

HENRIQUE NARDON FERRARESI

CUSTO E QUALIDADE DE FABRICAÇÃO DE UM
FLANGE EM AÇO CARBONO VIA MANUFATURA
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2023

HENRIQUE NARDON FERRARESIS

CUSTO E QUALIDADE DE FABRICAÇÃO DE UM FLANGE EM AÇO CARBONO VIA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ruham Pablo Reis

UBERLÂNDIA-MG
2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F374 Ferraresi, Henrique Nardon, 1991-
2023 CUSTO E QUALIDADE DE FABRICAÇÃO DE UM FLANGE EM AÇO
CARBONO VIA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
[recurso eletrônico] / Henrique Nardon Ferraresi. -
2023.

Orientador: Ruham Pablo Reis.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.426>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Reis, Ruham Pablo, 1979-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-
graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 360, PPGEM				
Data:	28/07/2023	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	11823EMC015				
Nome do Discente:	Henrique Nardon Ferraresi				
Título do Trabalho:	CUSTO E QUALIDADE DE FABRICAÇÃO DE UM FLANGE EM AÇO CARBONO VIA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco (MASA) para a Fabricação de Componentes de Simples, Média e Alta Complexidade Utilizados no Setor de óleo, Gás e Biocombustíveis"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU; Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU; Alexandre Queiroz Bracarense - UFMG; Eduardo de Magalhães Braga - UFPA; e Ruham Pablo Reis - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Ruham Pablo Reis, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ruham Pablo Reisz, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2023, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2023, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/07/2023, às 11:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Magalhães Braga, Usuário Externo**, em 28/07/2023, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Usuário Externo**, em 28/07/2023, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4661167** e o código CRC **498411EC**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

À Petrobras pelo financiamento de todo o material através do projeto “Aplicabilidade da Manufatura Aditiva por Soldagem a Arco (MASA) para a Fabricação de Componentes de Simples, Média e Alta Complexidade Utilizados no Setor de óleo, Gás e Biocombustíveis”, Processo 2019/00123-1

Ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, pela amizade, ensinamentos e confiança em trabalhar ao seu lado durante três anos de projeto, atuando como pesquisador.

Ao meu orientador, Prof. Ruham Pablo Reis, pela amizade, orientação e ensinamentos ao longo desses anos de realização deste trabalho.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Processamento a Laser por me conceder horas de trabalho para me dedicar a conclusão deste trabalho.

Ao meu Pai, Prof. Valtair Antônio Ferraresi, pelos ensinamentos ao longo de toda a vida e pela ajuda na orientação e revisão deste trabalho.

A minha esposa Tatiane Santana e ao meu filho Pedro pelo apoio, carinho e paciência que tiveram para a realização deste trabalho.

E aos amigos e amigas do curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e do Laprosolda-UFU, especialmente a Diandro Bailoni Fernandes, Lucas Alves do Nascimento, Edmundo Benedetti Filho e Victor Eduardo Silva Alves.

FERRARESI, H. N. **CUSTO E QUALIDADE DE FABRICAÇÃO DE UM FLANGE EM AÇO CARBONO VIA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**. 2023. 178 p. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

A Manufatura Aditiva (MA) por Deposição com Energia Direcionada (*DED*) está entre as tecnologias mais maduras e comercialmente disponível para fabricação de componentes metálicos funcionais. O processo *Gas Metal Arc (GMA-DED)*, que utiliza as fontes de soldagem, possuem altas taxas de deposição, baixo custo de equipamento e insumos e com boa diversidade de materiais ante os processos de MA com pó. Por essas razões, a aplicação do *GMA-DED* se expandiu para o setor de óleo e gás (O&G) se destacando como uma tecnologia capaz de oferecer maior flexibilidade e agilidade na reposição dos estoques, especialmente para aqueles componentes de baixa movimentação, média complexidade e de grandes dimensões. Neste sentido vários órgãos reguladores ligados ao segmento têm criado padrões rigorosos para garantir a integridade desses componentes em serviço, entretanto a relação entre o tempo, o custo, a qualidade e a certificação desses componentes ainda são bastante desconhecidas. O objetivo é analisar os custos e a qualidade na fabricação de flanges de pescoço via manufatura aditiva *GMA-DED* em um cenário de reposição de peças sob demanda. A pesquisa foi conduzida visando uma aplicação real, buscou-se ao máximo atender os requisitos para a certificação do flange via *GMA-DED*, para isso foram analisadas as 3 principais normas para este caso, que são: *AWS D20.1*; *ASME B16.5*; e *ASTM 182*. Baseado nos requisitos normativos, desenvolveu-se inicialmente uma metodologia de fabricação para avaliar as atividades envolvidas, o tempo de fabricação, os recursos utilizados, as propriedades químicas e mecânicas do material, a robustez do processo e, principalmente, atestar a real possibilidade de aplicação do componente. A metodologia foi desenvolvida baseada na deposição de três flanges de pescoço com o arame ER90S-B3, variando dois processos *GMA-DED*, dois equipamentos de deposição, com e sem gerenciamento térmico, três trajetórias de deposição e com e sem tratamento térmico. Por fim, levantou-se os custos de produção pelo método de custeio pleno, estimou o preço de venda pelo *markup* e comparou-se com o preço de venda de um flange convencional. Conclui-se que o flange depositado via *GMA-DED* possui qualidade suficiente para ser utilizado em serviço. O preço estimado pela fabricação via *GMA-DED* ficou entre 5 à 10 vezes mais caro que um convencional, entretanto, a reposição deste componente pode ser dezenas de vezes mais rápida.

Palavras Chaves: Manufatura Aditiva, GMA-DED, Sobressalentes, Flange, Óleo & Gás, Custos, Preço.

FERRARESI, H. N. **COST AND QUALITY OF FABRICATION OF A CARBON STEEL FLANGE VIA ARC ADDITIVE MANUFACTURING.** 2023. 178 p. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Additive Manufacturing (*AM*) by Directed Energy Deposition (*DED*) is among the most mature technologies commercially available for manufacturing functional metal components. The *GMA-DED* process, that uses the welding sources, offers high deposition rates, low equipment and input costs, and a wide range of materials compared to powder-based AM processes. For these reasons, the application of *GMA-DED* has expanded to the oil and gas (O&G) sector, standing out as a technology capable of providing greater flexibility and agility in replenishing inventories, especially for low-movement, medium-complexity, and large components. In the same direction, several regulatory bodies associated with the industry have established rigorous standards to ensure the integrity of these components in service. However, the relationship between time, cost, quality, and certification of these components is still largely unknown. The objective is to analyze the costs and quality in the manufacturing of neck flanges using *GMA-DED* additive manufacturing in an on-demand parts replacement scenario. The research was conducted with a focus on real-case application, and therefore, the maximum effort was made to meet the requirements for *GMA-DED* flange certification. To achieve this, the three main standards for this case were analyzed: *AWS D20.1*, *ASME B16.5*, and *ASTM 182*. Based on the regulatory requirements, an initial manufacturing methodology was developed to evaluate the activities involved, manufacturing time, resources used, chemical and mechanical properties of the material, process robustness, and, most importantly, to confirm the actual feasibility of applying the component. The methodology was developed based on the deposition of three neck flanges using ER90S-B3 wire, varying between two *GMA-DED* processes, two deposition equipment, with and without thermal management, three deposition paths, and with and without heat treatment. Finally, based on the methodology, production costs were determined using full costing, the selling price was estimated using a markup, and a comparison was made with the selling price of a conventional flange. It was concluded that the *GMA-DED* deposited flange has sufficient quality for use in service. The estimated price for *GMA-DED* manufacturing was found to be 5 to 10 times more expensive than conventional methods. However, depending on the scenario, the replacement of this component can be dozens of times faster.

Keywords: Additive Manufacturing, GMA-DED, Spare Parts, Flange, Oil & Gas, Costs, Price.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Classificação dos processos de manufatura rápida (adaptado de KARUNAKARAN <i>et al.</i> , 2012).....	2
Figura 2.2 - Relação entre taxa de deposição e resolução em processos de manufatura aditiva para metais (adaptado de TREUTLER; WESLING, 2021).....	3
Figura 2.3 - Ciclo de Hype da tecnologia da MA (adaptado de Valdiveiso, 2019).....	4
Figura 2.4 – Comparação dos custos de injeção por molde por diversos processos de MA (HOPKINSON; DICKENS, 2003).....	5
Figura 3.1 – Fluxograma da revisão bibliográfica	7
Figura 3.2 - Classificação dos processos de MA em sete grandes categorias segundo a norma <i>ISO/ASTM 52900:2018</i> (Fonte: HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2020).....	8
Figura 3.3 - Classificação dos processos de MA de única etapa aplicáveis a materiais metálicos segundo a norma ABNT NBR/ <i>ISO/ASTM 52900:2018</i>	9
Figura 3.4 - Classificação dos processos de manufatura aditiva aplicados em metais sob suas diferentes formas de fornecimento (AMPOWER, 2019)	10
Figura 3.5 - Classificação dos processos DED (adaptado de DASS E MORIDI, 2019)	13
Figura 3.6 - Classificação dos processos DED de acordo com o tipo de material e fonte de energia (Adaptado de ABNT NBR/ <i>ISO/ASTM 52900:2018</i>).....	13
Figura 3.7 - Transferência pulsada (NORRISH, 1992 apud VILARINHO, 2000).....	18
Figura 3.8– Desenho Técnico do Flange NPS 2 – classe 300.....	31
Figura 3.9 - Modelo simplificado do balanço de calor para uma típica deposição de material por <i>DED</i> , onde: Q_{cond} = condução de calor; Q_{conv} = calor de convecção; Q_{rad} = radiação térmica (adaptado de DA SILVA <i>et al.</i> ,2020)	34
Figura 3.10 - Evolução do acúmulo de calor e da temperatura de interpasse com a deposição das camadas em <i>GTA-DED</i> (adaptado de WU <i>et al.</i> , 2017).....	35
Figura 3.11 - Comportamento dos ciclos térmicos em três camadas consecutivas durante um processo <i>DED</i> (adaptado de DASS, MORIDI, 2019)	35
Figura 3.12 - Temperatura média de interpasse à frente da poça e perfil geométrico de paredes de liga de alumínio obtidas com <i>GMA-DED</i> sob pirometria infravermelha com	

abordagens de temperatura de interpasse controladas e não controladas (Da SILVA <i>et al.</i> , 2019)	36
.....	
Figura 3.13 - Comparação de temperatura entre camadas para o processo <i>GMA-DED</i> com (a) <i>CMT</i> ; e (b) <i>CMT-Pulsado</i> (DA SILVA, 2019).....	39
Figura 3.14 - Gerenciamento térmico com bloco de extração ou imposição de calor, com circulação interna de fluido ao redor de aletas acoplado à plataforma de construção para utilização em manufatura aditiva a arco (PATENTE US7326377B2, 2005).....	41
Figura 3.15 - Montagem esquemática básica para funcionamento da técnica de resfriamento ativo por quase-imersão para manufatura aditiva (PATENTE BR1020180153145)	41
.....	
Figura 3.16 - Secção transversal e longitudinal da representação da distribuição de temperatura em pré-forma simples (parede com camadas de passe único de deposição) durante a manufatura aditiva com resfriamento ativo por quase-imersão (PATENTE BR1020180153145)	43
Figura 3.17 - Secção transversal e longitudinal da representação da distribuição de temperatura em pré-forma simples (parede com camadas de passe único de deposição) durante a manufatura aditiva com resfriamento convencional (natural) (PATENTE BR1020180153145)	43
.....	
Figura 3.18 - Secção transversal e longitudinal da representação da distribuição de temperatura em pré-forma simples (parede com camadas de passe único de deposição) durante a manufatura aditiva com resfriamento passivo/indireto (da plataforma de construção e/ou substrato) (PATENTE BR1020180153145).....	43
Figura 3.19 - Imagens termográficas obtidas de pré-formas ao final da construção (logo após extinção do arco elétrico) com abordagens de resfriamento Natural, Passivo e <i>NIAC</i> (resfriamento ativo por quase-imersão) (DA SILVA <i>et al.</i> , 2020).....	44
Figura 3.20 - Detalhes das discontinuidades tipicamente encontradas nas regiões de vale de ondulação lateral de pré-formas: (a) vista panorâmica de seção transversal de uma interface entre camadas; (b) microscopia ótica e (d) microscopia eletrônica de varredura, respectivamente, de imagens amplificadas de uma região demarcada da vista (a), onde (I) indica uma falta de coalescência entre as camadas; (c) amplificação de microscopia ótica de outra região demarcada da vista (a), (e) superampliação em microscopia ótica da vista (c) por (SCOTTI <i>et al.</i> , 2020):	46

Figura 3.21 - Classificação geral dos estoques (baseado SHENOY; ROSAS, 2018, p. 253).....	48
Figura 3.22 - Classificação das técnicas de estimativa de custos de produtos (NIAZI <i>et al.</i> , 2006).....	57
Figura 3.23 – Exemplo de como as etapas estão relacionadas com os departamentos (fonte: do autor).....	61
Figura 3.24 - Medidas de desempenho em MADA (adaptado de CUNNINGHAM <i>et al.</i> , 2018).....	65
Figura 3.25 - Representação das dimensões das larguras efetiva e largura total associadas à ondulação das superfícies laterais em MADA (MARTINA <i>et al.</i> , 2012)	66
Figura 3.26 - Ilustração das direções (de crescimento) da pré-forma comumente avaliadas em termos de propriedades mecânicas em MADA	68
Figura 3.27 - Desenho (esq.) e peça real fabricada por <i>DMLS</i> (dir.) (DENG; KENDALL; WAKEFIELD, 2018)	75
Figura 3.28 – A: grade original com barras circulares soldadas	75
Figura 3.29 – a) modelo <i>CAD</i> original e b) modelo <i>CAD</i> MA redesenhado e peça fabricada (BURNS; WANGENHEIM, 2019)	76
Figura 3.30 –a) desviador de fluxo fresado padrão e b) desviador de fluxo reprojetoado (BURNS; WANGENHEIM, 2019)	77
Figura 4.1 – Fluxograma da tese	80
Figura 4.2 – A) Fonte de deposição, <i>Fronius TransPuls Synergic 5000/MV</i> ; B) <i>Fronius CMT Advance VR 7000</i> (direita)	81
Figura 4.3 - Robô Motoman HP 20 com RAQI.....	82
Figura 4.4 – Módulo de gerenciamento térmico por RAQI instalado na bancada junto ao Robô	83
Figura 4.5 – Mesa de coordenadas <i>CNC</i> com eixos XYZW independentes.....	84
Figura 4.6 – Montagem esquemática da técnica RAQI utilizada em conjunto à mesa <i>CNC</i>	85
Figura 4.7 –Exemplo de dados de tensão e corrente adquiridos	86
Figura 4.8 – Dimensões do corpo de prova de tração	88
Figura 4.9 –Dimensões do corpo de prova de impacto	88
Figura 4.10 – Vista superior da metade do flange indicando a disposição dos corpos de prova de impacto e tração.....	89

Figura 5.1 – Etapas sequenciais de fabricação de um flange de pescoço via <i>GMA-DED</i> . 1) Modelagem 3D e definição do produto; 2) Geração do arquivo <i>STL</i> ; 3) Planejamento da trajetória de deposição; 4) Composição da linguagem de programação; 5) Deposição; 6) Pós processamentos; 7) Acabamento e inspeção	91
Figura 5.2 – Metodologia para a consolidação da trajetória	96
Figura 5.3 – Imagens dos pré-testes de trajetória do flange para o desenvolvimento de um padrão	97
Figura 5.4 – Imagem da deposição (base) do flange com o Robô e RAQI.....	100
Figura 5.5 – 4 Imagens do Flange 1 como depositado.....	101
Figura 5.6 – Vista em perspectiva e lateral da primeira camada espiral depositada, no sentido de A para B (esquerda); Vista em perspectiva e lateral do início da segunda camada, em vermelho de B para C (direita)	102
Figura 5.7 – Corrente média em função das várias medidas adquiridas durante a deposição da base do flange (cada 15 medidas correspondem a uma camada)	103
Figura 5.8 - Corrente média em função das várias medidas adquiridas durante a deposição do pescoço e do tubo (medição de 241 a 256 (pescoço) e de 256 a 273 (tubo))...	104
Figura 5.9 – Peça depositada fixada a Serra de fita (esquerda); Vista da seção do corte realizado para separação do metal depositado do substrato (direita)	105
Figura 5.10 - Exemplo de uma peça escovada fora da base de deposição.....	105
Figura 5.11 - Peça fixada ao torno para usinagem da base e da parte interna, criando a primeira superfície referência.....	106
Figura 5.12 – Reposicionamento da peça para a usinagem externa e bisel (esquerda) e exemplo de um flange torneado (direita).....	106
Figura 5.13 – (A) Flange usinado nas dimensões finais; (B) Falta de fusão entre os cordões laterais da espiral bidimensional da base; (C) ondulações e vazios visíveis; (D) vazios na parte interna do tubo, sugere-se falta de aderência entre as camadas da região mais interna.	107
Figura 5.14 - Macrografia da secção transversal do Flange 1 como depositada.....	109
Figura 5.16 - Macrografia para análise de microdureza (os pontos vermelhos enumerados indicam a ordem das indentações)	110
Figura 5.17 – Perfil de microdureza com 25 indentações igualmente espaçadas em 0,25 mm.....	111
Figura 5.18 - Microestrutura contemplando a região colunar e grosseira.....	112

Figura 5.19 – Região colunar ampliada – microestrutura formada por martensita e bainita	113
Figura 5.20 – Região grosseira ampliada – microestrutura predominantemente bainítica	113
Figura 5.21 – Diagrama de resfriamento contínuo para a aço <i>ASTM A182</i> grau F22 (COLPAERT, 2018).....	114
Figura 5.22 – Ensaio de tração de duas amostras do Flange 1 (como depositado) ...	114
Figura 5.23 – Imagens do aspecto da fratura dos dois corpos de prova de Charpy como depositadas com sua respectiva energia absorvida.....	115
Figura 5.24 – Rota de tratamento térmico adquirido: normalização (esquerda) e revenimento (direita)	116
Figura 5.25 – Face oposta do corpo de prova de Charpy da metade do Flange 1 tratada	116
Figura 5.26 – Perfil de microdureza do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido)	117
Figura 5.27 – Microestrutura da amostra do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido) numa escala de 500 μm	117
Figura 5.28 – Microestrutura da amostra do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido) numa escala de 200 μm	118
Figura 5.29 – Microestrutura da amostra do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido),.....	118
Figura 5.30 – Resultados dos ensaios de tração de duas amostras do Flange 1 como tratado	119
Figura 5.31 – Imagens do aspecto da fratura dos dois corpos de prova de Charpy como depositadas com sua respectiva energia absorvida.....	120
Figura 5.32 - Local de retirada das duas amostras do pré-teste de pescoço (esquerda); Amostra ‘A’ (sem tratamento) e Amostra ‘B’ (revenido a 675 °C por 1 h e 30 min) (direita)	121
Figura 5.33 – Amostra A com camadas evidentes, amostra B mais homogênea.....	121
Figura 5.34 – Perfil de microdureza da amostra ‘A’ como depositada.....	122
Figura 5.35 – Perfil de microdureza da amostra ‘B’ como tratado (somente revenido)	122
Figura 5.36 – Estratégia de deposição da base do Flange 2.....	123

Figura 5.37 – Face oposta do substrato de deposição (esquerda); Substrato de deposição fixado ao substrato de rigidez com as canaletas para baixo (direita)	124
Figura 5.38– Corrente média em função das camadas para o Flange 2	126
Figura 5.39 - Corrente média em função das várias medidas adquiridas durante a deposição do pescoço e do tubo com medição de 869 a 1069 (pescoço) e de 1070 a 1228 (tubo).	126
Figura 5.40 – 4 imagens do Flange 2 como depositado	127
Figura 5.41– Imagens do flange 2 como usinado.....	129
Figura 5.42 – Resultado do ensaio por líquido penetrante do Flange 2 em duas etapas, superior e inferior	130
Figura 5.43 – Imagem da 2ª camada da base do Flange 3	132
Figura 5.44 – Imagens da deposição do Flange 3	133
Figura 5.45 – Relação das etapas de fabricação com os departamentos produtivos...	136
Figura 5.46 – Cronograma de fabricação - tarefas em função das horas trabalhadas .	140
Figura 5.47 - Custo unitário do flange em função dos departamentos e recursos.....	147
Figura 5.47 – Participação de cada recurso na composição do custo unitário do flange	149
Figura 5.49 – Custo versus unidades produzidas	151
Figura 0.1 - Visão geral do protótipo original do sistema MADA com NIAC: (1) tanque de trabalho; (2) interruptor de flutuação (3) tocha CMT; (4) sistema de movimentação; (5) tanque de água pressurizada; (6) sistema hidráulico e pneumático; (7) controlador CNC; e (8) cortina de proteção (Silva, 2019).....	170
Figura 0.2 - Perspectiva do desenho do sistema de deposição e movimentação para retrofit.....	171
Figura 0.3 – Montagem esquemática da técnica RAQI utilizada em conjunto à mesa CNC	173
Figura 0.4 – Soldagem da cuba	174
Figura 0.5 – Montagem do pórtico superior.....	174
Figura 0.6 – Montagem dos atuadores do Eixo Y	174
Figura 0.7 – Montagem dos atuadores sobre o pórtico	174
Figura 0.8 – Alinhamento dos eixos.....	175
Figura 0.9 – Quadro de drivers e controladora.....	175
Figura 0.10 – montagem final dos atuadores	175

Figura 0.11 - Passagem dos cabos elétricos	175
Figura 0.12 – Furação da plataforma de construção	175
Figura 0.13 – Soldagem das travessas da plataforma de construção	175
Figura 0.14 – Sistema de recirculação de água por bomba.....	176
Figura 0.15 – Sistema de controle do nível de água (4º eixo).....	176
Figura 0.16 – Inserção de uma caneta para calibração.....	176
Figura 0.17 - Ilustração da precisão e da qualidade da trajetória.....	176
Figura 0.18 – Retrofit do equipamento de manufatura aditiva arco com 3 eixos concluído	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Descrição e abreviação dos processos <i>PBF</i> e <i>DED</i> segundo a norma <i>AWS D20.1:2019</i>	9
Tabela 2.2 - Taxas de deposição (m) relatadas para os diferentes processos <i>DED</i>	14
Tabela 2.2 - Taxas de deposição (m) relatadas para os diferentes processos <i>DED</i> (continuação)	15
Tabela 2.3 - Lista de normas para manufatura aditiva de cunho geral e específicas para tecnologias de deposição com energia direcionada	19
Tabela 2.4 - Requisitos de Inspeção e Teste para Qualificação de Máquina e Procedimento para <i>DED</i>	22
Tabela 2.5 - Requisitos de Inspeção e Teste para Componentes de produção para MADA	24
Tabela 2.6 - Variáveis de Qualificação para Processos de Deposição de Energia Dirigida	25
Tabela 2.6 - Variáveis de Qualificação para Processos de Deposição de Energia Dirigida (continuação)	26
Tabela 2.6 - Variáveis de Qualificação para Processos de Deposição de Energia Dirigida (continuação)	27
Tabela 2.7 – Critérios de aceitação em mm, sendo T a menor dimensão entre superfícies opostas através da descontinuidade	28
Tabela 2.8 – Tratamento térmico requerido para o material <i>ASTM 182 F22 Cl. 3</i>	32
Tabela 2.9 – Composição química para o material <i>ASTM 182 F22 Classe 3</i>	32
Tabela 2.10 – Propriedades mecânicas para o material <i>ASTM 182 F22 Cl. 3</i>	33
Tabela 2.11 - Tabela descritiva dos artigos que realizaram estudos e/ou materializaram peças de uso diretamente ligados à indústria Óleo & Gás, naval e <i>offshore</i>	77
Tabela 4.1 - Classificação do flange de estudo	79
Tabela 4.2 – Condições testadas	79
Tabela 5.1 – Estimativas do tempo gasto para a modelagem e definição do componente em função da dificuldade de acesso às informações	94
Tabela 4.2 – Tempo gasto no planejamento da trajetória	97
Tabela 4.3 – Envelope de parâmetros de deposição do Flange 1	99
Tabela 4.4 – Comparativo de composição química [%]	108

Tabela 4.5 - Informações de processo referente a cada flange.....	124
Tabela 4.6 – Comparativo de composição química [%]	128
Tabela 4.7 – Informação de deposição dos flanges 1, 2 e 3	131
Tabela 4.8 – Departamentos de serviço e de produção identificados para <i>GMA-DED</i> na fabricação de flanges	135
Tabela 4.9 – Informações do aluguel do prédio e área dos 10 departamentos (1 de serviço e 9 de produção)	137
Tabela 4.10 – Dados do flange de pescoço	137
Tabela 4.11 – Dados do arame, gás e substrato	137
Tabela 4.12 – Informações referentes à deposição	138
Tabela 4.13 – Informações referentes aos equipamentos, softwares, P&D, qualificações e normas.....	138
Tabela 4.14 – Informações da qualificação de máquina e procedimento segundo a <i>AWS D20.1</i>	139
Tabela 4.15 – Outros dados de entrada	139
Tabela 4.16 – Cronograma de fabricação.....	140
Tabela 4.17 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados	143
Tabela 4.17 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados (continuação).....	144
Tabela 4.17 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados (continuação).....	144
Tabela 4.18 – Resumo da Tabela 4.17 com custos do departamento em função dos recursos utilizados [R\$].....	145
Tabela 4.19 – Tabela de precificação do flange baseada nos custo de uma única peça	150
Tabela 4.20 - Tabela de precificação do flange baseada nos custos da 10ª peça.....	151

ABREVIATURAS

- 3DP** - Tridimensional print
ABC - Activity-based costing
AMPS - Additive Manufacturing Procedure Specification
API - American Petroleum Institute
APICS - American Production Inventory Control Society
ASME - American Society of Mechanical Engineers
ASTM - American Society for Testing and Materials 2319 Normas
AWS - American Welding Society
CAD - Computer Aided Design
CMT - Cold Metal Transfer
CNC - Computer Numeric Control
DED - Deposição com energia direcionada (termo geral)
DMLS - Direct Metal Laser Sintering
DNV - Det Norske Veritas
EB-DED - Electron Beam Directed Energy Deposition
EB-PBF - Electron Beam Powder Bed Fusion
EDM - Electro-Discharge Machining
FDM - Fused Deposition Modeling
FGM - Functionally Graded Material
GMA-DED - Gas Metal Arc Directed Energy Deposition
GTA-DED - Gas Tungsten Arc Directed Energy Deposition
HIP - Hot isostatic pressing
ISO - International Organization for Standardization
LAAM - Laser Aided Additive Manufacturing
LAPROSOLDA - Infraestrutura laboratorial e de pessoal especializado ao desenvolvimento de processos de soldagem e de manufatura aditiva (PD&I) da Universidade federal de Uberlândia (UFU)
L-DED - Laser Directed Energy Deposition
LENS - Laser Engineered Net Shaping – Optomec®, um processo L-DED com pó.
LMD - Laser Metal Deposition, um processo L-DED com pó.
L-PBF - Laser Powder Bed Fusion
MA ou AM - Manufatura Aditiva ou Aditive Manufacturing
MADA - Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MCDM - Multi-Criteria Decision Making
MQR - Machine Qualification Record
MRO - Manutenção, Reparo e Operação (MRO)
NIAC - Near-immersion active cooling
O&G - Óleo e Gás
PA-DED - Plasma Arc Directed Energy Deposition
PBF - Fusão em leito de pó (termo geral)
PQR - Procedure Qualification Record

