1 <m1>,<m2>,<m3>
 Add any of the following to<m1>,<m2>, and<m3>.
 RE1(robot 1)
 RE2(robot 2)
 BS1(base 1)
 BS2(base 2)
 ST1(station 1)
 ST2(station 2)

GROUP2

Function : Represents 2nd MOVE control group.
 Format : ///GROUP2 <m1>,<m2>,<m3>
 Add any of the following to<m1>,<m2>, and<m3>.
 RE1(robot 1)
 RE2(robot 2)
 BS1(base 1)
 BS2(base 2)
 ST1(station 1)
 ST2(station 2)

GROUP3

Function : Represents 3rd MOVE control group.
 Format : ///GROUP3 <m1>,<m2>,<m3>
 Add any of the following to<m1>,<m2>, and<m3>.
 RE1(robot 1)
 RE2(robot 2)
 BS1(base 1)
 BS2(base 2)
 ST1(station 1)
 ST2(station 2)

LVARs

Function : Represents the number of local variables.
 Format : ///LVARs <LB>,,<LD>,<LR>,<LS>,<LP>,<LBP>,<LEX>
 <LB>: Number of byte type local variables
 : Number of integer type local variables
 <LD>: Number of double-precision type local variables
 <LR>: Number of real number type local variables
 <LS>: Number of character type local variables
 <LP>: Number of robot axis position type local variables
 <LBP>: Number of base axis position type local variables
 <LEX>: Number of external (station) axis position type local variables