RAQI - Resfriamento Ativo por Quase-Imersão

STL - *Stereolithography*

SLM - *Sintering Laser Melt,*

UPT - *Ultrasonic Peening Treatment*

WAAM - *Wire Arc Additive Manufacturing;*

WN - *Weld neck – Flange de pescoço*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	6
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA	7
2.1.1	<i>Tecnologias Avançadas de Manufatura Aditiva Com Metais</i>	10
2.1.2	<i>Processos por Deposição com Energia Direcionada - DED</i>	12
2.1.3	<i>Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) ou Arc Direct Energy Deposition (Arc-DED)</i>	15
2.2	PRINCIPAIS NORMAS APLICÁVEIS	18
2.3	REQUISITOS DE FABRICAÇÃO VIA <i>GMA-DED - AWS D20.1/D20.1M:2019</i>	21
2.3.1	<i>Qualificação de Procedimento, Operador e Máquina</i>	21
2.3.2	<i>Atividades do Engenheiro</i>	22
2.3.3	<i>Fabricação</i>	23
2.3.4	<i>Requalificação de Procedimento, Máquina ou Ambos</i>	25
2.3.5	<i>Critérios de Aceitação</i>	27
2.4	REQUISITOS DIMENSIONAIS – <i>ASME B16.5</i>	29
2.5	REQUISITOS DE MATERIAL – <i>ASTM A182</i>	32
2.6	O ACÚMULO DE CALOR E SUAS CONSEQUÊNCIAS	33
2.6.1	<i>O Acúmulo de Calor</i>	33
2.6.2	<i>Consequências do Acúmulo de Calor</i>	36
2.6.3	<i>Gerenciamento Térmico</i>	39
2.7	GESTÃO DE ESTOQUES	47
2.8	CUSTOS DE PRODUÇÃO	50
2.8.1	<i>Introdução a contabilidade de custos</i>	50
2.8.2	<i>Objeto de Custo, Produção por Processo e Produção por Encomenda</i>	51
2.8.3	<i>Conceitos da Contabilidade de Custos</i>	53
2.8.4	<i>Critérios de Avaliação do Custo no Tempo</i>	56
2.8.5	<i>Técnicas e Métodos de Custeios</i>	56
2.8.6	<i>Método de Custeio por Absorção</i>	59
2.8.7	<i>Departamentalização</i>	60
2.8.8	<i>A questão da capacidade</i>	62
2.8.9	<i>Formação do preço de venda com base nos custos</i>	62
2.8.10	<i>Qualidade e Custos de produção em MADA</i>	64
2.9	APLICAÇÕES DA MA DE METAIS NO SETOR DE O&G E OFFSHORE	70
3	METODOLOGIA	79
3.1	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS, INSTRUMENTAÇÃO E INSPEÇÃO	80
3.1.1	<i>Materiais para a deposição</i>	80

3.1.2 Equipamentos de deposição.....	81
3.1.3 Instrumentação e parâmetros de controle	86
3.1.4 Equipamentos para tratamento térmico	86
3.1.5 Equipamentos de metalografia, micrografia e medidas de microdureza	87
3.2 EQUIPAMENTOS DE ENSAIO MECÂNICOS, ANÁLISES E INSPEÇÃO	87
3.2.1 Ensaio não destrutivo por Ultrassom	89
3.2.2 Ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante (LP)	89
3.2.3 Outros equipamentos de oficina	90
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	91
4.1 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA DE DEPOSIÇÃO PARA FLANGES – FLANGE 1	91
4.1.1 Modelagem 3D e definição do produto – etapa 1	92
4.1.2 Gerar o arquivo STL – etapa 2	94
4.1.3 Planejamento da trajetória de deposição – etapa 3.....	94
4.1.4 Composição da linguagem de programação – etapa 4	98
4.1.5 Deposição – etapa 5.....	99
4.1.6 Pós-processamento – etapa 6.....	104
4.1.7 Inspeção final – Etapa 7	123
4.2 MELHORIA NA TRAJETÓRIA DE DEPOSIÇÃO E APLICAÇÃO DO RAQI – CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO FLANGE 2	123
4.3 ANALISANDO OUTRA TRAJETÓRIA E OUTRO EQUIPAMENTO - FLANGE 3	130
4.4 ESTIMATIVA DE CUSTO PELO MÉTODO DE CUSTEIO POR ABSORÇÃO PLENO COM DEPARTAMENTALIZAÇÃO	134
4.4.1 Departamentalização.....	134
4.4.2 Dados de Entrada.....	136
4.4.3 Cronograma de fabricação	139
4.4.4 Cálculo do custo unitário.....	142
4.4.5 Precificação baseada nos custos	150
CONCLUSÕES	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157
APÊNDICE A	170
ANEXO 1	178

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

É imprescindível para qualquer empresa garantir a continuidade operacional de suas atividades, de tal modo a evitar a interrupção do fornecimento de produtos e serviços aos seus consumidores. Para isso, torna-se vital a reposição em tempo hábil de peças e componentes danificados, contribuindo para reduzir o lucro cessante e as perdas de produção. Nas grandes plantas industriais, como de óleo e gás (O&G), mineração, química, têxtil e celulose, este desafio pode ser ainda maior em razão da grande variedade de equipamentos e peças utilizados, onde a aquisição de um elemento específico pode-se tornar difícil e/ou depender de longos prazos de entrega.

Para se ter ideia da magnitude que os estoques podem assumir, em busca de garantir continuidade operacional, a Equinor uma das maiores produtoras de petróleo bruto do mundo e a segunda maior exportadora de gás natural para a Europa, possui um estoque de cerca de 200.000 itens de peças sobressalentes em vários locais espalhados na região escandinava (GUAJARDO *et al.*, 2015). Isso se justifica, já que os ativos da indústria *offshore* exigem capital intensivo e o tempo de inatividade pode ter graves consequências financeiras. Um complemento das cadeias de suprimento baseadas em Manufatura Aditiva (MA) podem potencialmente oferecer às partes interessadas da indústria *offshore* um forte valor e uma vantagem competitiva, podendo oferecer maior flexibilidade e agilidade em suas operações (KANDUKURI; GALLO, 2020).

Nos últimos anos, a maneira de se fabricar produtos, incluindo bens manufaturados, tem se modificado. Para se manter competitiva, a indústria da manufatura tem procurado produzir com mais qualidade, mas sempre buscando concomitantemente reduzir os tempos e os custos de produção. Nesta linha se enquadra a chamada manufatura rápida (*rapid manufacturing*), cujo próprio nome a define, manufatura de produtos utilizando processos e técnicas de fabricação que encurtam o tempo de produção. Como ilustrado na Figura 1.1, existem dois caminhos para a manufatura rápida: rotas indiretas; e diretas. As rotas indiretas envolvem processos rápidos

de fundição/moldagem e têm aplicações mais específicas. Já as rotas diretas envolvem processos subtrativos e aditivos. Os subtrativos, mais tradicionais, se baseiam na retirada de material para se chegar ao produto (tipicamente usinagem). Já os aditivos, mais modernos, se baseiam na deposição de material para se chegar ao produto final, englobando uma grande gama de processos de fabricação. Esta tecnologia tem sido referenciada como manufatura aditiva.

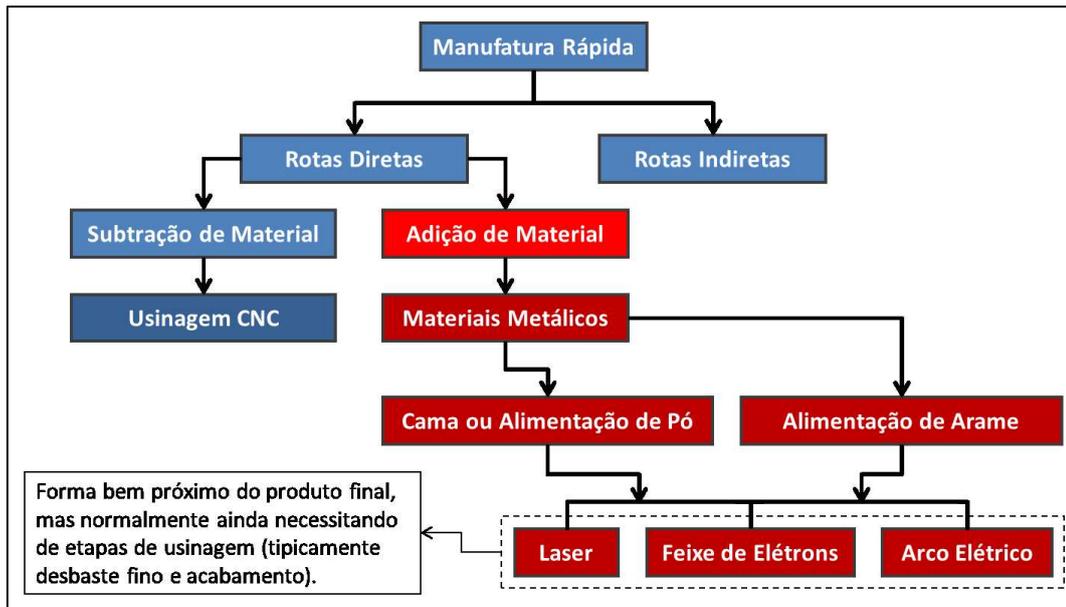


Figura 1.1 - Classificação dos processos de manufatura rápida (adaptado de KARUNAKARAN *et al.*, 2012)

Em linhas gerais, na MA as peças são construídas camada por camada, utilizando diversas tecnologias de adição de material com alto grau de automação. Já de maneira mais formal, a MA é definida pela ABNT NBR/ISO/ASTM 52900:2018 como um processo de união de materiais utilizado para fabricar peças a partir de dados do modelo 3D (*CAD*), tipicamente com uma abordagem “camada por camada”, em oposição às metodologias de fabricação subtrativas e formativas. O termo “manufatura aditiva” é muito abrangente, e engloba todas as técnicas de impressão 3D aplicadas a todos os materiais.

Os processos de MA com alta resolução são capazes de fabricar produtos acabados (aplicação imediata) que atendem os requisitos geométricos para operação de acordo com o projetado. Já os processos com baixa resolução constroem pré-formas, ou seja, partes muito próximas à forma final das peças, e que geralmente demandam operações de usinagem para atender os requisitos do projeto. Enquanto os processos com alta resolução possuem baixas taxas de deposição tornando-o a fabricação mais lenta, os processos de baixa resolução possuem

altas taxas de deposição, a Figura 1.2 mostra essa relação para as principais tecnologias de MA de metais.

Com as tecnologias de deposição (*DED – Directed Energy Deposition*) faz-se o uso de processos até então dedicado mais à soldagem convencionais e especiais para fins de MA. Neste caso, a fabricação se dá sempre por camadas de metal fundido seguindo trajetórias definidas pela geometria da peça a ser fabricada, até que se tenha um formato bem próximo do produto desejado. Dentre as fontes de energia para *DED*, tem-se o “arco” do acrônimo *Arc-DED* ou MADA (Manufatura Aditiva por Deposição a Arco) que remete ao arco elétrico dos processos tipicamente de soldagem. Conforme apontado por Cunningham *et al.* (2018), as técnicas *DED* vem ganhando espaço por possibilitarem a construção de componentes grandes e de média complexidade a um custo praticável. Essa característica se dá pela maior capacidade em termos de taxa de deposição e volume de construção, quando comparados as tecnologias de leito de pó (*PBF - Powder Bed Fusion*). Tais características positivas são pontos fortes da MADA.

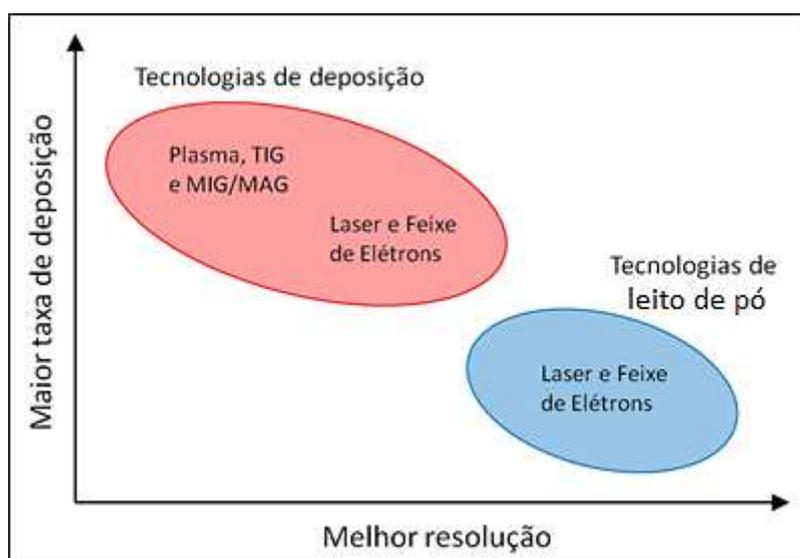


Figura 1.2 - Relação entre taxa de deposição e resolução em processos de manufatura aditiva para metais (adaptado de TREUTLER; WESLING, 2021)

Em termos de maturidade das diversas vertentes da MA como via de fabricação industrial, pode-se tomar como base o chamado ciclo *Hype*, que consiste em uma representação gráfica da previsão dos estágios do ciclo de vida que uma tecnologia atravessa desde a concepção até a maturidade e adoção generalizada. Ao que o gráfico da Figura 1.3 indica, os processos de MA por *DED*, dentro dos quais se enquadra a MADA como será visto mais adiante, estariam atualmente a cerca de 3-7 anos de atingir o platô de produtividade, quando a

tecnologia é amplamente praticada, seu lugar no mercado e suas aplicações são bem conhecidos e com a implementação de normas e padrões para avaliar fornecedores. Alguns desafios operacionais (processos e materiais) precisam ser superados para que a maturidade da MADA realmente alcance de maneira efetiva nos setores industriais.

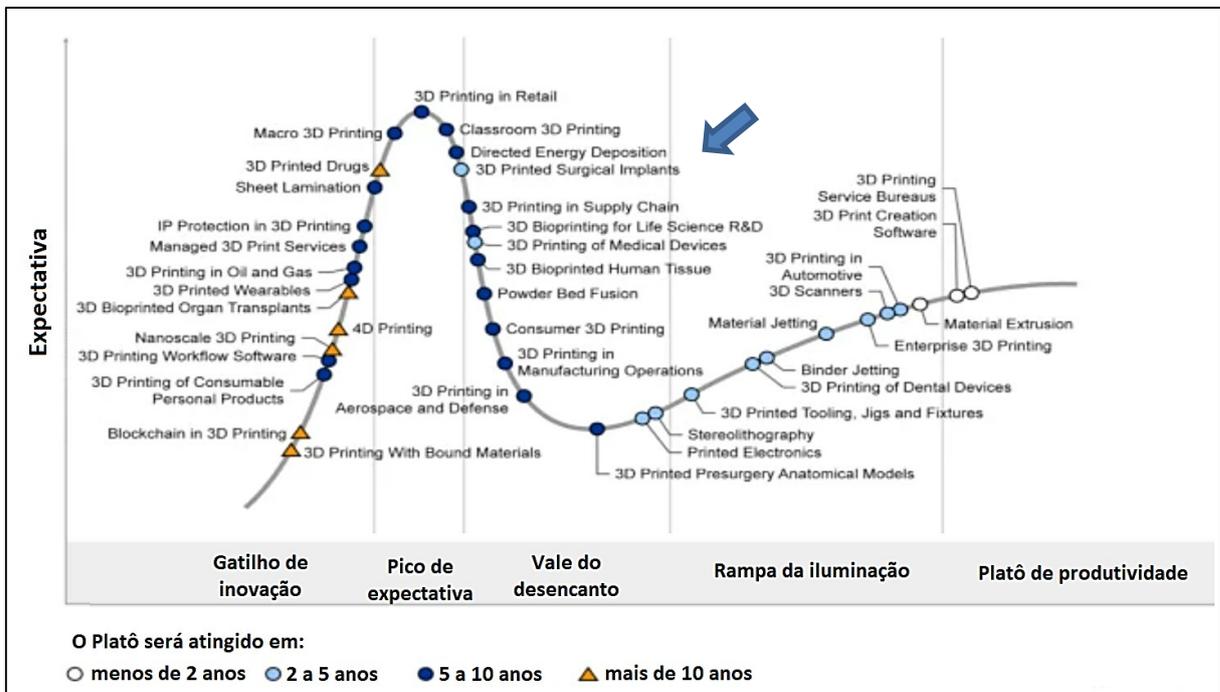


Figura 1.3 - Ciclo de Hype da tecnologia da MA (adaptado de Valdivieso, 2019)

O custo do produto ou serviço oferecido pela tecnologia é um dos fatores-chaves para que atinja o platô de produtividade. Uns dos primeiros trabalhos sobre o assunto foi publicado por Hopkinson e Dicknes (2003). Esses autores compararam o custo unitário do produto em função do volume produzido para algumas tecnologias de MA de polímeros (*Fused Deposition Modeling (FDM)* e *Stereolithography (SLA)*) e injeção por molde. A vantagem da MA, conforme a Figura 1.4, é para demandas mais baixas.

Quando comparados à fundição e ao forjamento, a MA de metais permite a redução no tempo de entrega para pequenas quantidades de componentes, por não serem necessárias ferramentas específicas como moldes e matrizes, favorecendo a produção sob demanda (DEBROY *et al.*, 2018).

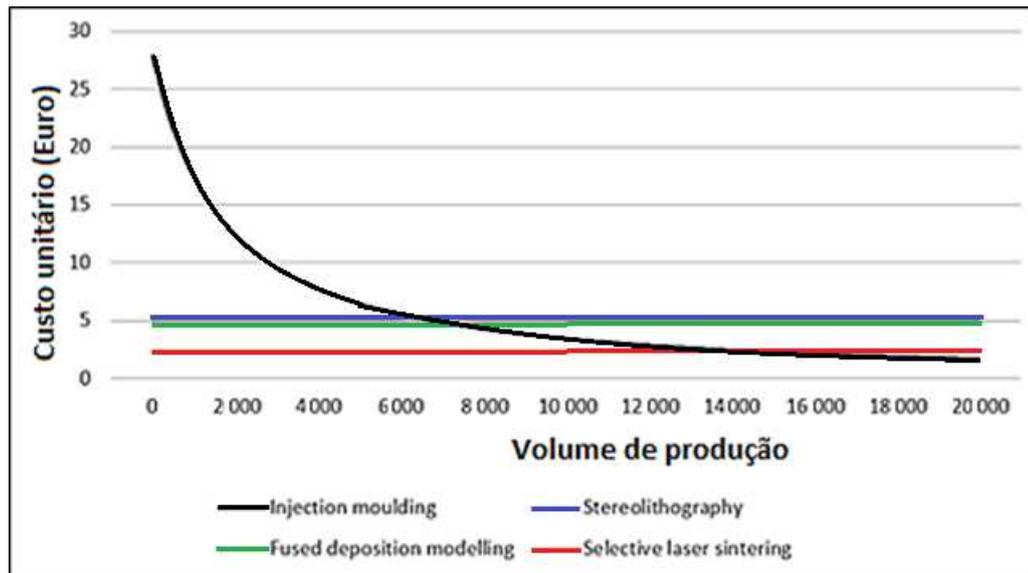


Figura 1.4 – Comparação dos custos de injeção por molde por diversos processos de MA (HOPKINSON; DICKENS, 2003)

Outro fator chave é a qualidade do produto manufaturado e que, segundo Correia (2003), raramente pode ser definida por uma simples propriedade. Na grande maioria dos casos, qualidade é uma composição de várias propriedades baseadas em normas, frequentemente interrelacionadas e quase sempre medidas em diferentes unidades. A qualidade de uma junta soldada, por exemplo, não é somente o aspecto do cordão, ou suas dimensões finais, é uma combinação destas e de outras propriedades, ou seja, o desempenho geral, para o qual cada propriedade dá a sua contribuição, em maior ou menor escala.

Partindo para um estudo de caso, os flanges utilizados nas mais diversas indústrias, inclusive na O&G, podem ser fabricados via MA sob demanda em tempo hábil, a fim de reduzir os estoques físicos a um custo praticável e principalmente obter a garantia de continuidade operacionais. Assim as tecnologias de deposição indicadas para a fabricação desses componentes são as que utilizam o *GMA (MIG/MAG)*, tendo em vista as altas taxas de deposição possíveis. Diversos tipos de flanges são regidos pela Norma *ASME B16.5 (Pipe Flanges and Flanged Fittings)*. Esta norma aborda mais de 100 tipos de materiais, 8 tipos de flanges, 7 classes de pressão, 2 tipos de face, 21 diâmetros, resultando milhares de possibilidades diferentes.

A fim de explorar uma demanda do setor de O&G, será abordado neste trabalho a fabricação de Flanges de Pescoço Soldável (*Weld Neck Flange* ou *Flange WN*) via MA pelo processo o *GMA-DED* com arame. Dentro do escopo da *ASME B16.5*, para cada tipo de material, existem mais de 1.400 dimensões diferentes para os Flanges *WN* que variam entre

0,5 kg e 650 kg. Diante do exposto, explorar os custos e qualidade da fabricação de flanges de pescoço via *GMA-DED* pode ser uma solução viável para a rápida reposição dos estoques sobressalentes no setor de O&G.

Além da grande variedade de tamanho, os flanges não são peças de alta demanda, portanto os longos períodos de armazenagem imputam um alto custo de armazenagem e/ou desperdício. Ou ainda, devido à baixa demanda, esses itens não são estocados, correndo o risco de faltar quando solicitado.

1.1 Objetivo Geral

Analisar os custos e a qualidade na fabricação de flanges de pescoço via Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (especificamente *GMA-DED*) em um cenário de reposição de peças de baixa demanda.

1.2 Objetivo Específicos

- Implementar melhorias no equipamento de MADA, inclusive *GMA-DED*, desenvolvido no LAPROSOLDA, visando uma melhor produtividade e qualidade dos produtos obtidos;
- Criar uma metodologia de fabricação de componentes metálicos via *GMA-DED* com base nas normas vigentes (*ASME B16.5* – Norma para o dimensionamento de flanges, *AWS D20.1* – Norma de processo de fabricação *GMA-DED* e *ASTM A182* – Norma de materiais forjados);
- Comparar o flange fabricado via *GMA-DED* com o convencional (forjado) em termos de tempo, qualidade e preço de venda.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está estruturada conforma a Figura 2.1.

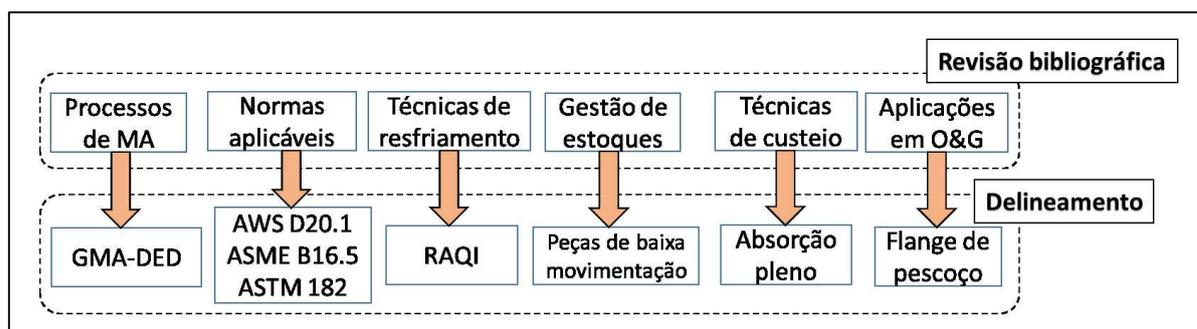


Figura 2.1 – Fluxograma da revisão bibliográfica

2.1 Classificação dos Processos de Manufatura Aditiva

Mesmo diante do constante desafio trazido pelo advento de novas tecnologias e processos, a norma ABNT NBR/ISOASTM 52900:2018 classifica os processos de MA em sete grandes categorias, como listadas a seguir e representadas nos esquemas da Figura 2.2. Vale ressaltar que processos dentro de cada categoria podem ser combinados com usinagem CNC resultando na chamada manufatura híbrida (combinação da rota de fabricação aditiva com a subtrativa em um mesmo equipamento) como solução visando maior versatilidade.

- Fotopolimerização em Cuba (*Vat Photopolymerization*) - processo no qual um fotopolímero líquido contido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz;
- Fusão em Leito de Pó (*Powder Bed Fusion*) - processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó;
- Jateamento de Ligante (*Binder Jetting*) - processo no qual um agente de ligação líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó;
- Jateamento de Material (*Material Jetting*) - processo no qual gotículas de material de construção são depositadas seletivamente;

- Laminação de Folhas (*Sheet Lamination*) - processo no qual folhas de material são unidas para formar uma peça;
- Extrusão de Material (*Material Extrusion*) - processo no qual o material é distribuído seletivamente através de um bico ou orifício;
- Deposição com Energia Direcionada (*Directed Energy Deposition*) - processo no qual a energia térmica focalizada é usada para fundir materiais por fusão à medida que são depositados.

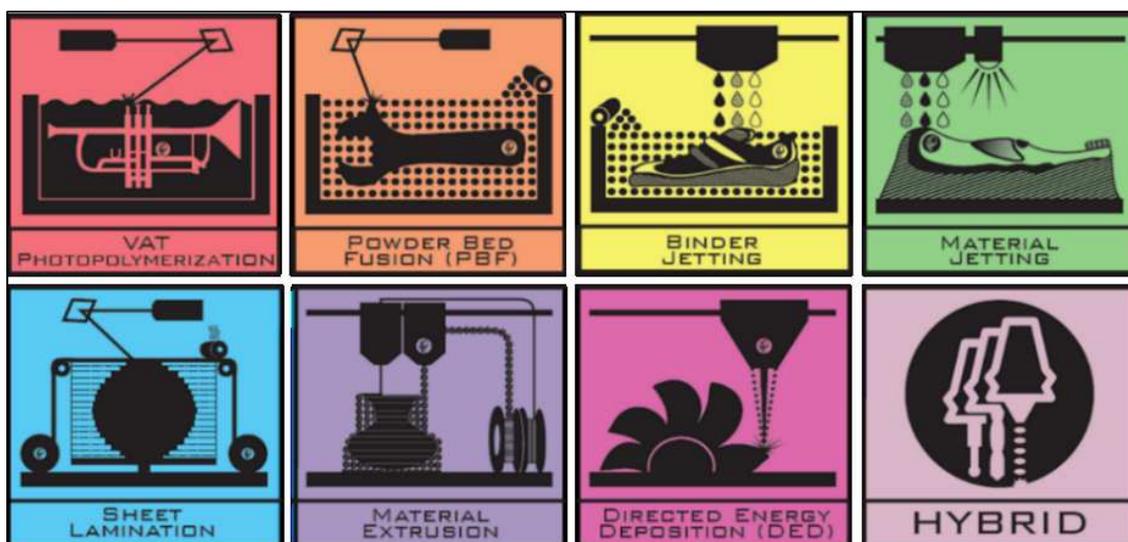


Figura 2.2 - Classificação dos processos de MA em sete grandes categorias segundo a norma *ISO/ASTM 52900:2018* (Fonte: HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2020)

A norma ABNT *NBR/ISO/ASTM 52900:2018* classifica ainda de forma mais detalhada os processos de única etapa aplicáveis a materiais metálicos, conforme a Figura 2.3, levando em conta o tipo de material, estado de fusão, matéria-prima, distribuição da matéria-prima, princípio básico da tecnologia de MA, fonte de calor e por fim os categoriza em *DED*, *PBF* ou Laminação de folhas, originando em 7 processos diferentes sem sugerir acrônimos para esses processos.

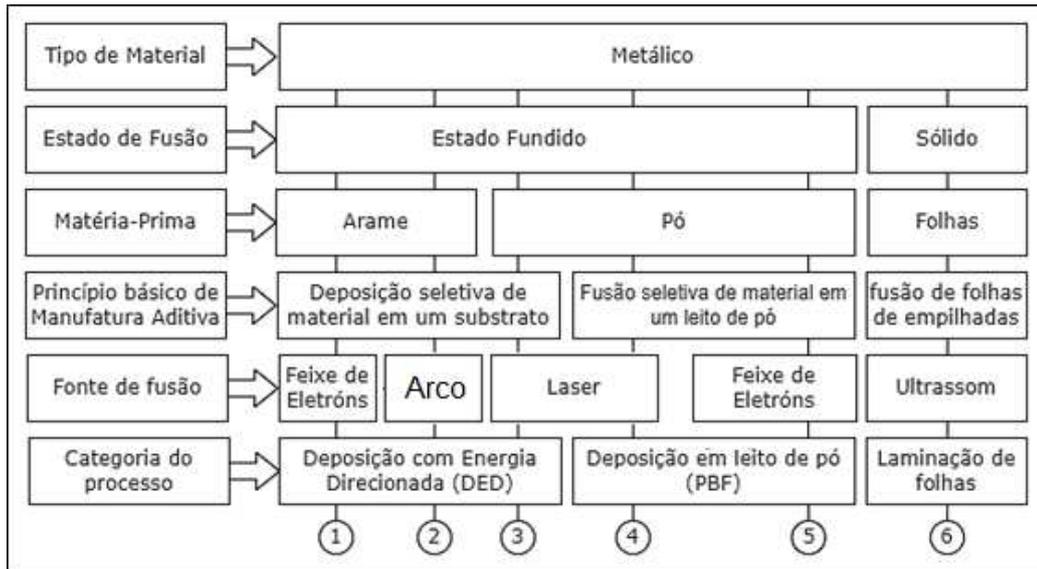


Figura 2.3 - Classificação dos processos de MA de única etapa aplicáveis a materiais metálicos segundo a norma ABNT NBR/ISO/ASTM 52900:2018

A *AWS D20.1:2019* traz alguns acrônimos para os processos de MA de metais descritos na Tabela 2.1, mais relacionados aos processos de soldagem. É importante ressaltar que pode haver variações desses processos, como, por exemplo, a utilização de arame-quente, múltiplos arames etc., mas os princípios permanecem os mesmos.

Tabela 2.1 - Descrição e abreviação dos processos *PBF* e *DED* segundo a norma *AWS D20.1:2019*

Descrição do processo	Nome	Acrônimo
Fusão em leito de pó (termo geral)	<i>Powder Bed Fusion</i>	PBF
Fusão em leito de pó a laser	<i>Laser - Powder Bed Fusion</i>	L-PBF
Fusão em leito de pó com feixe de elétrons	<i>Electron Beam - Powder Bed Fusion</i>	EB-PBF
Deposição com energia direcionada (termo geral)	<i>Directed Energy Deposition</i>	DED
Deposição com energia direcionada com laser	<i>Laser - Directed Energy Deposition</i>	L-DED
Deposição com energia direcionada com feixe de elétrons	<i>Electron Beam - Directed Energy Deposition</i>	EB-DED
Deposição com energia direcionada com o processo GTAW	<i>Gas Tungsten Arc - Directed Energy Deposition</i>	GTA-DED
Deposição com energia direcionada com o processo GMAW	<i>Gas Metl Arc - Directed Energy Deposition</i>	GMA-DED
Deposição com energia direcionada com o processo PAW	<i>Plasma Arc - Directd Energy Deposition</i>	PA-DED

Mas a derivação e surgimento acelerados de novas tecnologias podem deixar estas classificações de normas rapidamente obsoletas. Um exemplo de classificação bastante atualizado com foco em processos de manufatura aditiva aplicados em metais sob suas diferentes formas de fornecimento é apresentado na Figura 2.4



Figura 2.4 - Classificação dos processos de manufatura aditiva aplicados em metais sob suas diferentes formas de fornecimento (AMPOWER, 2019)

2.1.1 Tecnologias Avançadas de Manufatura Aditiva Com Metais

Como visto anteriormente, vários processos podem ser utilizados para manufatura aditiva. No entanto, as opções industriais são limitadas pelas poucas tecnologias comercialmente disponíveis. Thomas-Seale *et al.*, (2018) destacam duas tecnologias como

sendo as mais maduras e comercialmente disponível para fabricação de componentes metálicos funcionais:

- Fusão em leito de pó (*PBF*); e
- Deposição com energia direcionada (*DED*).

Segundo Debroy *et al.* (2018), os processos *PBF* são adequados para a fabricação de componentes pequenos e com geometrias complexas, enquanto os processos *DED* são uma alternativa para componentes de grandes dimensões (>10 kg) e de geometria com moderada complexidade.

Em termos da tecnologia de leito de pó para metais, tem-se o processo de sinterização ou fusão seletiva por laser e o processo de fusão seletiva por feixe de elétrons. Nestes processos, camadas finas de pó metálico são espalhadas (acamadas) uniformemente sobre uma plataforma de construção, dentro de uma câmara com gás inerte ou à vácuo, e processadas (sinterizadas ou fundidas) de maneira seletiva (de acordo com fatias/planos horizontais retiradas do projeto em *CAD*) e sequencial, ou seja, tem-se primeiro a deposição do material em uma camada e, somente depois, sua sinterização/fusão. Estes processos de deposição-sinterização/fusão de material permitem produzir em geral peças de geometria complexa e com grande precisão dimensional, com propriedades mecânicas otimizadas, devido às possibilidades metalúrgicas advindas de diferentes pós. Entretanto, a tecnologia de leito de pó demanda fontes de energia de elevado custo, o que torna equipamentos dedicados muito caros e fora do alcance da maioria das empresas. Além disto, em geral trata-se de uma tecnologia de construção lenta e para peças de dimensões limitadas (contidas pelas câmaras) e cujos consumíveis são de alto custo.

Como alternativa, existem os processos baseados em tecnologia de deposição com energia direcionada, que executam a fusão e, imediatamente (quase que concomitantemente), a deposição do material assistidas por uma fonte de calor intensa e concentrada, geralmente utilizados para a fabricação de pré-formas. Neste caso, faz-se uso de processos tipicamente de soldagem para depositar camadas de metal fundido, seguindo trajetórias definidas pela geometria da peça a ser fabricada, até que se tenha, com a constante solidificação, um formato bem próximo do produto, mas com algum excedente nas dimensões, necessitando de etapas de usinagem, geralmente para desbaste fino e acabamento.

No caso destes processos de fusão-deposição de material, pode-se utilizar fontes de energia especiais (laser ou feixe de elétrons), mas processos a arco elétrico, considerados

convencionais, e, portanto, já mais difundidos na indústria em geral e de menor custo, como *TIG* e *MIG/MAG* e mesmo Plasma e Arame Tubular, podem também ser utilizados.

Williams *et al.*, 2016 e Ding *et al.*, 2015 concordam que na ausência de exigências de geometrias delgadas e muito complexas e de baixo calor aportado, os processos de *DED* baseados em arame e arco elétrico tem mostrado ser a opção de maior capacidade de produção, maior flexibilidade de implementação e menor custo operacional. Assim, apesar de não conferir uma resolução tão boa quanto as obtidas com laser ou feixe de elétrons, principalmente com tecnologias de leito de pó, os processos de manufatura aditiva a arco elétrico permitem taxas de deposição mais elevadas, sendo ideais para pré-formas de grandes dimensões e quando não há demanda por geometrias muito delgadas e/ou com baixo aporte de calor. Entretanto, tais processos estão sempre associados a uma transferência e/ou acúmulo de calor indesejável na pré-forma como será melhor discutido mais adiante. Além disso, com esses processos a dissipação de calor é significativamente deteriorada com o aumento da altura da pré-forma em construção, o que torna o acúmulo de calor ainda mais problemático, e então a solidificação do metal fundido depositado e seu resfriamento podem ser controlados apenas de modo limitado.

2.1.2 Processos por Deposição com Energia Direcionada - *DED*

Os processos *DED* podem ser classificados de acordo com o tipo de material de adição (aramé ou pó) e de energia (térmica ou cinética) empregada, conforme apresentado na Figura 2.5. Os processos baseados em energia térmica, ainda podem ser subclassificados de acordo com o tipo de fonte de energia: laser, feixe de elétrons e arco plasma (ABNT NBR/ISO/ASTM 52900:2018). Os processos *DED* que utilizam pó e laser tem sido amplamente estudados e são os mais difundidos. Os processos que utilizam arame geralmente têm capacidade de fabricar peças de grandes dimensões, com maior taxa de deposição, mas com menor resolução. Adicionalmente, o arame é de mais fácil manuseio e estocagem, apresenta baixos riscos de contaminação e mesmo de saúde e segurança ocupacional.

Os processos *DED* baseados em arame geralmente utilizam um feixe de elétrons ou arco elétrico como fonte de calor. Os processos *DED* baseados em feixe de elétrons operam sob vácuo e são adequados para o processamento de materiais reativos, como as ligas de titânio. Já os processos *DED* baseados no arco elétrico utilizam equipamentos e consumíveis de soldagem para fins de MA. Os sistemas *DED* baseados em energia cinética, geralmente chamados de *Cold Spray*, usam um bico convergente e divergente para acelerar partículas micrométricas a velocidades supersônicas. Acima de uma velocidade crítica de impacto, segundo Dass e Moridi

(2019) partículas se ligam adesivamente ao substrato formando as camadas. A Figura 2.6 mostra uma classificação dos processos *DED* baseados no arco elétrico.

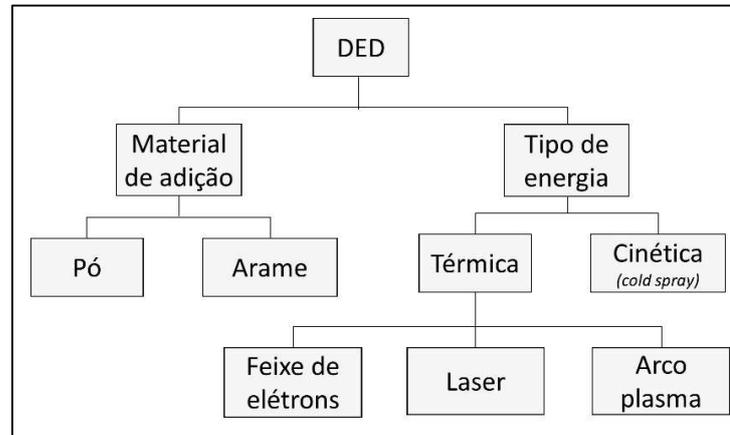


Figura 2.5 - Classificação dos processos DED (adaptado de DASS E MORIDI, 2019)

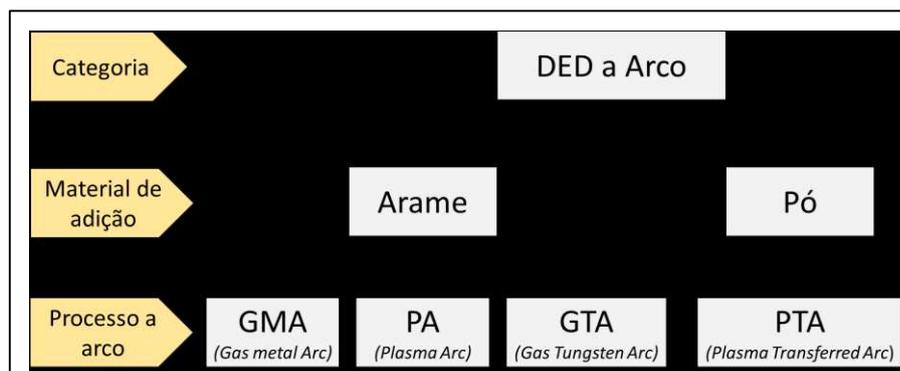


Figura 2.6 - Classificação dos processos DED de acordo com o tipo de material e fonte de energia (Adaptado de ABNT NBR/ISO/ASTM 52900:2018)

De acordo com a norma ABNT NBR/ISO/ASTM 52900:2018, os processos *DED* apresentam as seguintes características:

- Matéria-prima (arame ou pó) fornecida diretamente à poça de fusão;
- Taxa de deposição maior que em processos *PBF* (tipicamente > 200 g/h);
- Máquinas com grandes volumes de construção (tipicamente > 1000 mm³);
- Máquinas tipicamente com 5 graus de liberdade e fonte de energia articulada, pois não se aplica o conceito de estrutura de suporte como em processos *PBF*;
- Possibilidade de plataforma de manufatura híbrida (deposição + usinagem);
- Deposição em atmosfera controlada (tipicamente inerte ou sob vácuo);

- Capacidade de depositar diretamente sobre componentes pré-existentes (por exemplo, reparo de componente desgastado ou construção de detalhes sobre um componente usinado ou forjado);
- Potencial para alterar a composição química e microestrutura ao longo do volume da peça (componentes com gradiente de funcionalidade).

Os processos de deposição a arco (os mesmo aparatos utilizados em soldagem) que utilizam arame e proteção gasosa são predominantemente utilizados em *DED*. Sempre que possível, o processo *GMA-DED* é escolhido para sistemas *DED*, Williams *et al.* (2016) explicam que além da elevada taxa de deposição e eficiência energética, a alimentação concêntrica do processo *GMA* facilita a geração de trajetórias de deposição. Apesar de pouco explorado, o processo a arco que utiliza pó (*PTA*) vem sendo também estudado por Cardozo *et al.* (2018), Mercado Rojas *et al.* (2018), dentre outros.

Objetivando uma visão mais ampla sobre a taxa de deposição dos processos *DED* que utilizam energia térmica, foi realizada uma revisão sistemática de publicações recentes com foco em aços, ligas de Níquel e Cobalto, conforme apresentada na Tabela 2.2. Observa-se uma variação significativa da taxa de deposição dos processos *DED* dependendo do tipo de fonte de calor e material de adição.

Os processos *DED* que utilizam feixe de elétrons e arco elétrico como fonte de calor tendem a ter maior taxa de deposição que os processos a laser. Em parte, esse comportamento pode ser creditado à eficiência de fusão desses processos, maiores nos casos do arco e do feixe de elétrons (KOU, 2002).

Tabela 2.2 - Taxas de deposição (m) relatadas para os diferentes processos *DED*

Referência	Processo	Material	ṁ (kg/h)
Weglowski <i>et al.</i> , 2018	<i>EB-DED</i>	Aço inoxidável Austenítico	1,9
Martina <i>et al.</i> , 2019	<i>Tandem GMA-DED</i>	17-4 pH	9,5
Ali <i>et al.</i> , 2019	<i>GMA-DED</i>	Aço inoxidável Ferrítico	4,8
Xu <i>et al.</i> , 2018	<i>GMA-DED</i>	Maraging 250	4,2
Yangfan <i>et al.</i> , 2019	<i>GMA-DED</i>	Inconel 625	3,7
Rajeev <i>et al.</i> , 2020	<i>GMA-DED</i>	Stellite 6	2,7
A Hosseini <i>et al.</i> , 2019	<i>GMA-DED</i>	Duplex	3,4
Rodriguez <i>et al.</i> , 2018	<i>GMA-DED</i> <i>GTA-DED</i>	AISI 316L	3,7 1,9

Tabela 2.3 - Taxas de deposição (m) relatadas para os diferentes processos *DED* (continuação)

Li <i>et al.</i> , 2019	<i>GTA-DED</i>	Stellite 6	0,6
Ivántabernero <i>et al.</i> , 2018	<i>PA-DED (arame)</i>	AISI 316	1,5
Cardozo <i>et al.</i> , 2018	<i>PA-DED (arame)</i>	Inconel 625	1,0
	<i>PTA-DED (pó)</i>		0,3
Mercado Rojas <i>et al.</i> , 2018	<i>PTA-DED (pó)</i>	Liga de Ni	1,2
Zhong <i>et al.</i> , 2017	<i>L-DED (pó)</i>	Inconel 718	2,7
Dalae <i>et al.</i> , 2020	<i>L-DED (pó)</i>	Inconel 625	1,2
Bambach <i>et al.</i> , 2018	<i>L-DED (pó)</i>	Inconel 718	0,6
	<i>L-DED arame-frio</i>		0,3
	<i>L-DED arame-quente</i>		0,9
Akbari and Kovacevic, 2018	<i>L-DED (arame)</i>	AISI 316L	0,4

Em relação ao tipo/forma do material de adição, da Tabela 2.2 observa-se uma tendência de maior taxa de deposição para o arame com processos a arco e para o pó com os processos a laser. No caso do arco, considerando o processo *GMA*, a maior taxa de deposição para o arame está relacionada à elevada energia no acoplamento arame-arco. Já para o laser esse comportamento pode ser explicado considerando que o pó, devido à sua relação entre área de superfície e volume, tem maior capacidade de absorção de energia que o arame.

Em relação ao processo *L-DED*, não se pode negligenciar que desenvolvimentos assistido por aquecimento indutivo recentes têm elevado significativamente a sua taxa de deposição, por exemplo, com *L-DED* (DALAEE *et al.*, 2020), utilização de arame-quente (BAMBACH *et al.*, 2018), otimização do feixe de pó (ZHONG *et al.*, 2017), dentre outros.

Como mencionado por Ding *et al.* (2015), a utilização de processos *DED* baseados em arco e arame permite a fabricação de grandes componentes de forma mais rápida (alta taxa de deposição) e mais econômica (*hardware* e consumíveis mais baratos e acessíveis). Em contrapartida, Martina (2020) explica que essa abordagem de *DED* tem menor resolução e capacidade de fabricar geometrias complexas, o que se reflete em restrições de fabricação e em maiores volumes de usinagem após a deposição.

2.1.3 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (*MADA*) ou Arc Direct Energy Deposition (*Arc-DED*)

Dentre os processos *DED*, aqueles que utilizam o arco elétrico como fonte de calor para a fusão têm se destacado em virtude de apresentarem equipamentos mais simples e

convencionalmente usados em soldagem, garantindo uma maior familiaridade por parte de empresas, operadores e organismos de certificação.

Alberti *et al.* (2014) inclusive mencionam que os conhecimentos prévios em soldagem permitem uma evolução mais rápida de sua aplicação na manufatura aditiva. Além disso, os processos a arco elétrico também despertam interesse por serem executados fora de uma câmara de vácuo, em comparação aos processos com feixe de elétrons, e por apresentarem menores despesas relacionadas à aquisição, operação e manutenção de equipamentos, em comparação aos equipamentos de laser. Segundo Ding *et al.* (2015), quando comparados aos processos *L-DED* e *EB-DED*, os processos *Arc-DED* possuem vantagens quanto ao menor custo, e maior eficiência energética.

Em meio às possibilidades de implementação da manufatura aditiva a arco, a vertente mais utilizada tem sido denominada de *Wire + Arc Additive Manufacturing manufacturing (WAAM)*, englobando todos os processos até então típicos só da soldagem e que tem a adição de material na forma de arame também para a construção de peças metálicas. Pelas vantagens apontadas anteriormente, o *GMA-DED* (utilização do processo de soldagem *GMAW* para manufatura aditiva) tem sido o mais pesquisado e utilizado.

2.1.3.1 Cold Metal Transfer - CMT

Na busca por um processo mais estável para controlar a deposição de metal fundido, uma variante do processo *GMAW*, conhecida como *Cold Metal Transfer (CMT)*, foi adaptada à manufatura aditiva (RODRIGUES *et al.*, 2019).

O *CMT* funciona por meio de um movimento mecânico periódico do arame-eletrodo que é realizado durante todo o processo para modular o destacamento das gotas de forma combinada a um controle totalmente digital, desempenhado por uma fonte inversora de soldagem. Para isso, um servomotor incorporado à tocha, que, segundo Kah *et al.* (2013), pode oscilar em frequências de até 70 Hz, é utilizado para realizar a retração do arame e auxiliar no destacamento das gotas. Essencialmente, um ciclo *CMT* pode ser dividido em dois estágios, curto-circuito e arco aberto. Mais detalhes sobre o processo *CMT* e seu funcionamento podem ser vistos em Skhabovskyi *et al.* (2017) e em Selvi *et al.* (2018).

Cabe ressaltar que o processo *CMT* possui suas próprias derivações, que, combinando a inversão de polaridade do arame-eletrodo para negativo e/ou a pulsação de corrente, podem modular para mais ou menos o calor imposto com a deposição de material e outras características operacionais de forma a favorecer a manufatura aditiva. Cong *et al.* (2015) e

Cong *et al.* (2017), por exemplo, avaliaram com sucesso a utilização de variantes do *CMT* para reduzir bastante a porosidade produzida em pré-formas fabricadas aditivamente.

Contudo, sendo o processo *GMA-DED* caracterizado por apresentar elevadas taxas de deposição, que o torna ideal para construção de grandes componentes em curtos intervalos de tempo, isso vem quase sempre ao custo de altos níveis de calor imposto (mesmo com processos como o *CMT*) se comparado a outras formas de manufatura aditiva de metais. Esses elevados níveis de calor aportados podem levar a acúmulo de calor nas peças em construção e, conseqüentemente, a várias intercorrências negativas como será visto à frente.

2.1.3.2 *Gas Metal Arc Pulse - GMA-P*

O processo *GMA* pulsado é há muito tempo estudado para uniões soldadas, que alia as características das transferências globular (baixa corrente) e goticular (alta produtividade), tem sido objeto de vários estudos para melhorar a qualidade e a produtividade da junta soldada (Grubic & Andric, 1995). A sua aplicação na manufatura aditiva não é diferente, visto que as vantagens obtidas com o seu uso são muitas em comparação com o *MIG* convencional. A dificuldade em se utilizar tal processo é resultante da dificuldade de obter parâmetros adequados, que variam de acordo com o material, diâmetro e comprimento do eletrodo e gás de proteção (Norrish, 1992), mas com advento dos processos sinérgicos, essa parametrização se tornou mais prática.

A ideia da transferência pulsada (controlada), onde emprega-se uma corrente mínima (corrente de base) necessária para manter o arco aceso, promover o aquecimento do eletrodo por efeito Joule e proporcionar a limpeza catódica (Subramaniam, 1996 e Norrish, 1992), onde se sobrepõe pulsos de corrente (corrente de pulso) num valor acima da corrente de transição para que ocorra a transferência, conforme a Figura 2.7. Como resultado, obtém-se uma corrente média menor do que àquela que seria usada na transferência goticular (Vilarinho, 2000).

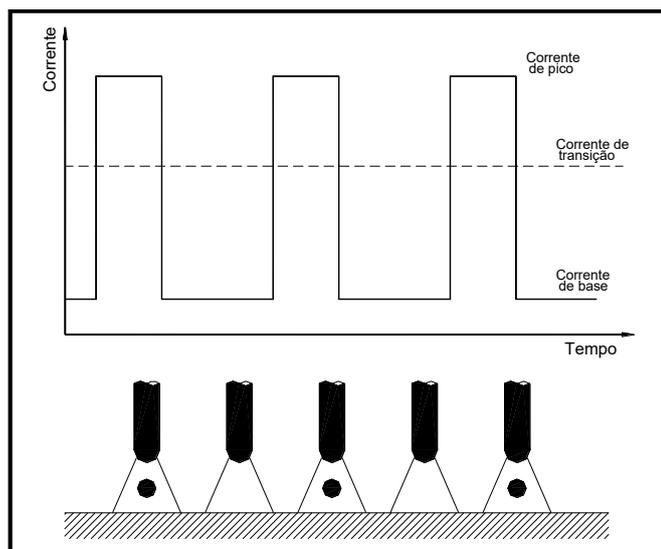


Figura 2.7 - Transferência pulsada (NORRISH, 1992 apud VILARINHO, 2000)

Vilarinho (2000) cita inúmeras vantagens descritas para este processo segundo Sadler (1999); Castner (1995); Norrish (1992) e Ghosh *et al.* (1991):

- Possibilidade de se soldar em todas as posições com transferência caracteristicamente gótica;
- Velocidades de soldagem cerca de 35% maiores que as utilizadas para a transferência curto-circuito;
- Significante redução no nível de respingos quando comparado ao curto-circuito;
- Menor distorção comparado ao gótico;
- Cordão de boa aparência; e
- Redução na taxa de geração de fumos.

Todas essas vantagens do pulsado para uniões (soldagem) podem ser vantajosas também para MA, portanto esse é um dos processos avaliados para neste trabalho, além disso boa parte dos equipamentos disponíveis no mercado possui o processo de *MIG* pulsado, o que não é verdade para o processo *CMT* (muito estudado para Manufatura Aditiva) que é ainda uma exclusividade da marca Fronius®.

2.2 Principais Normas Aplicáveis

Sabe-se que o cumprimento de padrões é de extrema importância para a atestar a qualidade e rastreabilidade de um produto. Neste sentido, dada a relevância da MA para a

indústria atual, várias normas têm sido publicadas pelos principais organismos internacionais. A *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*) e a *ISO* (*International Organization for Standardization*) inclusive têm comitês com dedicação exclusiva ao tema, trata-se do *ASTM F42* (*Committee on Additive Manufacturing Technologies*) e do *ISO/TC 261* (*Additive Manufacturing*).

De acordo com levantamento feito na *ASTM* e na *ISO*, a maior parte destes documentos cobre aspectos relacionados a processos, materiais e procedimentos utilizados em processos *PBF* devido à maior maturidade ante aos processos *DED*. A Tabela 2.4 lista as principais normas da *ASTM*, *ISO*, *AWS* (*American Welding Society*) e *API* (*American Petroleum Institute*) de manufatura aditiva para os processos *DED*.

Tabela 2.4 - Lista de normas para manufatura aditiva de cunho geral e específicas para tecnologias de deposição com energia direcionada

<i>ISO/ASTM 52900 - Additive manufacturing - general principles - terminology</i>
<i>ISO/ASTM 52910 - Additive manufacturing - design - requirements, guidelines and recommendations</i>
<i>ISO/ASTM 52921 - Standard terminology for additive manufacturing - coordinate systems and test methodologies</i>
<i>ISO 17296-2 - Additive manufacturing - general principles - Part 2: overview of process categories and feedstock</i>
<i>ISO 17296-3 - Additive manufacturing - general principles - Part 3: main characteristics and corresponding test methods</i>
<i>ISO 17296-4 - Additive manufacturing - general principles - Part 4: overview of data processing</i>
<i>ASTM F3413 - Guide for additive manufacturing - design - directed energy deposition</i>
<i>ASTM F3187 - Standard guide for directed energy deposition of metals</i>
<i>ASTM F2971 - Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing</i>
<i>ASTM F3122 - Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes</i>
<i>AWS D20.1 Standard for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing</i>
<i>API 20S (Qualification of Additively Manufactured Metallic Materials for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries</i>

Da tabela acima, destaca-se a norma que foi recentemente introduzida pela *AWS* (*AWS D20.1 - Standard for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing*). Trata-se de um padrão que contém os requisitos tanto para processamento de metais por meio de tecnologias de leito de pó quanto com deposição com energia direcionada, incluindo

processos derivados da tecnologia da soldagem, inclusive os baseados em arco elétrico como é o caso do *GMA-DED*. Além de termos e definições aplicáveis, o documento traz requisitos para projeto de componentes fabricados aditivamente, para qualificação de máquinas, procedimentos e de desempenho de operadores, para a manufatura de componentes fabricados aditivamente, além de requisitos para a qualificação do pessoal de inspeção, incluindo requisitos de ensaios não-destrutivo e destrutivo e critérios de aceitação para qualificação e produção de peças.

A compreensão inadequada dos requisitos relativos aos processos de aprovação, qualificação e certificação exigidos pelas autoridades regulatórias podem impedir o progresso da adoção de MA na indústria *offshore*. Testes não padronizados caros e demorados para garantir a integridade das peças estão impedindo as aplicações mais amplas de MA no setor offshore, ressaltando a necessidade de desenvolver diretrizes e padrões de práticas ideais desde o projeto até a construção da peça e a operação (KANDUKURI; GALLO, 2020).

A *DNV (Det Norske Veritas)* tem executado vários projetos globalmente para ajudar a indústria a qualificar materiais e produtos produzidos por manufatura aditiva, e tem trabalhado no desenvolvimento de uma diretriz sobre a qualificação das peças por MA que irá acelerar a adoção da tecnologia na indústria de O&G. As tecnologias de MA abordadas na diretriz são fusão de leito de pó baseado em laser (*L-PBF*) e as tecnologias *DED*. (TATHGAR; MOE; MAILLON, 2020).

Outros autores relatam as dificuldades na adoção da MA no setor de petróleo e gás e trabalham em busca de soluções. Vendra, Malkawi e Avagliano (2020) apresentaram uma visão geral do status atual do desenvolvimento de normas no campo da MA, com foco nas lacunas e nos requisitos específicos do setor. Especificamente para aplicações em petróleo e gás, os padrões pertinentes precisam ser desenvolvidos para aumentar a segurança operacional e ambiental, a eficiência e a sustentabilidade.

De Bernardi (2020) traz detalhes da recente norma da área de MA: *API 20S (Qualification of Additively Manufactured Metallic Materials for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries)*. Segundo este autor, tal norma foi projetada para desempenhar um papel crucial no aproveitamento da MA para promover a inovação na indústria de petróleo e gás, tendo o trabalho tido como objetivo encorajar uma adoção mais segura, ampla e rápida de tecnologias nas principais aplicações de petróleo e gás.

2.3 Requisitos de Fabricação via *GMA-DED* - *AWS D20.1/D20.1M:2019*

Será discutido nesta secção as principais recomendações da *AWS D20.1* para a fabricação de componentes via *GMA-DED*, e além disso serão identificados os custos que podem ser incorridos aos produtos para o cumprimento desses requisitos.

A norma *AWS D20.1* fornece os requisitos gerais para a fabricação de componentes metálicos utilizando MA, inclusive MADA. Possui tópicos sobre projeto, qualificação, fabricação, inspeção e critérios de aceitação dos componentes fabricados por MA. A norma classifica os componentes a serem fabricados em A, B e C em funções dos riscos da não integridade do componente, essa classificação determina o nível de qualificação e inspeção necessários e os critérios de aceitação para cada uma das classificações.

2.3.1 *Qualificação de Procedimento, Operador e Máquina*

Para produzir componentes metálicos via MA seguindo os padrões da *AWS D20.1*, o fabricante deve qualificar procedimento e operador para as classes A, B e C e qualificar máquina (conjunto de movimentador mais fonte) para as classes A e B.

O objetivo da qualificação de máquina de MA (*Machine Qualification Record - MQR*) é demonstrar que o equipamento de MA é capaz de produzir amostras que atendem às propriedades exigidas em todo o envelope de construção para aquele processo, dentro do qual os componentes devem ser fabricados usando um procedimento de MA qualificado. O Objetivo da qualificação de um procedimento de MA (*Procedure Qualification Record - PQR*) é demonstrar a capacidade do procedimento para produzir um componente específico que atenda às propriedades finais exigidas. O objetivo da qualificação de operador de MA é determinar a aptidão dos operadores em concluir a fabricação de componentes por MA aceitáveis para um determinado modelo máquina MA. Portanto o conjunto máquina e operador são qualificados por processo, já o procedimento exige uma qualificação por componente.

Por fim elabora-se a AMPS (*Additive Manufacturing Procedure Specification*), um documento que deve incluir o processo de MA utilizado, a classificação do componente, o nome do arquivo do modelo de construção e toda a plataforma de construção, matéria-prima, modelo de máquina, parâmetros de construção e informações de pós-processamento. O AMPS deve referenciar todos os MQR(s) e PQR(s) usados para qualificar o AMPS.

A qualificação da máquina é necessária para componentes Classe A e B e requer a fabricação e ensaios (destrutivos e não destrutivos) de peças denominadas de Peça Padrão de

Qualificação (*Standard Qualification Build*). A qualificação do procedimento é necessária para componentes Classe A, B e C e requer a fabricação e ensaios (destrutivos e não destrutivos) de peças denominado de Peça Teste de Pré-Produção (*Preproduction Test Build*). Os requisitos de inspeção e ensaios para a qualificação de máquina e procedimento estão mostrados na Tabela 2.5.

A qualificação do operador é válida para um determinado modelo de máquina e software, possuindo três níveis de qualificação – A, B e C. É necessário um treinamento mínimo de 40 horas envolvendo processo e máquina, incluindo a conclusão bem-sucedida de exames escritos e práticos para comprovar a compreensão de todos os tópicos abordados no treinamento. Além disso, deverá fabricar uma peça que será inspecionada.

Tabela 2.5 - Requisitos de Inspeção e Teste para Qualificação de Máquina e Procedimento para *DED*

	Método de teste	Classe A	Classe B	Classe C
Qualificação de Máquina – <i>Standard Qualification Build</i>	Exame visual	sim	sim	--
	Inspeção Dimensional	sim	sim	--
	Exame Radiográfico	sim	sim	--
	Teste de Densidade	sim	sim	--
	Teste de tração	2	2	--
	Exame Metalográfico	sim	sim	--
Qualificação de procedimento - <i>Preproduction Test Build</i>	Exame visual	sim	sim	sim
	Inspeção Dimensional	sim	sim	sim
	Líquido Penetrante	sim	sim	--
	Radiográfico Exame	sim	sim	--
	Teste de densidade	sim	sim	sim
	Teste de tração (extensão da peça)	3	3	--
	Exame Metalográfico	sim	sim	sim
Análise Química	sim	sim	--	

2.3.2 Atividades do Engenheiro

A figura do engenheiro citada na norma é um indivíduo devidamente designado para agir e responder em nome do proprietário/comprador da peça em todos os assuntos do escopo da norma. Esse engenheiro é o responsável pela elaboração do contrato que rege o componente requerido seguindo a norma. Pode adicionar ou modificar os requisitos da norma para atender aos requisitos particulares de um componente específico. Esse engenheiro deverá especificar nos documentos do contrato, conforme necessário e conforme aplicável os seguintes itens:

- (1) Classificação do componente - Classe A, B ou C;
- (2) Requisitos de projeto para componentes fabricados aditivamente;
- (3) Definir as variáveis essenciais do processo de MA a serem controladas;
- (4) Requisitos de especificação de matéria-prima;
- (5) Propriedade do material e do componente a ser fabricado;
- (6) Conjunto de dados de definição do produto;
- (7) Plano de remoção de amostra de tração para construções de teste de pré-produção;
- (8) Determinação da aceitabilidade da correção em processo;
- (9) Método de inspeção dimensional;
- (10) Aprovação dos planos de inspeção visual e dimensional;
- (11) Inspeção de superfície em qualquer condição que não seja usinada;
- (12) Método alternativo para examinar construções que não podem ser completamente inspecionadas por radiografia;
- (13) Plano de amostragem para construções Classe B;
- (14) Método de teste de análise química;
- (15) Critérios de aceitação para testes de tração;
- (16) Critérios de aceitação para ensaios metalográficos;
- (17) Critérios de aceitação para análise química;
- (18) Critérios de aceitação para teste de densidade;
- (19) Todas as responsabilidades do Engenheiro listadas nas seções subsequentes deste documento; e
- (20) Todos os requisitos adicionais, identificados pelo Engenheiro, que não são especificamente abordados nesta norma.

Resumindo, o cliente para adquirir um componente fabricado por MA, deverá ter um engenheiro responsável pela definição de aplicação (criticidade da peça), projeto, desenho, material, inspeção e critérios de aceitação. Trazendo este cenário para uma empresa, esses critérios obrigam, quase que inevitavelmente, a figura de um engenheiro especialista em MA para que possa especificar corretamente o produto. Para esta pesquisa, que tem foco na fabricação de um produto já padronizado, torna esta etapa de especificação do contrato menos onerosa.

2.3.3 *Fabricação*

Para a fabricação propriamente dita, o fabricante além de ter os requisitos de procedimento, máquina e operador supracitados, é necessário ter um plano de controle digital (rastrear os arquivos digitais); Uma lista de verificação de manutenção de pré-produção e calibração; ter um plano documentado para identificar a matéria-prima e de construção de substratos usados para a fabricação de componentes de MA; registrar todas as interrupções do

processo planejadas e não planejadas; possíveis correções em processo; inspecionar e verificar aceitação do componente fabricado; e realizar o pós-processamento de acordo com a AMPS.

O pacote final de registros para componentes fabricados de acordo com a *AWS D20.1* deve incluir:

1. Conjunto de dados de definição do produto;
2. Especificação, lote e certificação do material da plataforma de construção e da matéria-prima;
4. Dimensões da plataforma de construção;
5. Modelo de construção;
6. Registro de Qualificação de Máquina - MQR;
7. Registro de Qualificação de Procedimento - PQR;
8. Especificação de Procedimento de Manufatura Aditiva – AMPS;
9. Registros de fabricação, para incluir;
 - a. Interrupções de construção planejadas;
 - b. Intenções de construção não planejadas;
 - c. Correções em processo;
 - d. Variáveis de pós-processamento;
10. Registros de inspeção;
11. Registros de Qualificação de Operador de Máquina MA;
12. Plano de Controle de Calibração; e
13. Plano de Controle Digital.

Cada componente fabricado (*Productions build*) deverá ser submetidos a ensaios não destrutivos que estão listados na

Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Requisitos de Inspeção e Teste para Componentes de produção para MADA

Método de teste		Classe A	Classe B	Classe C
Componente Fabricado - Build production	Exame visual	sim	sim	sim
	Inspeção Dimensional	sim	sim	sim
	Líquido Penetrante ou Partícula Magnética	sim	sim	sim
	Radiográfico Exame	sim	sim	--
	Teste de densidade	sim	sim	--

2.3.4 Requalificação de Procedimento, Máquina ou Ambos

As mudanças das variáveis essenciais dos processos de fabricação podem requerer a requalificação do procedimento, da máquina ou de ambos. Os itens da Tabela 2.7 marcados como "M" requer a requalificação apenas da máquina de *MA*. Os itens marcados como "P" requerem a requalificação apenas do procedimento de *MA*, e os itens marcados como "PM" requer a requalificação da máquina de *MA* e do procedimento de *MA*.

Tabela 2.7 - Variáveis de Qualificação para Processos de Deposição de Energia Dirigida

Definições de Projeto	GMA-DED
<u>(1) Construção do modelo.</u> Qualquer alteração no modelo de compilação.	P
<u>(2) Classificação dos componentes.</u> Qualquer aumento na classificação do componente (ou seja, de Classe C para Classe B ou Classe A, ou de Classe B para Classe A).	PM
Materiais	GMA-DED
<u>(1) Especificação e classificação da matéria-prima.</u> Qualquer mudança na especificação e classificação da matéria-prima (por exemplo, grupo, tipo e/ou classe), forma ou processo de fabricação da matéria-prima.	PM
<u>(5) Diâmetro do fio.</u> Qualquer alteração no diâmetro do fio especificado em $\pm 5\%$.	PM
<u>(6) Especificação e classificação do material da plataforma de construção.</u> Qualquer mudança na especificação ou classificação do material da plataforma de construção (por exemplo, grupo, tipo e/ou classe) ou forma.	P
<u>(7) Espessura da plataforma de construção.</u> Uma mudança na espessura da plataforma de construção em $\pm 10\%$.	P
<u>(9) Taxa de alimentação do arame.</u> Qualquer alteração na taxa de alimentação de arame programada em $\pm 5\%$.	PM
Máquina	GMA-DED
<u>(1) Localização da Máquina.</u> Qualquer movimento físico da localização da máquina.	P
<u>(2) Fabricante e modelo da máquina.</u> Qualquer alteração no fabricante ou modelo da máquina.	M
<u>(3) Versão do software da máquina.</u> Qualquer alteração na versão do software da máquina que afete qualquer variável de qualificação listada na Tabela 5.3.	M
<u>(4) Número de série da máquina.</u> Uma mudança da máquina documentada no MQR para qualquer outra máquina.	M

Tabela 2.8 - Variáveis de Qualificação para Processos de Deposição de Energia Dirigida
(continuação)

<u>(5) Subcomponentes do equipamento principal.</u> Uma mudança nos principais subcomponentes do equipamento, como hardware de PC, fornecimento de energia, sistema de automação ou fornecimento de material.	M
Ambiente	GMA-DED
<u>(1) Temperatura de pré-aquecimento da plataforma de construção.</u> Qualquer alteração na temperatura de pré-aquecimento da plataforma de construção especificada	PM
<u>(2) Temperatura de interpasse.</u> Qualquer alteração programada que resultaria em um desvio na temperatura máxima de interpasse.	P
<u>(3) Composição do gás de proteção.</u> Uma mudança na composição nominal especificada do gás de proteção.	PM
<u>(5) Taxa de fluxo do gás de proteção.</u> Qualquer alteração na taxa de fluxo maior que $\pm 10\%$.	P
<u>(6) Proteção de gás suplementar.</u> A adição ou exclusão de proteção suplementar de gás.	P
<u>(7) Composição do gás de abastecimento.</u> Uma mudança na composição nominal de suprimento de gás especificada, seja para uma câmara de construção ou para um bico de suprimento.	PM
<u>(9) Enclausuramento do ambiental.</u> Uma mudança no hardware e na configuração do gabinete enclausurado.	M
<u>(10) Limpeza entre passes.</u> Qualquer alteração nos métodos de limpeza entre passagens.	P
Características da Fonte de Calor	GMA-DED
<u>(1) Entrada de calor.</u> Qualquer mudança programada para parâmetro que afeta a entrada de calor	P
<u>(2) Características do pulso.</u> Qualquer alteração na frequência de pulso ou forma de onda.	PM
<u>(3) Pulsação.</u> Introdução ou retirada de controle pulsante ou de forma de onda.	PM
<u>(5) Uso de fio energizado ("quente").</u> Uma mudança do uso de fio energizado para fio não energizado ou vice-versa.	PM
Características de Deposição	GMA-DED
<u>(1) Velocidade de deslocamento.</u> Qualquer alteração na velocidade de deslocamento programada	P
<u>(2) Estratégia de varredura.</u> Qualquer mudança na estratégia de varredura	P

Tabela 2.9 - Variáveis de Qualificação para Processos de Deposição de Energia Dirigida (continuação)

<u>(6) Configurações específicas que afetam as condições de construção da borda e da superfície.</u> Qualquer alteração nas configurações usadas para alterar a construção nas bordas e/ou superfícies.	P
<u>(8) Parâmetros de entrega do fio.</u> Qualquer mudança no ângulo de incidência, distância de deslocamento da linha central da fonte de calor ou orientação do caminho.	P
<u>(1) Procedimento de resfriamento pós-construção.</u> Qualquer alteração no procedimento de resfriamento pós-construção que afete a taxa de resfriamento.	P
<u>(2) Tratamento térmico pós-construção.</u> Qualquer alteração no tempo nominal de tratamento térmico pós-construção e valores de temperatura.	PM
<u>(3) Prensa isostática a quente (HIP).</u> A adição ou exclusão de HIP, ou qualquer alteração nos valores nominais de temperatura, pressão e tempo de HIP.	PM
<u>(4) Tratamento de superfície.</u> A adição ou alteração de qualquer tratamento de superfície pós-construção (por exemplo, <i>peening</i>).	P
<u>(5) Acabamento superficial.</u> A eliminação ou alteração do método de acabamento superficial (por exemplo, usinagem, retificação).	P

A Tabela 2.7 é imprescindível para a avaliação dos custos de fabricação, haja vista que para qualquer mudança de peça, mesmo que a geometria seja muito próxima, necessitará ao menos uma requalificação de procedimento, dependendo da variável necessitará a requalificação de procedimento e máquina. Portanto, inevitavelmente para cada peça haverá um documento de qualificação de procedimento com ensaios que estão contidos na Tabela 2.5 e inspeção final que estão contidos na

Tabela 2.6.

2.3.5 Critérios de Aceitação

Todos os ensaios destrutivos e não destrutivos, salvo especificação em contrário, devem ocorrer na mesma condição de pós-processamento (por exemplo, tratamento térmico) que o componente que representa. Os critérios de aceitação para descontinuidades são baseados no tipo de descontinuidade, posição e classe. A dimensão de qualquer descontinuidade deve ser

definida pela sua maior dimensão. Duas ou mais descontinuidades devem ser tratadas como uma quando o espaçamento entre elas for menor que a dimensão da descontinuidade maior. As descontinuidades que serão removidas na usinagem subsequente não serão motivo de rejeição.

As peças de qualificação (máquina e procedimento) e os componentes de produção serão aceitáveis se satisfizerem as condições da Tabela 2.10. Componentes que não atendam a esses requisitos devem ser rejeitados e/ou enviados ao engenheiro para avaliação.

Tabela 2.10– Critérios de aceitação em mm, sendo T a menor dimensão entre superfícies opostas através da descontinuidade

Descontinuidade	Classe A	Classe B	Classe C
Trincas	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Sobreposições	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Fusão incompleta	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Porosidade - Superfície	Classe A	Classe B	Classe C
Dimensão máxima	0,25T ou 0,76, o que for menor	0,33T ou 1,50, o que for menor	0,5T ou 2,30, o que for menor
Mínimo Espaçamento	8 vezes maior poro	4 vezes maior poro	2 vezes maior poro
Comprimento acumulado em qualquer máximo de 75 mm (poros dentro de 1,5 mm de uma linha central)	1T ou 3,0, o que é 1,33	1.33T ou 6,0, o que for menor	2T ou 9,0, o que for menor
Porosidade - Subsuperfície	Classe A	Classe B	Classe C
Dimensão máxima	0,33T ou 1,50, o que for menor	0,5T ou 2,30, o que for menor	Não aplicável
Espaçamento mínimo	4 vezes maior poro	2 vezes maior poro	Não aplicável
Comprimento acumulado em qualquer máximo de 75 mm (poros dentro de 1,5 mm de uma linha central)	1.33T ou 6,0, o que for menor	2T ou 9,0, o que for menor	Não aplicável
Inclusões	Classe A	Classe B	Classe C
Dimensão máxima	0,33T ou 1,50, o que for menor	0,5T ou 2,30, o que for menor	Não Aplicável
Mínimo Espaçamento	4 vezes maior inclusão	2 vezes maior inclusão	Não aplicável
Comprimento acumulado em qualquer máximo de 75 mm (poros dentro de 1,5 mm de uma linha central)	1.33T ou 6,0, o que for menor	2T ou 9,0, o que for menor	Não aplicável
Abertura de arco/goivas	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Cor para titânio	Não colorido além de prata brilhante	Não colorido além de prata brilhante	Não colorido, exceto Prata brilhante
Cor para aço, aço inoxidável e ligas à base de níquel	Não é preto	Não é preto	Não é preto

Os critérios de aceitação para os ensaios de tração são baseados no limite de escoamento, resistência máxima e alongamento até a falha, conforme especificado pelo Engenheiro, que geralmente é definido pelo material. Para os ensaios metalográficos, além da inspeção de descontinuidades definidas na Tabela 2.10 na condição como polida, o engenheiro deverá especificar critérios de aceitação para atributos microestruturais. Exemplos de categorias de critérios de aceitação são tamanhos e forma do grão e conteúdo e distribuição da fase. Os valores de composição química do material, devem ser estabelecidos pelo engenheiro, a referência é tomada como a especificação do material. Os valores de teste de densidade devem ser estabelecidos pelo engenheiro e devem ser usados para aceitação da densidade.

A *AWS D20.1* deixa claro que norma representa a experiência coletiva do comitê e, embora algumas disposições possam parecer excessivamente conservadoras para algumas aplicações, elas podem ser muito liberais em outras. O engenheiro assume a responsabilidade de aplicar esta especificação em uma determinada situação de projeto e modificar os requisitos para alcançar o desempenho desejado a um custo razoável sem correr riscos indevidos.

2.4 Requisitos dimensionais – *ASME B16.5*

Serão discutidos nesta secção os principais pontos da *ASME B16.5* que são concordante/discordante para a fabricação de um flange via *GMA-DED*. Para os pontos onde têm pouca ou nenhuma influência, ver diretamente na *ASME B16.5*. A norma é restrita a flanges fundidos ou forjados, mas como o objetivo central deste trabalho é pesquisar novos métodos de fabricação via MA, a *ASME B16.5* será adotada como base para o dimensionamento, tolerâncias e ensaios.

O Capítulo 2 da *ASME B16.5* trata das classificações de pressão-temperatura de trabalho máximas permitidas numa determinada temperatura em função do material aplicado e de sua designação de classe. A designação nominal do material do flange a ser fabricado por *GMA-DED* é o Forjado 2¼Cr - 1Mo.

O Capítulo 5 da *ASME B16.5* aborda assuntos relacionados aos materiais dos componentes, sendo que para as especificações da *ASTM* aplicável bem como o grau e a classe de material para cada designação nominal, no caso em questão para o forjado com designação 2¼Cr - 1Mo aplica-se a *ASTM 182* – Grau F22 – Classe 3. A norma *ASTM 182* será discutida na subsecção seguinte.

A secção 5.1(a) da *ASME* 16.5 não permite a montagem de várias peças no produto acabado por soldagem ou outro meio. A peça depositada por *GMA-DED* é inteiramente depositada por “soldagem”, este requisito é voltado para os problemas que a soldagem pode trazer ao material. Portanto, deve-se investigar as zonas afetadas pelo calor que podem acarretar propriedades mecânicas diferentes em diferentes regiões (anisotropia), e este aspecto será estudado mais adiante.

A secção 5.1. da *ASME B16.5* determina que o forjado deve ser acabado a partir de uma peça que é trazida o mais próximo possível da forma e tamanho acabados por uma operação de trabalho a quente compressivo que consolida o material para produzir uma estrutura essencialmente forjada, e deve ser assim processado durante a operação para causar fluxo de metal na direção mais favorável para resistir ao estresse encontrado em serviço. Do ponto de vista desta pesquisa, este é o requisito mais importante, pois a MADA não irá conferir ao produto acabado uma estrutura de forjado. A questão é saber se uma estrutura como depositada (*as build*) possui propriedades aceitáveis para uma operação, tratando-se de um novo estado de um produto acabado, chamado de “como depositado” que é previsto em normas de MA. A Secção 5.1.1 da *ASME B16.5* salienta que a possibilidade de deterioração do material em serviço deve ser considerada pelo usuário. O flange em questão não possui requisitos para corrosão, mas é um aspecto importantíssimo a ser considerado em peça feitas por MADA.

A secção 5.1.2 da *ASME B16.5* chama atenção aos materiais que sofrem diminuição da tenacidade quando usados em baixas temperaturas, mas não possuem nas normas *ASME B16.5* e *ASTM* 182 requisitos para impacto, haja vista que estes materiais comumente não trabalham em baixas temperaturas. Entretanto uma especificação técnica interna da Petrobras cita:

“I-ET-5000.00-0000-500-PPC-001 - REQUISITOS ADICIONAIS PARA AÇOS DE BAIXA LIGA CrMo E CrMoV

2.1.3.4 Testes de impacto

Um conjunto de três testes de impacto de entalhe em V charpy, de acordo com ASTM A370, deve ser executado na direção transversal a ½ da espessura da placa de ambas as extremidades de cada placa testada. Para espessuras acima de 100 mm, amostras adicionais devem ser retiradas com ¼ e ¾ de espessura.

Os ensaios devem ser conduzidos a -18 °C para 1,25Cr-0,5Mo e a -30 °C para 2,25Cr-1Mo e 2,25Cr 1Mo-V, com valor médio de 40 ft·lb (55J) sem valor individual abaixo 35 pés·lb (47J)”

Desta forma, pede três testes de impacto de entalhe em V Charpy, de acordo com *ASTM* A370, a -30 °C para 2,25Cr-1Mo, com o valor médio de 55 J sem valor individual abaixo 47 J. Para este trabalho foi avaliado a questão da tenacidade a baixa temperatura.

A secção 5.2 da *ASME B16.5* aborda sobre as propriedades mecânicas que será detalhada mais adiante, inclusive as disposições dos corpos de prova, bem como o tratamento térmico. Ambos os requisitos exigidos pela *ASTM 182*.

Por fim, o Capítulo 6 da *ASME B16.5* trata-se das dimensões do flange. A fabricação do flange por *GMA-DED* não interfere no dimensional, portanto, o dimensional será igual ao exigido por norma. O flange de pescoço se encaixa na Secção 6.4, um flange com face sobressalente (*Raised Facings*) de 2 mm. A Figura 2.8 apresenta o desenho técnico do Flange.

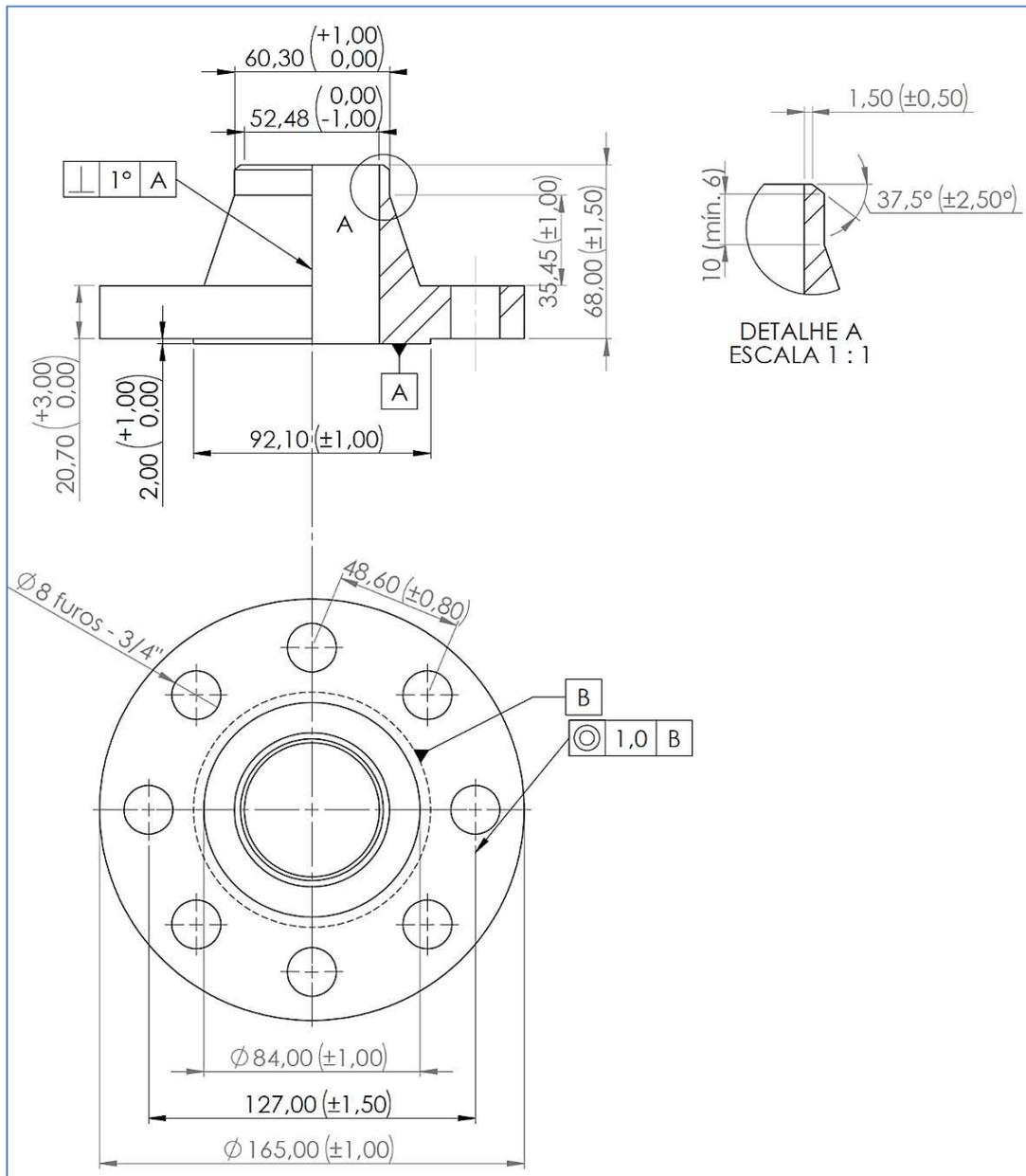


Figura 2.8– Desenho Técnico do Flange NPS 2 – classe 300

2.5 Requisitos de Material – ASTM A182

O Flange forjado com designação 2¼Cr - 1Mo tem como norma aplicável a *ASTM A182* – Grau F22 – Classe 1 ou 3. Serão discutidos nesta secção os principais pontos da *ASTM A182* que são concordantes/discordantes em termos de materiais do flange fabricado via *GMA-DED*. Para os pontos onde têm-se pouca ou nenhuma influência, ver diretamente na *norma*.

O Capítulo 5 da *ASTM A182* ressalta a necessidade de conformidade com a *ASTM 961* (*Standard Specification for Common Requirements for Steel Flanges, Forged Fittings, Valves, and Parts for Piping Applications*).

O Capítulo 6 da *ASTM A182*, diz a respeito da fabricação incluindo a fundição, forjamento, trabalho a quente e usinagem de componentes a partir de barras. Como dito anteriormente, a fabricação de flanges via *GMA-DED* não irá produzir uma estrutura essencialmente que é produto de uma operação plástica substancialmente compressiva que consolida o material e produz a forma desejada. Destaca-se neste capítulo que nenhum tipo de flange (roscado, sobreposto, pescoço, cegos etc.) podem ser usinados diretamente a partir de barras convencionais.

O Capítulo 7 da *ASTM 182* é sobre tratamento térmico para cada material. O caso em questão o material é normalizado e revenido conforme a Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Tratamento térmico requerido para o material *ASTM 182 F22 Cl. 3*

Classe	Classe 3
Tratamento térmico	Normalizado e Revenido
Temperatura de Austenitização (°C)	Mín. 900
Meio de resfriamento	Ao ar
Temperatura de Revenimento (°C)	Mín. 675

O Capítulo 8 *ASTM 182* trata da composição química de cada grau de material, para o F22 classe 3 (designação 2¼Cr - 1Mo) conforme a Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Composição química para o material *ASTM 182 F22 Classe 3*

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Fe	Cu
[%]	0,05-0,15	0,30-0,60	0,04	0,04	0,50	--	2,00-2,50	0,87-1,13	rest.	--

O Capítulo 9 *ASTM* 182 diz a respeito das propriedades mecânicas dos produtos acabados. Os corpos de prova foram retirados a partir de flanges depositados, embora a norma permita a retirada de corpos de provas a partir de extensões (*Metal buffers*).

Tabela 2.13 – Propriedades mecânicas para o material *ASTM* 182 F22 Cl. 3

Limite de Resistência a Tração (MPa)	Mín. 515
Limite de Escoamento (MPa)	Mín. 310
Alongamento em 50 mm ou 4D (%)	Mín. 20
Redução da área (%)	Mín. 30
Dureza (HB)	156-207

A secção 9.5 da *ASTM A182* diz que para cada fornada (“*heat treatment charge*”) dentro de cada corrida (“*heat*”) é necessário um ensaio de tração. Entretanto três ensaios de tração já são requeridos para a qualificação do procedimento na *AWS D20.1* para as classes A e B.

2.6 O Acúmulo de Calor e suas Consequências

2.6.1 O Acúmulo de Calor

Conforme mencionado por Da Silva *et al.* (2020), o acúmulo de calor em MA pode ser entendido como o resultado da dificuldade da dissipação de calor da pré-forma em função da constante entrada de calor no sistema. Esses autores propuseram um modelo simplificado do balanço de calor em uma típica deposição de material por *DED*, conforme a Figura 2.9. De acordo com Zhao *et al.* (2011) e Yang *et al.* (2017), o acúmulo de calor se intensifica à medida que o número de camadas aumenta, ou seja, quando a pré-forma se torna mais alta.

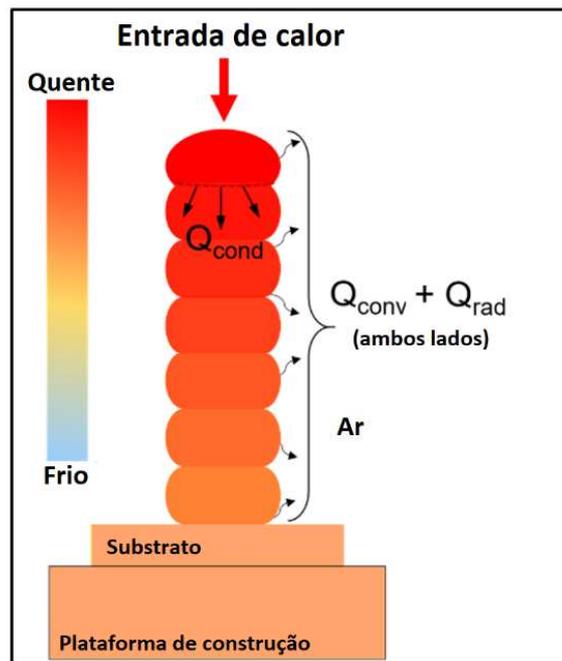


Figura 2.9 - Modelo simplificado do balanço de calor para uma típica deposição de material por *DED*, onde: Q_{cond} = condução de calor; Q_{conv} = calor de convecção; Q_{rad} = radiação térmica (adaptado de DA SILVA *et al.*,2020)

Yang *et al.* (2017) avaliaram o processo de *GMA-DED* através de filmagens termográficas e concluíram que com a sucessiva deposição de camadas passa a crescer uma área de elevada temperatura na pré-forma, portanto as camadas construídas, substrato e dispositivos de fixação (grampos, etc.) passam a não ser mais eficientes para dissipar o calor imposto a cada camada depositada.

Vale ressaltar que este fenômeno é diretamente relacionado à geometria da pré-forma, de modo que quanto menor a largura da pré-forma, por exemplo, a condução de calor pela mesma e sua dissipação em direção ao substrato é reduzida. Assim, o comportamento térmico resultante durante a deposição dependerá não apenas da entrada de calor, mas também da geometria da peça, propriedades térmicas e condições circundantes.

A temperatura de interpasse é um fator relevante no acúmulo de calor. Wu *et al.* (2017), em um estudo de *GTA-DED*, demonstram como o acúmulo de calor depende da temperatura de interpasse e aumenta com a deposição das camadas. Como ilustra a Figura 2.10, em deposições sucessivas de material, a temperatura média do substrato experimenta um aumento rápido durante as primeiras passagens da fonte de calor e, em seguida, atinge um valor de equilíbrio. Em contraste, a temperatura de interpasse continua a subir ao longo das demais camadas (menor dissipação de calor). Assim, durante a construção, a diferença das temperaturas de interpasse

subsequentes determina o acúmulo de calor na pré-forma, sendo que este aumenta quase que linearmente com o número de passes de deposição.

A Figura 2.11 ilustra o histórico térmico típico de três camadas durante uma deposição por *DED*. Segundo Dass e Moridi (2019), a temperatura de pico observada também é um sinal da ocorrência do acúmulo de calor.

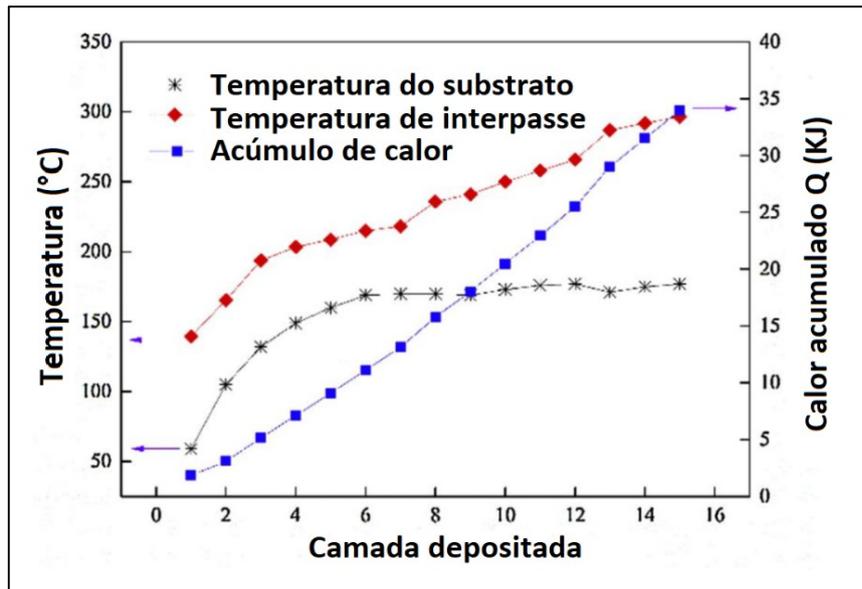


Figura 2.10 - Evolução do acúmulo de calor e da temperatura de interpasse com a deposição das camadas em *GTA-DED* (adaptado de WU *et al.*, 2017)

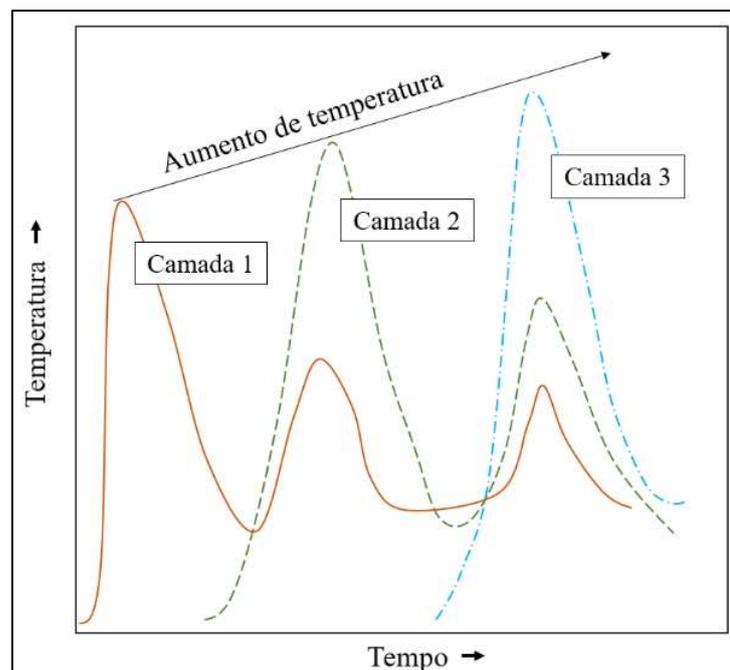


Figura 2.11 - Comportamento dos ciclos térmicos em três camadas consecutivas durante um processo *DED* (adaptado de DASS, MORIDI, 2019)

Para fins de exemplo da importância de medir e gerenciar a temperatura de interpasse, como ilustra a Figura 2.12, temperaturas de interpasse instáveis ou não bem controladas, decorrentes de uma deposição sem interrupções sem qualquer abordagem efetiva de gerenciamento térmico, podem levar consequências prejudiciais à geometria das pré-formas.

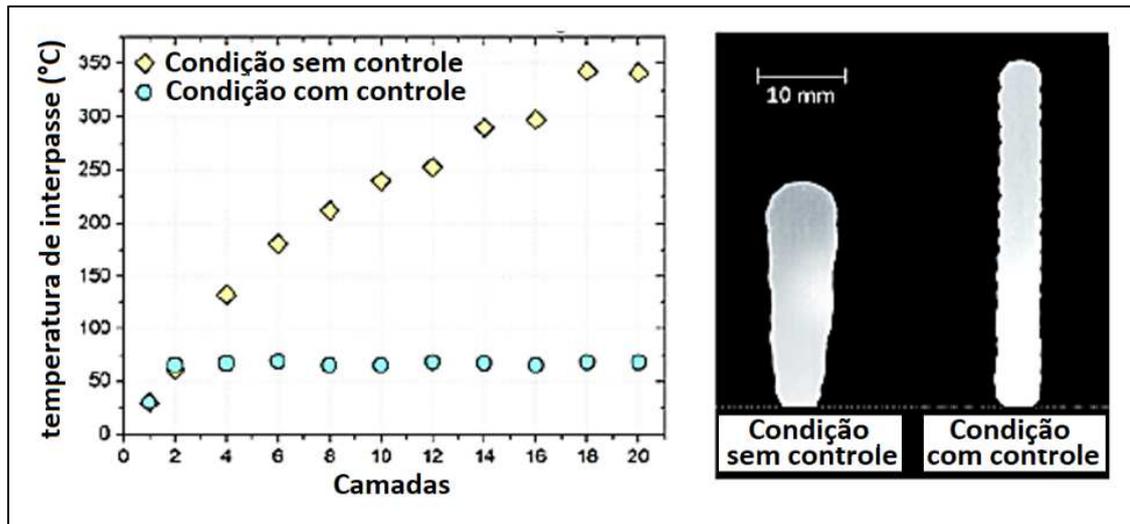


Figura 2.12 - Temperatura média de interpasse à frente da poça e perfil geométrico de paredes de liga de alumínio obtidas com *GMA-DED* sob pirometria infravermelha com abordagens de temperatura de interpasse controladas e não controladas (Da SILVA *et al.*, 2019)

A irregularidade de forma das camadas depositadas determinará a quantidade de passes de usinagem para a conclusão do produto. Vale resgatar que um termo amplo, derivado do *buy-to-fly* (comprar-para-voar) da indústria aeroespacial, denominado *buy-to-apply* (comprar-para-aplicar), que mede a razão entre massa de matéria-prima necessária para construir a pré-forma e massa final da peça aplicada após usinagem, resume bem a importância de se obter pré-formas com boa regularidade. Pré-formas com melhor regularidade resultam em maior volume efetivo, ou seja, em maior aproveitamento do volume de material depositado para a geometria das peças.

2.6.2 Consequências do Acúmulo de Calor

A alta taxa de deposição, típica vantagem da *GMA-DED* e de outros processos *DED*, implica em um alto aporte de energia térmica, o que resulta em provável acúmulo de calor que pode então comprometer a qualidade pré-forma sob diferentes aspectos. O acúmulo de calor é atestado como um fator crítico que influencia a estabilidade do processo de construção em termos de geometria, defeitos de deposição, evolução microestrutural e propriedades mecânicas das pré-formas obtidas, impactando diretamente sobre a qualidade da peça.

O aumento exacerbado da temperatura e um fluxo de calor limitado podem também causar um crescimento indesejável no tamanho de grão da pré-forma, deteriorando seu desempenho mecânico em aplicações gerais. Henckell *et al.* (2017) corrobora este aspecto, citando que as pré-formas podem sofrer com grãos grosseiros e em constante crescimento ao longo do processo de construção. Assim, o calor excessivo pode levar à formação de grandes grãos colunares que crescem na direção da altura da pré-forma; grãos finos e equiaquiais conferem maior resistência mecânica de forma isotrópica (com igualdade de propriedades em todas as direções) em operações próximas da temperatura ambiente, situação de trabalho da maioria dos componentes metálicos. As microestruturas finais e a integridade do material definem as propriedades mecânicas resultantes. Mais detalhes sobre como o acúmulo de calor pode levar a microestruturas mais grosseiras podem ser vistos em Zhang *et al.* (2019).

Segundo Lei *et al.* (2018), componentes fabricados via MADA passam tipicamente por muitos ciclos de reaquecimento, resultando em um complexo comportamento térmico de interação entre o passe de deposição atual e os anteriores (com consequência sobre a microestrutura formada). Além disso, a mesma fonte ressalta que este comportamento térmico pode ser significativamente afetado por muitos parâmetros do processo de fabricação. Temperatura de pré-aquecimento do substrato, sequência de deposição e tempo de interpasse, por exemplo, são listados por afetarem os ciclos térmicos e interferirem na distribuição de temperatura e microestrutura formada. Suryakumar *et al.* (2013) mostra que durante construção com *GMA-DED* a carga térmica periódica produz valores de dureza não homogêneos com o aumento da altura na pré-forma.

A geração de temperaturas muito elevadas na pré-forma em construção pode causar também sua oxidação excessiva, resultando em fragilidade mecânica devido a inclusão de óxidos (perda de ductilidade, de resistência à fadiga, etc.) e/ou dificuldades na etapa de usinagem pela possível elevada dureza dos óxidos formados. Wu *et al.* (2017), avaliando a manufatura aditiva com processo *GTA-DED*, relatam que a oxidação aumenta devido ao acúmulo de calor com o aumento da altura de construção na pré-forma.

Nos processos *DED*, e assim também em MADA, a solidificação do material e os intensos ciclos térmicos afetam diretamente a microestrutura das ligas depositadas, o que por sua vez afeta as propriedades mecânicas. Cunningham *et al.* (2018) apontam a tendência à formação de grãos colunares grandes que apesar de vantajosos em aplicações com requisitos de resistência à fluência, em geral são associados a menor resistência à tração, ao impacto e à corrosão, quando comparados a uma microestrutura equiaxial mais refinada. O crescimento de

grão ocorre preferencialmente nas orientações cristalográficas correspondentes ao máximo gradiente térmico.

Ainda, especialmente com processo *GMA-DED*, é destacado que elevados aporte de energia e altas taxas de deposição de material muitas vezes degradam a qualidade superficial das pré-formas, além de provocarem elevadas tensões e distorções térmicas. O descontrole no acúmulo/dissipação de calor leva também a gradientes térmicos variados, que, por sua vez, geram campos de tensões térmicas, que podem culminar em distorções da pré-forma e/ou permanecer na mesma como tensões residuais.

Segundo Soul e Hamdy (2012), além de ocorrerem em nível macroscópico, por consequência de aquecimento e resfriamento não uniformes, as trincas geradas termicamente podem ser também microscópicas pelo desajuste dos coeficientes de expansão e contração térmica entre diferentes fases formadas.

As irregularidades geométricas incorrem diretamente da dificuldade de se controlar a poça de fusão de maneira estável sobre camada anterior, principalmente em deposições sobre pré-formas altas e estreitas e com elevado aporte de energia e/ou de massa. Wang *et al.* (2016) salientam inclusive que a poça de fusão cresce à medida do avanço do número de passes de deposição (camadas), o que é justificado pelo acúmulo de calor com o aumento de altura da pré-forma (restrição do fluxo de calor no sentido do substrato). A mesma referência atesta a diferença entre as fases formadas entre diferentes camadas, o que resulta em heterogeneia da pré-forma quanto a propriedades mecânicas.

Apesar dessas possíveis intercorrências negativas para a qualidade das pré-formas fabricadas por MADA, geralmente, para se obter maior produtividade, faz-se necessário operar com maior aporte de energia e/ou de massa, o que pode agravar ainda mais os problemas com o acúmulo de calor. Henckell *et al.* (2017) citam que o aumento de energia da fonte de fusão-deposição afeta negativamente a largura da pré-forma e aumenta o trabalho seguinte na etapa de usinagem, e que propriedades mecânicas homogêneas, incluindo elevada resistência à tração, só poderiam ser alcançadas com baixos aportes de energia. E ainda, segundo a mesma referência, fontes de energia para manufatura aditiva operando com altas taxas de deposição de material geram temperaturas muito elevadas e vaporizam parte do material fundido, formando vapores e fumos metálicos, geralmente tóxicos, que são liberados no ambiente de trabalho.

Assim, na manufatura aditiva de pré-formas e peças metálicas, a falta de controle do processo de solidificação e cristalização do material dificulta obter a geometria e as propriedades mecânicas desejadas. E então, geralmente o que é produzido pode ficar aquém de

satisfazer adequadamente os requisitos para aplicação direta e imediata, tornando a usinagem e tratamentos térmicos mais presentes para as correções necessárias. Logo, para se viabilizar comercialmente a MA com elevado aporte de energia e/ou de massa, que é o caso geral da MADA, é de suma importância promover o gerenciamento térmico da pré-forma, por meio do controle da aplicação, distribuição e remoção do calor durante a construção para controlar a microestrutura e tamanho/tipo de grão formados, as propriedades mecânicas resultantes, mitigar as distorções e tensões residuais, irregularidades de deposição, oxidação, adesão de respingos e até mesmo emissões tóxicas.

2.6.3 Gerenciamento Térmico

Diante dos riscos da não-qualidade da pré-forma fabricada em MADA pela ocorrência do acúmulo de calor, o gerenciamento térmico, ou seja, o planejamento e execução de ações que visem controlar a história térmica das camadas, é fator chave para a obtenção de componentes íntegros e/ou manutenção da produtividade.

Uma das formas de gerenciamento térmico é aguardar pelo resfriamento da camada após cada passe de deposição até uma temperatura adequada antes da execução da próxima camada. Mas isso pode demandar muito tempo, sobretudo em deposições com elevados aportes de energia e/ou de massa, e não seria nada produtivo em termos de velocidade de construção. Essa abordagem de tempo de espera foi explorada por Silva *et al.* (2020) com os processos *CMT* e *CMT-Pulse*, obteve-se bons resultados na deposição, com baixo acúmulo de calor (como ilustra a Figura 2.13), entretanto uma taxa de resfriamento muito baixa pode resultar dos longos tempos de espera para resfriamento e assim ocasionar no crescimento dos grãos ou na formação de fases indesejadas no material da pré-forma.

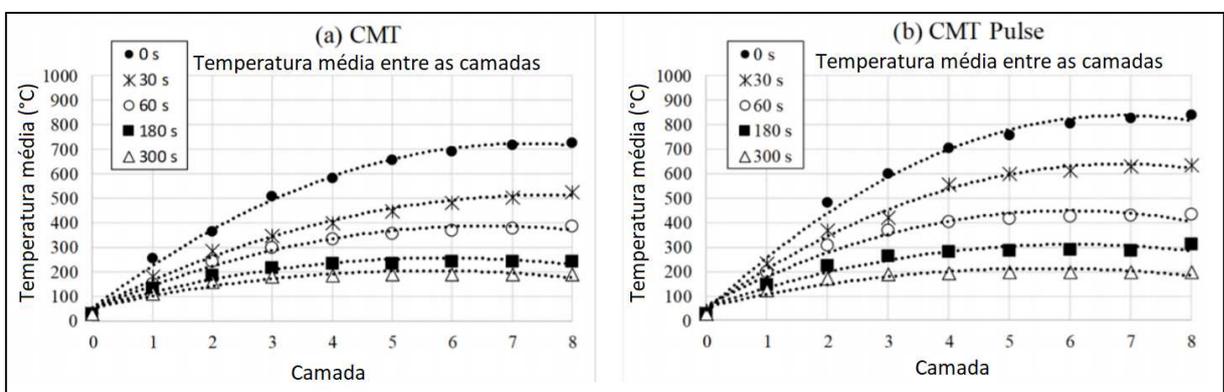


Figura 2.13 - Comparação de temperatura entre camadas para o processo *GMA-DED* com (a) *CMT*; e (b) *CMT-Pulsado* (DA SILVA, 2019)

Existem diferentes abordagens de gerenciamento térmico para manufatura aditiva, seja por meio de resfriamento e/ou aquecimento aplicado a pré-formas e peças, e mesmo para processos de soldagem correlatos, têm sido desenvolvidas com foco na mitigação de problemas relacionados à aplicação localizada e ao acúmulo de calor.

Vale ressaltar que apesar do acúmulo de calor ser mais debatido, pode-se por outro lado querer retardar a taxa de resfriamento das camadas da pré-forma para se chegar a determinada condição microestrutural, por exemplo. Assim, problemas com microestrutura e tamanho/tipo de grão formados, propriedades mecânicas resultantes, distorções, tensões residuais, irregularidades de deposição e oxidação em MADA podem ser contornados, mesmo que parcialmente. Nesse sentido, a questão do gerenciamento térmico tem sido alvo não só de investigação científica, mas também de inovações dado ao volume de patentes relacionadas ao tema.

Em geral é possível classificar as abordagens de gerenciamento térmico para manufatura aditiva como passivas ou ativas. No gerenciamento térmico passivo, o agente de resfriamento e/ou aquecimento atua apenas na plataforma de construção e/ou substrato no período de construção, ou seja, o controle de temperatura da pré-forma ou peça é realizado de maneira indireta através de um elemento intermediário (plataforma de construção e/ou substrato). Já o gerenciamento térmico ativo, em contraste com o passivo, consiste em atuar de maneira acentuada sobre as características da pré-forma ou peça por contato direto, total ou parcial, com o agente de resfriamento e/ou aquecimento, geralmente um fluido, durante o período de construção.

A patente US7326377B2, em uma abordagem de gerenciamento térmico do tipo passiva/indireta para moderar o calor na pré-forma e suas consequências, trata de um sistema para MADA que faz uso de um bloco de extração ou imposição de calor, com circulação interna de fluido ao redor de aletas, acoplado à plataforma de construção (Figura 2.14). Entretanto, como o gerenciamento térmico utilizado é passivo/indireto, existe a limitação da extensão dos efeitos, que ficam restritos a pré-formas de altura reduzida ou a camadas de níveis mais próximos do bloco de controle de temperatura, portanto do substrato.

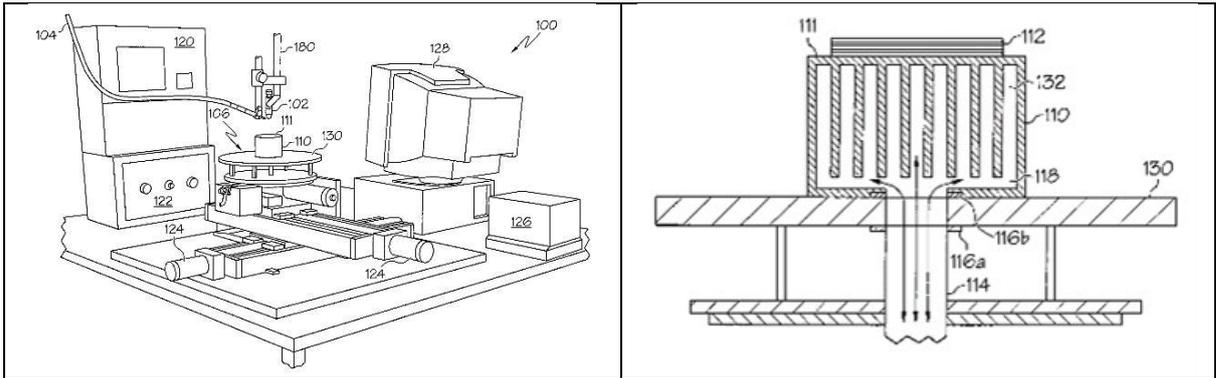


Figura 2.14 - Gerenciamento térmico com bloco de extração ou imposição de calor, com circulação interna de fluido ao redor de aletas acoplado à plataforma de construção para utilização em manufatura aditiva a arco (PATENTE US7326377B2, 2005)

A patente referida em BR1020180153145 é uma técnica de resfriamento ativo para manufatura aditiva por deposição com energia direcionada, preferencialmente com arco elétrico (MADA), conforme indicado na Figura 2.15. O resfriamento ativo da pré-forma (A) é baseado na quase-imersão contínua e controlada da peça em um fluido líquido de resfriamento (B) por todo o período de sua construção dentro de uma cuba (C). Assim, a taxa de resfriamento da parte não imersa da pré-forma pode ser controlada pelo nível da lâmina de fluido (H) e pela troca de calor com sua parte imersa, já em equilíbrio de temperatura com o fluido. Então, com o gerenciamento implementado na pré-forma é possível obter maior produtividade de fabricação e peças com melhores características mecânicas.

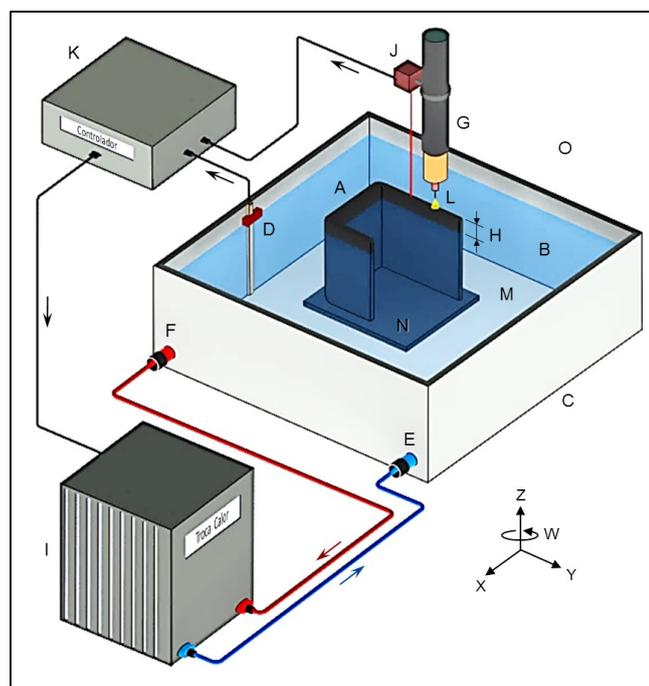


Figura 2.15 - Montagem esquemática básica para funcionamento da técnica de resfriamento ativo por quase-imersão para manufatura aditiva (PATENTE BR1020180153145)

O fluido é preferencialmente água, mas podem ser utilizados outros líquidos puros ou em conjunto com água. A técnica utiliza um sensor de nível (D) e válvulas de entrada (E) e saída (F) para o fluido de resfriamento, as válvulas são acionadas pela subida da tocha (G) ou pela temperatura da pré-forma controlando assim a distância de separação (H). O sistema externo de arrefecimento (I) é responsável pelo bombeamento e filtragem do fluido, cuja temperatura é controlada com base no monitoramento da temperatura da pré-forma por meio de um medidor de temperatura (J). O controlador (K) é responsável pela aquisição e processamentos desses dados.

A invenção é concebida para operar com circulação do fluido, mas não exclui a opção de apenas inundar gradativamente a cuba (C) de construção para promover o resfriamento ativo/direto, contínuo e rápido da pré-forma à medida do aumento de sua altura. Segundo seus inventores, o foco desta invenção é atuar na mitigação de problemas relacionados ao acúmulo de calor e ao mesmo tempo preservar ou mesmo aumentar a produtividade da manufatura aditiva por fusão-deposição de material a arco elétrico (MADA) com metal de adição na forma de arame e/ou pó em todas as suas variantes e técnicas, mas não exclui a aplicação para outras fontes de energia, como, por exemplo, na manufatura aditiva por Laser-DED.

A Figura 2.16 tem mais detalhes da invenção descrita na patente BR1020180153145. O fluido vai subindo continuamente à medida que a peça é depositada, e este efeito e seus benefícios, bem como outros efeitos favoráveis, são mantidos em todos os passes de deposição e camadas, não importando a altura da pré-forma construída. A taxa de resfriamento da pré-forma (A) é regulada também pela capacidade e condutividade térmicas do mesmo. A capacidade térmica dá a medida do poder do fluido líquido de armazenar calor retirado da pré-forma. Já a condutividade térmica dá a medida do poder do fluido de dissipar o calor armazenado da pré-forma (A). Para fins de comparação a Figura 2.17 apresenta a abordagem de resfriamento convencional (natural). Neste caso, tanto a pré-forma (A) quanto o substrato (N) e a plataforma de construção (M) são resfriados apenas pela atmosfera de deposição (O) circundante e gasosa e isso pode demandar bastante tempo de espera entre os passes de deposição para se manter determinada temperatura de interpasse para certo controle de características da pré-forma (A), comprometendo a produtividade pela diminuição da velocidade de construção. Ainda para fins de comparação a Figura 2.18 apresenta a abordagem de resfriamento passivo/indireto da pré-forma, ou ativo/direto apenas para a plataforma de construção (M) e/ou substrato (N). Neste caso o fluido retira calor indiretamente da pré-forma à medida que promove o resfriamento direto da plataforma de construção (M) e/ou substrato

(N) abaixo. Como o nível do fluido não sobe à medida que a peça é depositada, os efeitos do resfriamento passivo/indireto se restringem a pré-formas de baixa altura ou a passes de deposição e camadas iniciais.

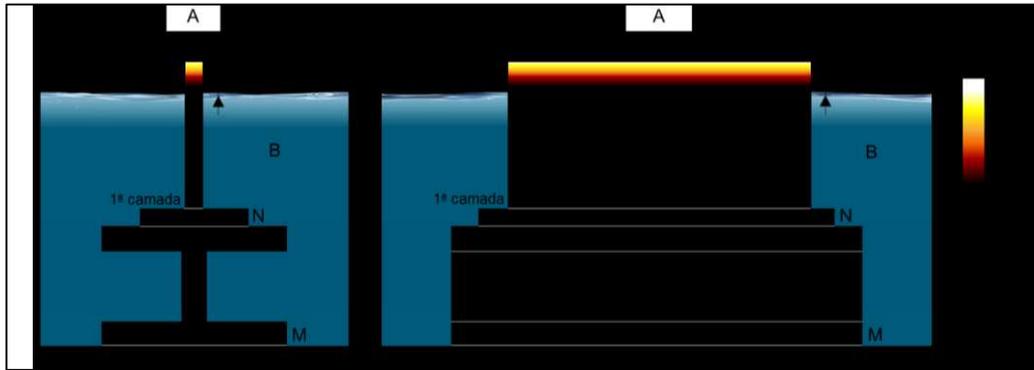


Figura 2.16 - Seção transversal e longitudinal da representação da distribuição de temperatura em pré-forma simples (parede com camadas de passe único de deposição) durante a manufatura aditiva com resfriamento ativo por quase-imersão (PATENTE BR1020180153145)

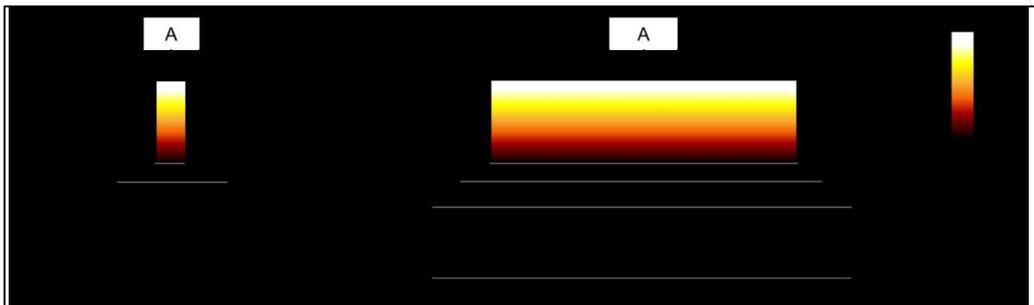


Figura 2.17 - Seção transversal e longitudinal da representação da distribuição de temperatura em pré-forma simples (parede com camadas de passe único de deposição) durante a manufatura aditiva com resfriamento convencional (natural) (PATENTE BR1020180153145)

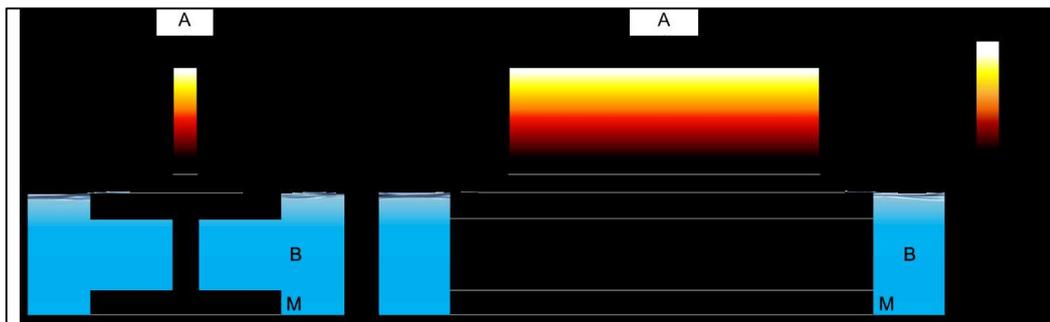


Figura 2.18 - Seção transversal e longitudinal da representação da distribuição de temperatura em pré-forma simples (parede com camadas de passe único de deposição) durante a manufatura aditiva com resfriamento passivo/indireto (da plataforma de construção e/ou substrato) (PATENTE BR1020180153145)

Utilizando uma versão simplificada do resfriamento ativo por quase-imersão (batizado pelos autores de RAQI ou *NIAC* do inglês *Near-Immersion Active Cooling*) para fins de prova de conceito, Da Silva *et al.* (2020) demonstram alguns resultados positivos passíveis de serem obtidos em MADA com esta técnica de gerenciamento térmico. A Figura 2.19 mostra imagens termográficas obtidas das pré-formas produzidas (logo após a extinção do arco elétrico) para as três abordagens de resfriamento avaliadas (natural, passiva e *NIAC*).

Nota-se nitidamente, mesmo que em termos qualitativos, que a pré-forma construída com resfriamento ativo/direto (*NIAC*) está com menores níveis de temperatura em quase toda sua extensão, inclusive com a maior parte em temperatura ambiente. Apenas a região próxima ao ponto final de incidência do arco elétrico está mais quente. Isso revela que a subida contínua do nível de água, acompanhando de perto o nível de aporte de energia e de deposição de material durante todo o período de construção, reduz drasticamente o acúmulo de calor na pré-forma, mesmo sem paradas de espera entre os sucessivos passes de deposição (camadas).

Já as pré-formas construídas com resfriamento convencional (natural) ou passivo/indireto exibiram níveis de temperatura elevados em toda extensão. Ou seja, decorrido o tempo de construção, em ambos estes casos houve grande acúmulo de calor. Da Silva *et al.* (2020) também apresentam resultados indicando que a aplicação do *NIAC*, apesar de operar com a lâmina de água próxima ao nível de fusão/deposição (no caso a 15 mm e inclusive com liberação de vapor d'água) não elevou o nível de porosidade em relação às outras abordagens de resfriamento. Além disso, resultados de ensaio de tração indicaram potencial de diminuir a anisotropia de propriedades mecânicas com o uso do *NIAC*. Outras discussões a respeito dessas vantagens e ponderações acerca de suas relações com as condições de deposição de material são dadas em Silva (2019). Mais detalhes da técnica *NIAC* como um todo, incluindo seu desenvolvimento e mais aplicações, podem ser vistos também em Silva (2019).

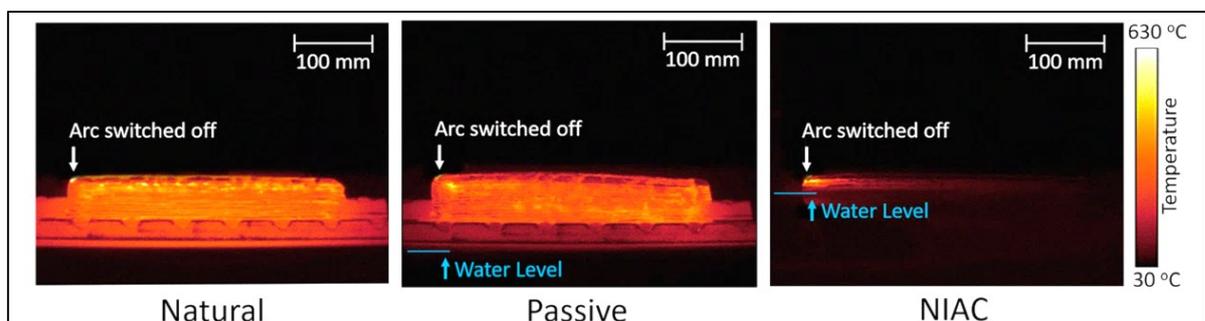


Figura 2.19 - Imagens termográficas obtidas de pré-formas ao final da construção (logo após extinção do arco elétrico) com abordagens de resfriamento Natural, Passivo e *NIAC* (resfriamento ativo por quase-imersão) (DA SILVA *et al.*, 2020)

Todavia, deve-se atentar que uma extração de calor muito rápida e intensa pode trazer intercorrências deletérias como, por exemplo, formação de fases duras e frágeis. Outra particularidade que pode ser favorecida por se buscar uma deposição muito “fria”, tanto por menor calor imposto e/ou por resfriamento mais efetivo, seria a falta de coalescência entre camadas.

Durante a avaliação da geometria de pré-formas, também no trabalho de Scotti *et al.* (2020), que combinaram duas formas de gerenciamento térmico (uma intrínseca ao processo e outra ativa), uma observação mais detalhada das interfaces entre as camadas mostrou descontinuidades diminutas começando logo nos vales de ondulação lateral. Uma visão ampliada de uma região de vale de ondulação, conforme a Figura 2.20, revelou, por sua vez, que a descontinuidade proeminente caracteriza principalmente uma falta de coalescência (I) entre as camadas depositadas. Entretanto, o valor médio da profundidade da falta de coalescência observada com o uso do *CMT-Advanced* combinado ao *NIAC* foi de $0,27 \pm 0,12$ mm, enquanto o máximo foi de 0,6 mm. Segundo os mesmo autores, uma vez que esses níveis de profundidade são relativamente pequenos, se a usinagem fosse feita com o objetivo de aplainar a ondulação da superfície e/ou atingir as dimensões finais da peça, como normalmente ocorre, a remoção de material contendo a falta de coalescências seria, portanto, intrínseca e não aumentaria consideravelmente os valores de tempo e custo.

Porém, segundo alertado por Scotti *et al.* (2020), para aplicações em que seja necessária mais de uma passagem de deposição por camada (estruturas de blocos, por exemplo), essas imperfeições podem permanecer presas internamente e, portanto, impossíveis de serem removidas.

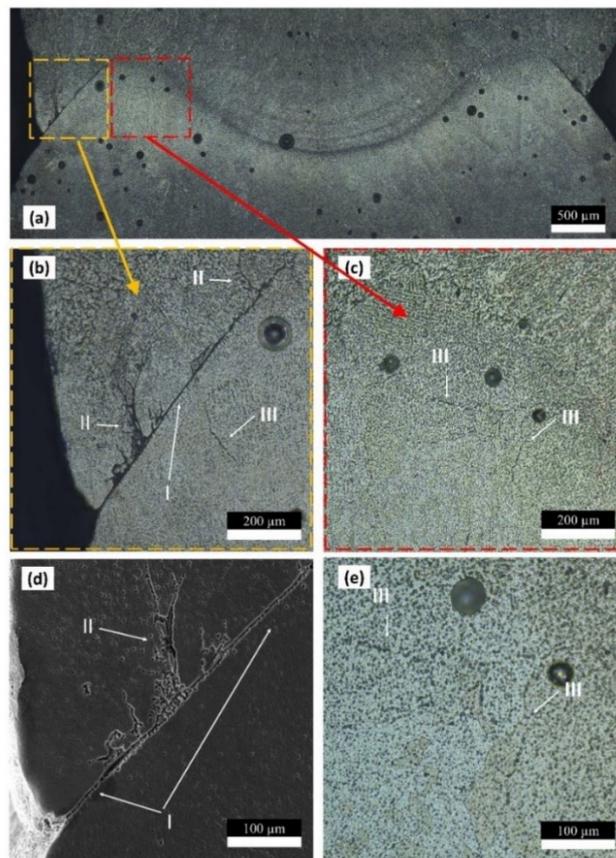


Figura 2.20 - Detalhes das discontinuidades tipicamente encontradas nas regiões de vale de ondulação lateral de pré-formas: (a) vista panorâmica de seção transversal de uma interface entre camadas; (b) microscopia ótica e (d) microscopia eletrônica de varredura, respectivamente, de imagens amplificadas de uma região demarcada da vista (a), onde (I) indica uma falta de coalescência entre as camadas; (c) amplificação de microscopia ótica de outra região demarcada da vista (a), (e) superampliação em microscopia ótica da vista (c) por (SCOTTI *et al.*, 2020):

Cong *et al.* (2017) de fato indicam que, devido aos registros de entrada de calor muito baixos, o processo *CMT Pulse Advanced* não é adequado para construir estruturas de blocos, uma vez que causa discontinuidades de falta de fusão. Em suma, segundo Scotti *et al.* (2020), podem existir casos de MADA e mesmo em outras variantes de manufatura aditiva, em que a necessidade de condições construtivas constantes, inclusive do ponto de vista térmico e seus consequentes efeitos positivos (realizados com o auxílio da técnica *NIAC*), é igualmente ou mais importante do que o objetivo de reduzir a temperatura da camada o máximo possível durante e logo após a deposição, como, respectivamente, poderia ser buscado por meio do parâmetro de processo *CMT Advanced* e do parâmetro de afastamento da lâmina de água da técnica *NIAC*, como foram por eles explorado.

Vale ressaltar, então, que a seleção do processo para MADA e de seus parâmetros, como feito por Scotti *et al.* (2020), é outra forma possível de minimizar o acúmulo de calor pela redução do calor na origem/fonte e assim de buscar menor calor imposto à pré-forma. Pode-se dizer ser esta a razão do apontamento do processo *CMT*, incluindo suas variantes, como uma opção viável para *GMA-DED* devido à capacidade de realizar a transferência metálica com redução do aporte térmico. No entanto, a redução do calor imposto intrínseca ao processo de fusão/deposição utilizado pode ser limitada quando se deseja manter elevadas taxas de deposição, o que pode geralmente trazer junto maior calor imposto. Por esta razão, outra forma concomitante e independente de mitigar o acúmulo de calor, como o *NIAC*, pode ser primordial para combinar qualidade com alta produção.

2.7 Gestão de Estoques

Segundo o dicionário da APICS (*American Production Inventory Control Society*) (2015), o termo estoque se refere itens armazenados de apoio à produção (matérias-primas e itens em processo), de apoio ao suporte (manutenção, reparo, ferramentas e suprimentos operacionais) e de atendimento ao cliente (produtos acabados). E, independentemente do tipo de estoque, tais itens são mantidos por razões econômicas com o propósito de não perder a continuidade de uma operação, seja de fabricação, manutenção ou entrega. Idealmente, quando solicitado, o estoque deve fornecer itens certos e na quantidade necessária.

Os itens usados no suporte às atividades de produção são chamados de suprimentos de manutenção, reparo e operação (MRO), e uma resposta rápida e apropriada aos componentes com falha é o principal objetivo do gerenciamento na operação de manutenção (XU; RODGERS; GUO, 2021). A Equinor, por exemplo, um dos maiores vendedores de petróleo bruto do mundo e o segundo maior exportador de gás natural para a Europa, possui um estoque de cerca de 200.000 itens de peças sobressalentes em vários locais espalhados na região escandinava (GUAJARDO *et al.*, 2015). Uma das principais áreas de pesquisa de estoque nas últimas décadas é aquela relacionada à gestão de estoques de peças de reposição (PORRAS; DEKKER, 2008).

Para facilitar a definição das políticas de controle de estoque, Kelly (2006) classificou as peças sobressalentes ou de reposição, de acordo com suas taxas de uso em movimento rápido (onde a demanda é maior que três itens por ano) e movimento lento (demanda menor que três

itens por ano). Em alguns casos, é possível reparar as peças com defeito, e neste caso os itens são classificados como rotativos.

Mitchell (1962) apud Kelly (2006) classificou ainda os itens de movimento lento em especiais, com advertência, e sem advertência com base na quantidade de tempo disponível para reagir a uma falha iminente. A Figura 2.21 mostra a classificação geral dos estoques.

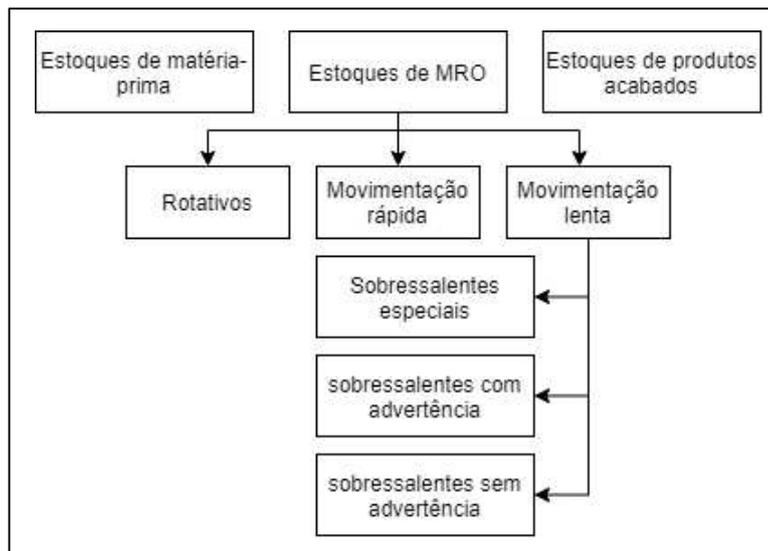


Figura 2.21 - Classificação geral dos estoques (baseado SHENOY; ROSAS, 2018, p. 253)

Estoques de sobressalentes rotativos são item de manutenção que não são consumidos durante uma operação de manutenção, mas são reconicionados e colocados novamente em serviço. Itens desse tipo também são chamados de sobressalentes recuperáveis ou reparáveis. A política de estoque, neste caso, seria determinar o número inicial de rotativos que precisariam ser mantidos para satisfazer o nível de serviço desejado. A maneira mais comum de tratar esse problema é usar o modelo de enfileiramento, em que as falhas do equipamento são tratadas como clientes e os rotativos são considerados os canais de enfileiramento (SHENOY; ROSAS, 2018).

Os itens de movimentação rápida possuem um histórico de demandas, e a partir desses dados podem ser usadas técnicas determinísticas ou estocásticas para gerenciamento desses estoques (SHENOY; ROSAS, 2018). As técnicas determinísticas e estocásticas não podem ser aplicáveis para gerenciamento de peças sobressalentes de baixa movimentação, pois o consumo dessas peças é aleatório e a confiabilidade dos registros históricos é baixa. Mesmo que a demanda seja baixa, as organizações ainda precisam manter uma quantidade mínima desses componentes em estoque, haja vista que esses componentes podem não estar disponíveis alguns

anos depois, pois os fabricantes de equipamentos originais poderiam não estar mais produzindo essas peças (SHENOY; ROSAS, 2018). Embora uma série de distribuições estatísticas tenha sido discutida na literatura para modelar a demanda por peças sobressalentes, faltam evidências empíricas (SYNTETOS; BABAI; ALTAY, 2012).

Segundo Mitchell (1962) apud Kelly (2006) um item de movimentação lenta especial, ou sobressalente especial, é aquele que é comprado para uso ou necessário para uma atividade de manutenção planejada em uma data específica. Os sobressalentes especiais são estoques temporários e, embora são estoques de baixa movimentação, são gerenciados de um modo simples; os pedidos são programados para que no período de manutenção programada esses itens estejam disponíveis, e os gerentes costumam adicionar um tempo dentro do tempo previsto pelo fornecedor, que chamam de *lead time* de segurança (SHENOY; ROSAS, 2018). O tempo adicional varia de acordo com o fornecedor, com a distância, o tipo de transporte (aéreo, marítimo, ferroviário e rodoviário), históricos anteriores, confiança etc.

Algumas peças fornecem indicação suficiente de uma falha iminente por preditores como ruído, vibração, corrosão, temperatura etc., que são detectados através do monitoramento *in loco*, onde esses dados são analisados por um departamento de manutenção preditiva. Para Shenoy e Rosas (2018), uma vez que essas indicações se tornam confiáveis, a política de estoque para este tipo de sobressalente é de não estocar este item e fazer um pedido expresso somente quando uma indicação de uma falha iminente for observada, e esses sobressalentes são itens de movimentação lenta com advertência.

A grande problemática está nos estoques de baixa movimentação que fornecem pouco ou nenhum aviso de uma falha iminente, ou ainda por razões técnicas e econômicas, nenhuma inspeção ou outra técnica está disponível para fornecer notificação de falha (KELLY, 2006). Além disso o consumo desses itens é aleatório e a confiabilidade dos registros históricos é baixa (possuem histórico de demanda próximo de zero por longos períodos) (SHENOY; ROSAS, 2018).

Trabalhos de Bacchetti e Sacconi (2012) mostraram a existência de uma lacuna considerável entre a pesquisa e a prática em gestão de peças sobressalentes, apontando que os gestores geralmente preferem confiar em seu julgamento ou em modelos simples. Guajardo *et al.* (2015) concluíram que na prática a opinião especializada dos planejadores de estoque desempenha um papel fundamental na tomada de decisão, em vez da abordagem quantitativa estruturada. Num extenso estudo realizado por Porras e Dekker (2008) as peças sobressalentes que apresentam valores de demanda de baixos a muito baixos (em alguns casos, nenhuma

observação de demanda foi observada durante 5 anos), com dados tão limitados, tem aplicação de modelos teóricos errática.

Nesse sentido, a fabricação de peças de reposição por MA pode contribuir para o gerenciamento daqueles estoques de baixíssimo movimento. Esse trabalho tem o foco na indústria de óleo e gás onde as características desses estoques estão presentes, mas o mesmo cenário pode ser estendido a outros setores industriais que tenham dificuldades com peças sobressalentes de baixa demanda.

2.8 Custos de Produção

2.8.1 Introdução a contabilidade de custos

Na literatura contábil corrente (MARTINS, 2008; FONTOURA, 2013; BHIMANI *et al.*, 2018; BERTI, 2006; IUDÍCIBUS; MARION, 2008; HORNGREN; FOSTER; DATAR, 2000), dois ramos da contabilidade são bem diferenciados e descritos, que são a contabilidade financeira e a contabilidade gerencial.

Um outro ramo da contabilidade, denominado de contabilidade de custos, mede e relata informações financeiras (Real, Euro, Dólar) e não financeiras (Quilo, m³, unidade produzida) relacionadas à aquisição ou uso de recursos pela organização. Ela fornece informações para contabilidade gerencial e contabilidade financeira. Por exemplo, calcular o custo de um produto é uma função de contabilidade de custos que atende às necessidades de avaliação de estoque do contador financeiro e às necessidades de tomada de decisão do contador gerencial, como por exemplo decidir e definir o preço dos produtos e escolher quais produtos promover (BHIMANI *et al.*, 2018).

De maneira geral, a contabilidade de custos, como a própria denominação induz, cuida dos custos da empresa, não tendo sua atenção voltada para as despesas (IUDÍCIBUS; MARION, 2008). Que por sua vez, os custos representam os gastos relativos a bens ou serviços utilizados na produção de outros bens ou serviços. Portanto, estão associados aos produtos ou serviços produzidos pela entidade (BRUNI; FAMA, 2003, p. 25 apud FONTOURA, 2013, p. 12).

A Contabilidade de custos tem três funções relevantes segundo Martins (2018): auxílio ao planejamento; ao controle; e às tomadas de decisões. No que diz respeito ao planejamento e controle, sua mais importante missão é fornecer dados para o estabelecimento de padrões, orçamentos e outras formas de previsão e, num estágio imediatamente seguinte, acompanhar o

efetivamente acontecido para comparação com os valores anteriormente definidos. No que tange à Decisão, seu papel reveste-se de suma importância, pois consiste na alimentação de informações sobre valores relevantes que dizem respeito às consequências de curto e longo prazo sobre medidas de introdução, manutenção ou corte de produtos, administração de preços de venda, opção de compra ou produção, terceirização etc.

As características essenciais de qualquer boa estimativa de custo são integridade, razoabilidade, credibilidade e/ou defensibilidade analítica, e não necessariamente garantir que a resposta seja bastante precisa. Embora as metodologia e técnicas de custeio exijam muita das vezes números específicos, o esforço em determinar os custos não se concentra em obter o “correto até o centavo”. Um estimador de custos não se deve também estar empenhado em obter uma faixa estreita de uma estimativa custo. Se as faixas forem muito grandes, o usuário da estimativa, como um patrocinador, consumidor, chefe etc., pode dizer que precisa de uma faixa mais estreita de custos, a partir daí então precisará buscar dados adicionais ou outra abordagem metodológica para apoiar o refinamento da estimativa (MISLICK; NUSSBAUM, 2015).

A utilidade das informações de custos manifesta-se sob três perspectivas: (a) no âmbito da contabilidade societária, para a elaboração de demonstrações contábeis destinadas, preponderantemente, a usuários externos, principalmente ao mercado de capitais; (b) no campo da contabilidade tributária, para a mais correta possível mensuração do valor do lucro ou do patrimônio sujeito a tributação; e (c) na esfera da controladoria e da contabilidade gerencial, provendo suporte ao processo de planejamento e controle gerencial das organizações (MARTINS; ROCHA, 2015).

Nesta pesquisa, as informações de custos coletadas serão orientadas para a contabilidade gerencial, processos produtivos e principalmente investigar os custos de um produto fabricado via *GMA-DED*. As vertentes societárias e tributárias são trabalhos voltados à área de contabilidade e não serão abordados aqui.

2.8.2 *Objeto de Custo, Produção por Processo e Produção por Encomenda*

Para orientar em suas decisões, os gerentes das organizações geralmente desejam saber quanto custa (dinheiro, tempo, esforço etc.) uma determinada “coisa” (como um novo produto, uma máquina, um serviço ou um processo) para tomar alguma decisão ou avaliar uma situação. Objeto de custo é qualquer “coisa” a qual uma medição separada de custos é desejada (BHIMANI *et al.*, 2018, p.31). Comumente conhecemos os objetos de custos como produtos, bens e serviços.

Qualquer que seja o objeto de custo, existem dois sistemas de acumulação de custos (por processo e por ordem) que estão relacionados com as características do sistema de produção. No sistema de acumulação de custos por processo, os custos são contabilizados por processo durante o decorrer do tempo e totalizados ao fim de cada período (mês, semestre etc.). Neste processo a principal informação é o custo de cada fase do processo produtivo (por exemplo, corte, dobramento, soldagem, pintura etc.) por período. E para obter-se o custo médio unitário dos produtos, a apuração por processo não se avalia custos unidade por unidade, e sim à base do custo médio do período dividindo o custo total pela quantidade produzida. A produção por processo reside na elaboração dos mesmos produtos ou na prestação dos mesmos serviços de forma continuada por um longo período, fundamentalmente para estoque, isto é, para venda posterior (ELISEU, 2008 p. 46).

No sistema de acumulação de custos por ordem, os custos são contabilizados elemento a elemento (mão de obra, matéria-prima etc.) durante todo o tempo de sua execução, os custos são acumulados numa conta específica para cada ordem ou encomenda. Essa conta só para de receber custos quando a ordem estiver encerrada. A principal informação é custo de cada ordem de produção ou serviço. A produção por ordem reside na elaboração produtos diferentes e em pequenas quantidades (ELISEU, 2008 p.47).

O sistema de custeio por ordem de produção (encomenda) apresenta algumas vantagens como: baixo volume de recursos necessários para capital de giro, pelo fato de não apresentar necessidade de manter estoques de insumos e de produtos acabados, pois a produção só é inicializada quando a venda for efetivada; um maior nível de controle dos gastos; presença de equipamentos que possibilita a flexibilização de produtos; e facilidade no processo de compra de insumos, gerando um estoque pequeno, tendo em vista a alta rotatividade de insumos. Por outro lado, o sistema de custeio por ordem de produção oferece algumas desvantagens que demandam atenção na sua aplicação, como: o real custo da produção só é reconhecido após a conclusão do processo da ordem; há maiores custos para o controle devido a necessidade de controles para cada ordem, tendo gastos maiores com pessoas e recursos financeiros; dependência de uma equipe de planejamento de qualidade para elaboração de orçamentos antes ao encerramento da venda, obtendo-se gastos maiores na formação e manutenção da equipe; necessidade de uma equipe técnica preparada de manutenção e preparo dos equipamentos, pois para cada ordem de produção que possui modelos de produtos diferentes carece de uma preparação de qualidade das máquinas; e difícil elaboração de custos de produção para o futuro, devido à customização dos produtos (BERTI, 2006).

Devido ao alto grau de customização dos produtos fabricados por MA e do baixo volume, pode se constatar que é uma produção por encomenda, em oposição aos produtos padronizados fabricados e estocados em larga escala.

2.8.3 *Conceitos da Contabilidade de Custos*

2.8.3.1 *Custos*

São recursos aplicados na transformação dos ativos e representados por gastos relativos à utilização de bem ou serviço na produção de outros bens e serviços e assim os gastos são processados como custos no momento da utilização dos fatores de produção na fabricação de um produto ou execução de um serviço (CARNEIRO *et al.*, 2006, p. 71 apud FONTOURA, 2013, p. 12). Consistem no que deve ser despendido (em dinheiro, tempo, esforço etc.) para se obter algo. Entretanto um consenso entre os autores é que se referem aos insumos ligados a um processo produtivo (FONTOURA, 2013).

O conceito de custo contempla duas dimensões: a física e a monetária. A dimensão física dos custos refere-se à sua quantificação em termos de peso (quilogramas, toneladas etc.), volume (decâmetro etc.), área (metros quadrados) etc. Já a dimensão monetária está relacionada à expressão econômico-financeira: reais, dólares, euros etc. (MARTINS; ROCHA, 2015, p.9).

A utilização dos métodos de custeios, como será visto mais adiante, requer a classificação dos custos em fixos ou variáveis, ou da classificação em diretos ou indiretos, embora todos os custos possam ser classificados das duas maneiras ao mesmo tempo de forma independente (por exemplo a matéria-prima é um custo variável e direto; o aluguel é fixo e indireto e assim por diante).

A classificação mais usual dos custos está em função do volume, diferenciando os custos fixos dos custos variáveis. Todo elemento de custo que varia em função da quantidade de produtos fabricada é considerado como um custo variável. Já o elemento de custo que permanece constante, independentemente da quantidade de produtos fabricada, é tido como fixo.

A classificação dos custos em diretos e indiretos tem um relacionamento com a unidade produzida e diz respeito ao nível de precisão da mensuração de cada elemento de custo em relação a um determinado objeto de custo: quanto mais precisa for a mensuração, mais direto é o custo. Dizer, simplesmente, que determinado item de custo é direto ou indireto, sem qualquer outra informação complementar, não é suficientemente esclarecedor. Para que se possa classificar um determinado elemento de custo como direto ou indireto, a primeira perspectiva

que deve ser analisada é de caráter exclusivamente tecnológico, ou seja, sob esse ponto de vista, o fator que determina a classificação é a viabilidade técnica de identificar, associar e mensurar aquele custo em relação a cada produto. Dessa forma, devem ser classificados como diretos os custos identificáveis e mensuráveis por produto com precisão, no sentido de que haja tecnologia (depende de cada empresa em particular) que possa viabilizar, tecnicamente, a identificação e a mensuração (MARTINS, 2018).

Para Fontoura (2013) a classificação dos custos em diretos e indiretos se dá quanto a apropriação, que se refere à forma de identificar, alocar os custos aos produtos.

2.8.3.2 Custos fixos

Custos fixos são aqueles cujo montante não é afetado pelo volume, dentro de determinado intervalo do nível de atividade. Os custos fixos geralmente se alteram quando há mudança no nível da capacidade produtiva, para mais ou para menos, quando, então, seu valor pode mudar de patamar, mas continuam sendo fixos no novo patamar (MARTINS; ROCHA, 2015).

2.8.3.3 Custos variáveis

São os custos que variam de acordo com o volume da produção (FONTOURA, 2013). Custos variáveis são aqueles cujo montante é afetado de maneira direta pelo volume, dentro de determinado intervalo do nível de atividade (MARTINS; ROCHA, 2015).

2.8.3.4 Custos diretos

São os custos que podem ser facilmente identificados com os produtos ou serviços a que se referem, sendo que para tal não necessite de critérios de rateios, normalmente trata-se dos materiais diretos utilizados na produção, (FONTOURA, 2013, p.22).

Custos diretos são aqueles identificáveis e mensuráveis, em relação a cada entidade objeto de custeio, de maneira clara, direta, precisa, objetiva e economicamente viável. Suas associação e apropriação às entidades se processam, portanto, através de mensuração direta (MARTINS; ROCHA, 2015).

A fabricação de peças por MA, por se tratar de um processo produtivo sob demanda, terá boa parte de seus custos facilmente identificáveis ao produto. Haja vista que uma conta é

aberta no momento do pedido, praticamente todo custo incorrido naquele período é diretamente ligado àquela unidade produzida. Geralmente são exemplos de custos diretos em *GMA-DED*:

- Mão de obra de terceiros para aquela unidade produzida (usinagem, tratamento térmico e ensaios mecânicos);
- Matéria-prima: arame, gás de proteção, energia elétrica, bico de contato, conduítes;
- Salários da produção;
- Energia das máquinas para aquela produção;
- Todo o custo dispendido no período de fabricação daquela encomenda diretamente relacionado àquele produto.

2.8.3.5 Custos indiretos

Custos indiretos são aqueles alocados a cada entidade objeto de custeio por meio de estimativas e aproximações. Sua associação e alocação à entidade podem conter algum grau de subjetividade e o grau de precisão da mensuração é inferior ao dos custos diretos. A alocação de custos indiretos pode conter subjetividade, mas não deve ser arbitrária (MARTINS; ROCHA, 2015).

Embora a maior parte dos custos em MA são diretos ao produto, existem os custos indiretos, como o aluguel, salários da supervisão, das chefias etc. Normalmente os custos indiretos, quando rateados, são em função do volume produzido, sendo necessário estimar uma capacidade produtiva.

Geralmente são exemplos de custos indiretos em *GMA-DED*:

- Salários, encargos sociais e benefícios do pessoal da portaria, segurança, administração, gerencia, e chefia;
- Manutenção do edifício: depreciação, aluguel, imposto predial, manutenção predial, seguro, gastos com condomínio, vigilância, segurança, limpeza, e jardinagem;
- Manutenção de tecnologia, equipamentos e instalações (licença de softwares, garantia, depreciação, manutenção, e seguros)

2.8.3.6 *Despesas*

Despesas são os gastos necessários para vender e distribuir os produtos, de modo geral são os gastos ligados às áreas administrativas e comerciais (PADOVEZE, 2004, p.17).

Despesa é a expressão monetária do consumo ou da utilização de bens ou serviços no processo de administração geral da organização e da transferência de produtos, mercadorias e serviços aos clientes, no processo de geração de receita. Para que um evento seja caracterizado como despesa, há que satisfazer a dois requisitos: (a) ocorrência de consumo, utilização ou transferência de um recurso económico; e (b) objetivo de manter em atividade a empresa como um todo e gerar receita (MARTINS; ROCHA, 2015).

2.8.4 *Cr terios de Avalia o do Custo no Tempo*

A express o cr terios de avalia o diz respeito   defini o de como avaliar o custo dos fatores utilizados na produ o dos bens ou servi os, no que se refere ao tempo sobre o qual a empresa considera relevante custear as unidades produzidas. Nesse sentido, tem-se o custo hist rico (custos passados, nominais), custos hist ricos corrigidos (custos passados, trazidos   capacidade aquisitiva da moeda de hoje - ou de outra data), custo de reposi o (custos correntes) e custo padr o (custos projetados para o futuro) (MARTINS; ROCHA, 2015).

Neste trabalho o cr terio de avalia o do custo no tempo ser  o de reposi o, haja vista que o pre o de venda da pe a produzida por MA ser  comparado com o or amento da mesma pe a, por m produzido por forjamento de terceiros. Em se tratando de produ o sob demanda e reposi o imediata de componentes, para a compara o ser justa e correta h  de ser considerar uma situa o de reposi o.

2.8.5 *T cnicas e M todos de Custeios*

NIAZI *et al.*, (2006) fizeram uma extensa revis o bibliogr fica das principais t cnicas utilizadas para estimar os custos dos produtos e as classificou como mostra a Figura 2.22.

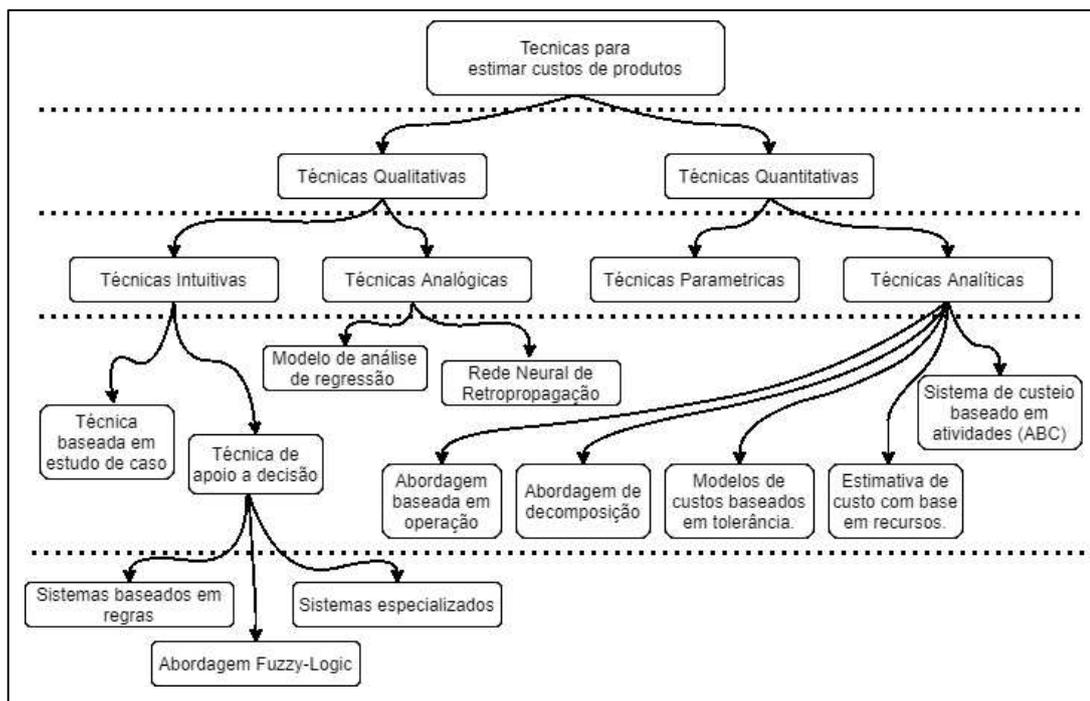


Figura 2.22 - Classificação das técnicas de estimativa de custos de produtos (NIAZI *et al.*, 2006)

Em geral, as técnicas qualitativas ajudam a obter estimativas aproximadas durante a conceituação do projeto/produto utilizando dados semelhantes e/ou a expertise de profissionais. Dentro dessa técnica foram classificados em técnicas intuitivas e analógicas. As técnicas intuitivas podem ser baseadas em um estudo de caso que é aquela onde o produto novo se assemelha com algum produto anteriormente fabricado, as semelhanças identificadas ajudam a incorporar os dados anteriores ao novo produto, de forma que a necessidade de obter a estimativa de custo desde o início seja bastante reduzida. As técnicas analógicas, utilizam de dados históricos de projeto e fabricação para produtos com custos conhecidos, e esses dados são usados em sistematicamente para obter estimativas de custo para novos produtos.

As técnicas qualitativas são uma estimativa inicial e são feitas para permitir que os usuários decidam qual caminho seguir com um projeto. Como tal, os estimadores muitas vezes estão interessados em um custo total aproximado da ordem de grandeza. A ênfase não está na precisão detalhada, mas sim em um nível de custo razoável ou custo delta de precisão suficiente para garantir que os resultados sejam significativos e, acima de tudo, não enganosos.

As técnicas quantitativas, por outro lado, são baseadas em uma análise detalhada do projeto de um produto, suas características e processos de manufatura correspondentes, em vez de simplesmente depender dos dados anteriores ou do conhecimento de um avaliador. As técnicas quantitativas podem ser categorizadas em técnicas paramétricas e analíticas. Os

modelos paramétricos são derivados aplicando as metodologias estatísticas e expressando o custo em função de algumas de suas variáveis constituintes. Essas técnicas podem ser eficazes nas situações em que os parâmetros, às vezes conhecidos como direcionadores de custo, podem ser facilmente identificados. Modelos paramétricos são geralmente usados para quantificar o custo unitário de um determinado produto.

As técnicas analíticas requerem decompor um produto em unidades, operações e atividades elementares que representam diferentes recursos consumidos durante o ciclo de produção e expressar o custo como uma soma de todos esses componentes. Essas técnicas podem ser classificadas em diferentes categorias. 1 - Abordagem baseada em operação, é geralmente usada nos estágios finais do projeto devido ao tipo de informação necessária e é uma das primeiras tentativas de estimar os custos de fabricação, essa abordagem permite a estimativa do custo de fabricação como uma soma dos custos associados ao tempo de execução das operações de fabricação, tempo não produtivo e tempos de preparação. 2 – Abordagem de decomposição, este método estima o custo total do produto somando todos os custos incorridos durante o ciclo de produção de um produto, incluindo custos de material e despesas gerais. O método requer informações detalhadas sobre os recursos consumidos para fabricar um produto, incluindo detalhes de compra, processamento e manutenção. 3 – Modelos de custos baseados em tolerâncias, tem o objetivo de estimar o custo do produto considerando as tolerâncias de projeto de um produto em função do custo do produto, limites mínimos e máximos vão direcionar o modelo de custo do produto. 4 – Estimativa de custo com base em recursos, A metodologia de estimativa de custo baseada em recursos lida com a identificação dos recursos relacionados ao custo de um produto e a determinação dos custos associados. Uma pesquisa considerável foi realizada a fim de extrair e quantificar as características representativas do produto que contribuem para o custo total. Esses recursos podem ser relacionados ao design, como o tipo de material usado para um produto específico, detalhes geométricos, etc. ou orientados ao processo, ou seja, um processo específico necessário para a fabricação do produto, por exemplo, usinagem, fundição, moldagem por injeção, etc. 4 – Sistema de custeio baseado em atividades (*ABC*) concentra-se no cálculo dos custos incorridos na execução das atividades de fabricação de um produto. O método foi discutido pela primeira vez por Cooper e Kaplan 1948. Eles apresentaram o sistema *ABC* como um meio útil de distribuir os custos indiretos na proporção das atividades realizadas em um produto para fabricá-lo.

A expressão método de custeio diz respeito à composição do valor de custo de um evento, atividade, produto, atributo etc., isto é, à natureza e comportamento dos custos que

devem ser considerados na sua apuração. O estudo dos métodos de custeio, dos sistemas de acumulação de custos e dos seus critérios de valoração diz respeito à análise das várias alternativas, válidas e corretas, de mensuração do custo e da lucratividade individual dos produtos. O estudo e a prática dos diferentes métodos de custeio referem-se às várias alternativas possíveis de decisão sobre quais elementos de custos devem ou não ser computados na mensuração do custo dos produtos individuais (MARTINS; ROCHA, 2015).

Os métodos de custeios mais comumente conhecidos e utilizados na contabilidade, são provenientes das técnicas analíticas que utilizam a abordagem por decomposição, utilizando dados incorridos por um determinado período para compor os custos de um produto. Como dito anteriormente, os métodos de custeio diferenciam-se uns dos outros em função da natureza e do comportamento dos custos que atribuem ou não aos produtos e, em decorrência dos elementos que não sendo atribuídos aos produtos, devem ser debitados diretamente ao resultado do período como despesas.

O método analítico está relacionado às técnicas matemáticas que dizem respeito a como fabricar a peça em decomposição unitária, com base em suas operações ou atividades

De modo abrangente (MARTINS; ROCHA, 2015) visualiza duas grandes vertentes para os métodos de custeios. A primeira vertente é aquela em que se atribuem aos produtos apenas os custos diretos em relação a cada unidade produzida, isto é, os identificáveis e mensuráveis em relação a cada unidade de produto, de maneira clara, direta, precisa, objetiva e economicamente viável, ou seja, geralmente são os custos variáveis, essa vertente é denominada de Custeio Variável. A segunda perspectiva é aquela em que se apropriam aos produtos não apenas os custos diretos em relação a cada unidade produzida, mas também os custos indiretos e no limite pode abranger as despesas administrativas, a segunda vertente é a do Custeio por Absorção.

2.8.6 Método de Custeio por Absorção

O método de custeio por absorção é assim denominado pois os bens e serviços produzidos deve absorver, além dos custos diretos e variáveis, mas também os custos indiretos e fixos. Este método possui três variantes que são: Absorção Parcial, Absorção Parcial Modificado e Absorção Integral ou Pleno.

O Método de custeio por absorção parcial atribui aos produtos todos os custos de produção (fixos e variáveis), as despesas não são contabilizadas diretamente ao produto e vão para o encargo de período. O parcial modificado atribui aos produtos todos os custos variáveis

e os fixos operacionais (que são ligados a produção), as despesas e os custos fixos estruturais (que são ligados a estrutura da empresa) não são contabilizados diretamente ao produto. Por fim, o custeio pleno, também denominado custeio integral, aloca aos produtos todos os custos de produção (tanto fixos, quanto variáveis) juntamente com as despesas fixas, ou seja, os gastos fixos de administração e de vendas.

Segundo (MARTINS; ROCHA, 2015) quando se apropria aos produtos todos os custos fixos e variáveis e também os gastos fixos de administração e vendas, o uso desse método resulta na expressão do custo contábil máximo dos bens e serviços, denominado custo pleno, ou seja, o custo de produzir, administrar e vender. Além disso, é um método recomendado para formação de preços em sistemas de produção por ordem ou encomenda. Se por um lado, o nível de precisão da mensuração do custo por produto e por unidade produzida pode ser insuficiente, devido à provável arbitrariedade no processo de alocação de custos e despesas fixas estruturais, por outro contempla, nos produtos, a totalidade dos custos relativos ao esforço de produzir e de administrar a empresa. Esse custo unitário, denominado custo pleno, é um custo conservador no sentido de que, dentre todos os métodos, é o que leva à menor margem por produto, por atribuir o maior valor de custo às unidades produzidas.

2.8.7 Departamentalização

Departamento é uma unidade administrativa para a contabilidade de custos, representada por pessoas e máquinas (na maioria dos casos), em que se desenvolvem atividades ou etapas homogêneas, por exemplo: forjaria, cromação, montagem, pintura, almoxarifado, manutenção, refinaria, administração geral da produção etc. Os departamentos podem ser divididos em dois grandes grupos: os que promovem qualquer tipo de modificação diretamente sobre o produto, chamados de departamentos de produção, e os que basicamente existem para os serviços auxiliares, provendo apoio e não para atuação direta sobre os produtos, são conhecidos por departamentos de serviços. Os departamentos de serviços geralmente não têm seus custos alocados diretamente aos produtos, pois estes não passam por eles, neste caso têm seus custos transferidos para os departamentos produtivos. Os departamentos de produção (também conhecidos por produtivos) têm seus custos alocados diretamente sobre os produtos, já que estes passam inclusive fisicamente por eles (MARTINS, 2018).

A quantidade de departamentos produtivos é em geral relacionada a quantidade de etapas da produção, por exemplo, se a fabricação de uma peça possui as etapas de: Soldagem; Pintura; Montagem; e Embalagem, pode-se ter os departamentos produtivos de: Soldagem; Pintura;

Montagem; e Embalagem. Entretanto se julgar necessário, devido à complexidade da atividade, pode-se subdividir, por exemplo, a etapa de pintura em 3 departamentos separados: Limpeza; Pintura; e Secagem. Do mesmo modo, pode-se também unir etapas semelhantes no mesmo departamento, por exemplo, a etapa de montagem e embalagem dentro de um departamento chamado de finalização. A quantidade de departamentos de serviço é em geral relacionada aos serviços indiretos que são prestados aos departamentos produtivos, podendo também, a depender da necessidade, ser dividido em vários departamentos ou unificado. Por fim, os custos dos departamentos produtivo são diretamente transferidos para os produtos. A Figura 2.23 mostra a como ficaria a relação entre etapas de fabricação com os departamento produtivos e a alocação indireta do departamento de serviço aos produtivos e alocação direta dos produtivos ao produto.

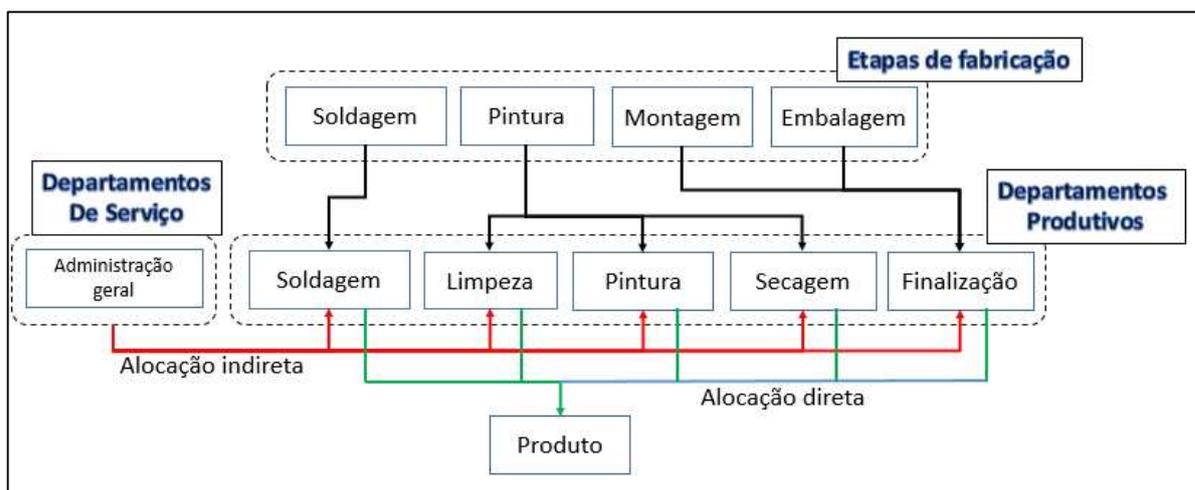


Figura 2.23 – Exemplo de como as etapas estão relacionadas com os departamentos (fonte: do autor)

Será detalhado mais adiante, como as etapas de fabricação do flange via MA serão departamentalizados. A MA se encaixa como um processo produtivo sob encomenda, portanto, os custos serão acumulados elemento a elemento àquele departamento, portanto são facilmente identificáveis e serão considerados quase que na totalidade como custos diretos.

Nesta pesquisa os produtos de *GMA-DED* são considerados como realizados por encomenda, e a departamentalização é importante em custos para uma racional distribuição dos custos indiretos e das despesas.

2.8.8 *A questão da capacidade*

Para estimar o custo de um produto é necessário considerar que este produto será posteriormente vendido no mercado. Um dos objetivos da pesquisa de mercado é dimensionar corretamente a capacidade produtiva num determinado período considerando o seu consumo. Sem essa consideração não há qualquer razão para iniciar a produção nem para estimar o custo de um produto.

Para se operacionalizar corretamente o custeio por absorção, é necessário estabelecer o volume de produção a ser considerado para calcular o custo fixo unitário (que neste trabalho são os custos indiretos). A princípio, há três possibilidades segundo Martins e Rocha (2018):

- a) Volume máximo, nominal, que equivale à capacidade teórica;
- b) Volume projetado, orçado ou esperado para um período à frente, que corresponde à capacidade normal;
- c) Volume real, observado em determinado período transcorrido.

O volume de produção considerado nesta pesquisa estará em função da capacidade da máquina, que por sua vez está em função da velocidade de alimentação/deposição do arame *MIG/MAG*.

Para esta pesquisa, a alocação de custos indiretos às unidades produzidas foi realizada tomando-se por base o volume de produção esperado para um período à frente e considerando-se o nível de atividade normal da empresa. O valor dessa capacidade foi calculado através dos resultados.

2.8.9 *Formação do preço de venda com base nos custos*

É generalizada a ideia de que uma das finalidades da Contabilidade de Custos é o fornecimento do preço de venda. Para administrar preços de venda, sem dúvida é necessário conhecer o custo do produto; porém essa informação, por si só, embora seja necessária, não é suficiente. Além do custo, é preciso saber o grau de elasticidade da demanda, os preços de produtos dos concorrentes, os preços de produtos substitutos, a estratégia de marketing da empresa etc.; e tudo isso depende também do tipo de mercado em que a empresa atua, que vai desde o monopólio ou do monopólio até a concorrência perfeita, mercado de commodities etc. O importante é que o sistema de custos produza informações úteis e consistentes com a filosofia da empresa, particularmente com sua política de preços. Considerando-se esses aspectos

citados, os preços podem ser fixados com base nos custos, com base no mercado ou com base em uma combinação de ambos (MARTINS, 2018).

Um dos objetivos da pesquisa é comparar os custos de produção entre processos de fabricação diferentes, entretanto não se sabe dos custos de produção do flange pelo método convencional (forjado), mas o preço de venda será obtido através de uma pesquisa. Conforme foi mostrado acima, o preço de venda de um produto é composto de vários elementos inclusive dos custos de produção. Portanto para uma correta análise comparativa, faz-se necessário estimar o preço de venda do flange fabricado por *GMA-DED*. Como o mercado de produtos fabricados por *GMA-DED* é quase inexistente, e a maior parte dos componentes fabricados é para fins de pesquisa e não de venda, o preço de venda estimado neste trabalho será com base nos custos de fabricação.

Para calcular o preço de venda baseado nos custos de fabricação, o ponto de partida é o custo apurado segundo um dos critérios apresentados: Custeio por Absorção, Custeio Variável etc. Sobre esse custo agrega-se uma margem, denominada de *markup* (geralmente um número percentual).

O *markup* deve ser estimado para cobrir os gastos não incluídos no custo da produção (por exemplo despesas de *overheads* e vendas), os tributos e comissões incidentes e o lucro desejado pelos administradores. Por tanto o preço de venda pelo método de *markup* é:

$$P_{venda} = Custo_{Produção} + (P_{venda} * Markup) \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

$$Markup = DGA + COM + IMP + MLD$$

DGA - Despesas gerais da administração

COM - Comissão dos vendedores

IMP - Impostos

MLD - Margem de lucro desejada

Como foi visto acima, valores dos elementos que compõem o *markup* (DGA, COM, IMP e MLD) variam muito em função do mercado, região, oferta e demanda, estratégia da empresa etc. Os valores aqui estipulados para esses elementos serão baseados na indústria metal mecânica, nas despesas gerais que serão rateadas para os produtos (como recomenda o método de custeio pleno), comissão 5%, impostos 18% e por fim o lucro desejado terá como base o custo de oportunidade do investimento que será detalhado na parte de resultados. O preço de

venda nesta pesquisa é importante para a comparação com o preço de venda pelos métodos convencionais.

2.8.10 *Qualidade e Custos de produção em MADA*

Ruffo *et al.* e Baumers *et al.* (2006) quantificaram os custos para a sinterização a laser por meio do custeio baseado em atividades, onde cada atividade compreende custos diretos e indiretos. Os custos diretos compreendiam apenas os materiais usados e as alocações indiretas foram custos de máquina, despesas gerais e administração e foram baseados no tempo.

Baumers *et al.* (2006) demonstraram que o custo médio de produção depende da capacidade total da placa de construção (para um melhor aproveitamento do pó metálico). A utilização máxima reduz o efeito dos custos indiretos por amortização sobre o maior número de peças. Ambos os modelos, no entanto, não consideraram os efeitos do pós-processamento.

Lindemann *et al.* (2012) foi um dos primeiros a integrar os custos de pós-processamento e considerou como o terceiro estimador de custo mais significativo, atrás de material e investimento. Schröder *et al.* (2017) desenvolveram um modelo de custo extenso para comparar os processos de estereolitografia, modelagem por deposição fundida, fusão seletiva a laser, fusão por feixe de elétrons e revestimento a laser. O fator que mais influenciou os custos da análise de sensibilidade neste caso foram os custos de investimento da máquina para todos os processos de fabricação propostos.

Devido à maturidade inferior em comparação com a MA a base de pós-metálicos, existem publicações limitadas referentes à modelagem de custo dos métodos à base de arames e especialmente em MADA. A exploração das potencialidades dos processos MADA é permeada por desafios que envolvem o tempo de produção e qualidade em termos de geometria, integridade e propriedades dos materiais. Cunningham *et al.* (2018) descrevem os principais critérios de desempenho em MADA conforme o esquema da Figura 2.24. Yehorov *et al.* (2019) destacam que apesar dos avanços que tornaram as tecnologias de MADA praticáveis, os custos envolvidos dependerão do nicho de mercado onde ela se inserirá.

Cunningham *et al.* (2017) discutem aspectos da modelagem de custos em MADA. Neste caso, são levados em conta, por exemplo, o tempo de preparação, tempo de deposição e operações de pós-processamento como usinagem e tratamentos térmicos. Ding *et al.* (2015) mencionam que por causa da acurácia e acabamento superficial grosseiros, tornam-se necessárias operações de usinagem, resultando em maior tempo de produção e desperdício de

material. A otimização da geometria pode ser feita por exemplo através dos parâmetros de deposição (YEHOROV *et al.*, 2019) e planejamento de trajetória (DING *et al.*, 2014).

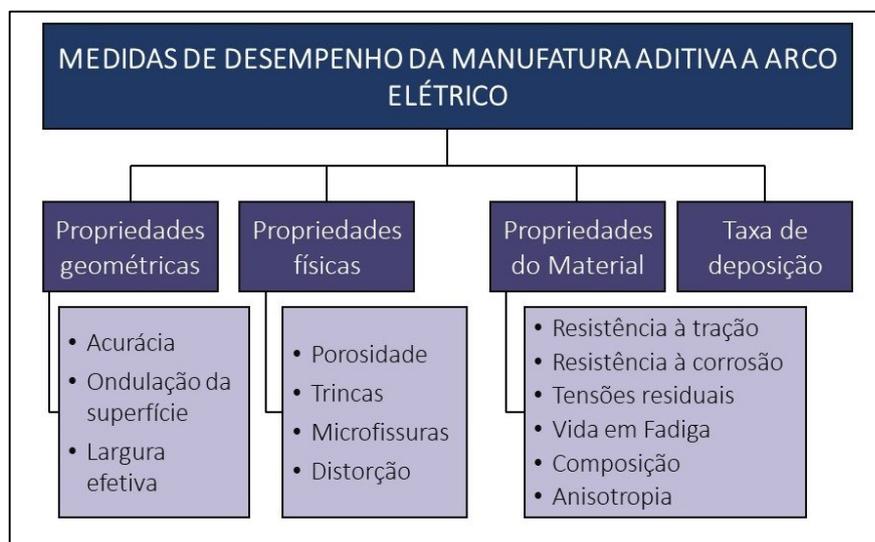


Figura 2.24 - Medidas de desempenho em MADA (adaptado de CUNNINGHAM *et al.*, 2018)

O processo de deposição em si pode acarretar em descontinuidades que comprometem a integridade dos componentes em MADA. Wu *et al.* (2018) apontam que a formação de poros geralmente acarreta perda de propriedades mecânicas. Esses autores mencionam que a ocorrência de porosidade pode estar associada a uma trajetória inadequada ou instabilidades no processo de deposição. A eficácia da proteção gasosa, assim como na soldagem é claro, também representa um fator importante para minimizar a formação de porosidade. Silva (2019) propõe inclusive a utilização de gás de proteção extra para melhor proteger o material depositado em MADA. A elevada taxa de deposição dos processos MADA é comumente acompanhada de um elevado aporte térmico, com isso, como discutido anteriormente, os sucessivos ciclos de deposição de camadas podem resultar no superaquecimento do componente em deposição, o que resulta em variações na geometria (WU *et al.*, 2017), heterogeneidade microestrutural e tensões residuais (HÖNNIGE *et al.*, 2017).

Segundo Singh e Dutta (2003), quanto maior a espessura da camada depositada, maior o erro geométrico associado. Ding *et al.* (2015) apontam que a acurácia dos processos de MA alimentados com arame, caso típico do *GMA-DED*, chega a ser 10 vezes mais baixa que dos processos alimentados com pó, uma vez que a espessura mínima de camada é geralmente superior. Geng *et al.* (2018) afirmam que a uniformidade da superfície depositada é relacionada à consistência das condições de contorno térmicas da poça de fusão. Esses autores discutem a ondulação da superfície causada pela convexidade de cordões sobrepostos verticalmente, neste

caso mais relacionada aos processos *DED*. A Figura 2.25 ilustra uma parede composta por camadas de um único cordão e a distinção entre largura efetiva e largura total, conforme proposto por Martina *et al.* (2012).

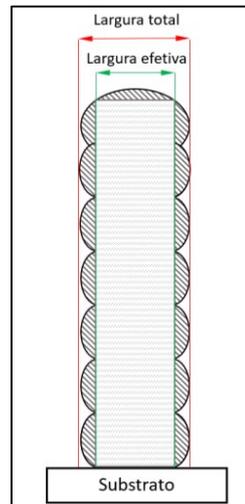


Figura 2.25 - Representação das dimensões das larguras efetiva e largura total associadas à ondulação das superfícies laterais em MADA (MARTINA *et al.*, 2012)

A discrepância entre as larguras total e efetiva dá uma boa indicação do material não aproveitável. Dahat *et al.* (2020) indicam que através da seleção adequada dos parâmetros de deposição é possível minimizar a quantidade de material residual a ser removida no pós-processamento. Esses autores propuseram a criação de mapas operacionais para a avaliação de regiões ótimas de geometria em função dos parâmetros de deposição (velocidade de translação e corrente, neste caso). Segundo Yehorev *et al.* (2019), para que se garanta melhor qualidade superficial é necessário minimizar o calor imposto e o acúmulo de calor sob a camada depositada, além de se utilizar um processo com baixa pressão do arco elétrico, evitando o escorrimento lateral da poça de fusão. Esses últimos autores indicam que essas características podem ser obtidas através da seleção de um arco curto, baixa relação entre corrente e velocidade de translação, temperatura entre camadas (interpasse) baixa e constante e uma composição de gás de proteção que favoreça a emissão catódica no centro do arco. Corroborando essas indicações, Xiong *et al.* (2015) advertem que o aumento da corrente, além de promover maior imposição de calor, aumenta a pressão do arco. Esses fatores combinados resultam em instabilidades na poça de fusão.

Modelos que visam compreender e prever o comportamento da geometria dos cordões em função dos parâmetros de deposição tem sido investigados a fim de otimizar qualidade

geométrica e aspectos superficiais em MADA. Nesse sentido, Xiong *et al.* (2013) discutem diferentes modelos matemáticos correspondentes à secção transversal de cordões depositados pelo processo *GMA-DED*. Esses autores demonstram ainda a importância da seleção adequada dos parâmetros de sobreposição lateral de cordões, em deposições que requerem mais de um cordão por camada. Nessa situação além dos parâmetros de deposição de cada cordão, a seleção da sobreposição lateral dos cordões deve ser adequada para que se garanta uma superfície regular. O planejamento de trajetória também é um fator importante em termos de acurácia e qualidade superficial em MADA. Ding *et al.* (2014) discutem diferentes propostas de algoritmos para a geração de trajetórias. O uso da técnica de tecimento, consistindo de um movimento oscilatório transversal à direção de deposição, é apontado por Li *et al.* (2018) como forma de garantir melhor estabilidade e qualidade superficial na deposição de estruturas largas.

Uma vez que o processo de deposição em MADA é caracterizado por gradientes expressivos de temperatura, diversos autores observam variações nas propriedades mecânicas em função da direção de deposição. A Figura 2.26 ilustra as direções comumente avaliadas em termos de propriedades mecânicas. Rodriguez *et al.* (2018), por exemplo, encontraram menor resistência à tração na direção vertical (direção de construção) em paredes de aço inoxidável 316L depositadas com MADA pelos processos *GMA-DED* com *CMT* e *GTA-DED* com *TopTIG* em relação à direção horizontal (direção de deposição). Um resultado similar foi observado por Moore *et al.* (2019) na deposição de paredes de aço carbono com sobreposição de cordões paralelos. Esses últimos autores observam que com o uso da oscilação transversal (tecimento), foram reduzidas as disparidades entre as orientações em termos de resistência mecânica. No entanto, o alongamento ainda se mostra inferior na direção de construção (vertical), quando comparado ao obtido na direção de deposição (horizontal).

A presença de defeitos de solidificação incluindo a falta de fusão entre camadas também pode afetar as propriedades mecânicas, conforme observado por Ghaffari *et al.* (2019). Outro fator relevante observado com base em soldagem é o fato de que baixas taxas de resfriamento, ocasionadas pelo acúmulo de calor, podem levar à formação de fases deletérias (A HOSSEINI *et al.*, 2019). Observa-se de modo geral que a obtenção de propriedades adequadas em um componente fabricado por MADA depende do material, estratégia de deposição e dos ciclos térmicos. Nesse sentido, Da Silva *et al.* (2020) inclusive mostram como um gerenciamento térmico eficiente pode ajudar a equilibrar as propriedades mecânicas nas direções principais de crescimento da pré-forma.

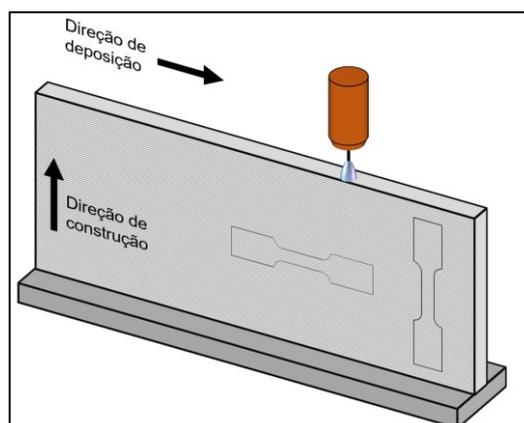


Figura 2.26 - Ilustração das direções (de crescimento) da pré-forma comumente avaliadas em termos de propriedades mecânicas em MADA

Para fins de comparação, entre o peso da pré-forma e o peso final da peça, utiliza-se o termo *buy-to-fly* (comprar para voar) da indústria aeroespacial, que pode ser substituído por um mais amplo denominado *buy-to-apply* (comprar para aplicar). Em todo caso, mede-se sempre a razão entre massa de matéria-prima necessária para construir a pré-forma e a massa final da peça aplicada, resumindo bem a importância de se obter pré-formas com boa regularidade; quanto mais irregulares são as pré-formas construídas, mais material de adição é consumido (comprado) e maior será a necessidade de usinagem para chegar às dimensões finais.. Por exemplo, se são gastos 15 kg de arame para a deposição da pré-forma, mas a peça final tem 3 kg, tem-se um *BTF* igual a 5. O mesmo termo é utilizado para peças feita por usinagem a partir de um bloco ou tarugo, por exemplo, se um tarugo de 10 kg deu a origem de uma peça de 5 kg depois de usinada, tem-se um *BTF* igual a 2.

Martina *et al.* (2015) desenvolveu um modelo de custo baseado em atividade de tempo. Isso simplificou os tempos de deposição usando características de volume retiradas de modelos *CAD* em combinação com a relação *BTF*. Usando este modelo os autores compararam *GMA-DED* com a usinagem *CNC* tradicional. A abordagem é uma ferramenta robusta de estimativa de custos em estágio inicial, no entanto, muitos dos custos da atividade dependiam de modificadores da indústria para aproximar o tempo de entrada. Outra simplificação foi que os tempos de usinagem, deposição e pós-processamento eram baseados em volume, negligenciando o impacto dos caminhos de deposição/remoção e a complexidade da peça. Além disso, muitos aspectos do processo não foram considerados, como configuração, inspeção, laminação e tratamento térmico, apesar do potencial direcionador de custo substancial no processo *WAAM*.

Cunningham *et al.* (2017) desenvolveram um modelo de custo, baseado em um estudo de caso com duas peças de Ti6Al4V, para processos *DED* e reportaram reduções significativas de custo com o processo *GMA-DED*. Na comparação do *GMA-DED* com a usinagem, eles encontraram um ponto de equilíbrio para um índice de aproveitamento de material *BTF* igual 5 (abaixo desse valor, usinar a peça a partir de um bloco era mais vantajoso) e considerando um *BTF* de 10, a redução de custo pode chegar a 53%. Na comparação do *GMA-DED* com os processos *EB-DED* e *L-DED* a redução de custo pode ser de até 45 e 69% respectivamente. Porém, os mesmos autores destacaram que o custo do gás de proteção se torna significativo para fabricação de grandes componentes (muitas horas de deposição são despendidas).

Dias *et al.* (2022) avaliaram o potencial econômico e ambiental do *GMA-DED*, para isto propuseram um modelo de custo baseado em processo (*Process-Based Cost Model*) e compararam o desempenho do *GMA-DED* com o de uma abordagem subtrativa tradicional baseada na usinagem a partir de um bloco. Os autores concluíram que nas etapas de deposição, os custos de material são o principal direcionador de custos devido ao alto preço da matéria-prima por quilo, enquanto que na usinagem, as despesas com equipamentos assumem as principais proporções de custo devido aos seus altos custos de aquisição da *CNC*. Somando todas as parcelas de custos, os custos com material correspondem a 55% dos custos totais de produção por peça, superando claramente os gastos com uso de equipamentos.

Vimos que existem diversos trabalhos que comparam os custos de produção do *GMA-DED* com a usinagem *CNC* tradicional, haja vista que esses dois processos podem fabricar peças customizadas, sob demanda e em pequenos lotes. Entretanto o processo usinagem exige uma pré-forma semiacabada (blocos, tarugos, chapas) para dar origem ao produto, isso demandaria um estoque enorme de semiacabados, culminando assim, nos mesmo problemas de estoques e tempo de entrega das peças tradicionais. Enquanto que em MA exige um estoque de matéria-prima menos acabado (arames ou pós), isto é, em função somente do material e não da forma.

Além disso, verifica-se na literatura uma lacuna no que se refere aos custos da qualificação das peças metálicas em função da sua aplicação, sendo que o tempo e esforço gasto para garantir a qualidade em peças de MA metálicos são desconsiderados. Os trabalhos focam muito nos custos de deposição, custos de pós-tratamento e os gastos com altos investimentos iniciais.

2.9 Aplicações da MA de metais no setor de O&G e *offshore*

Em um levantamento bibliométrico na base da Scopus, de artigos de manufatura aditiva de metais relacionados com o setor de óleo e gás e *offshore*, foram encontrados 35 artigos relevantes, desde 2014. Há quase uma década atrás Camisa *et al.*, (2014) descreveram os mais recentes desenvolvimentos de MA e 3DP (*3D print*) já citando os desenvolvimentos com potencial para resultar em futuras aplicações no setor de O&G. Zhong, Ornelaz e Krishnan (2017) também apresentaram um levantamento das tecnologias de MA de metais existentes, com suas vantagens e desvantagens para o setor de O&G. Para ilustrar os benefícios os autores citaram como exemplo a impressão de ferramentas de fundo de poço, como coletores de fluxo relacionados ao controle de fluxo e um limitador de extrusão, onde se demonstrou reduzir significativamente o custo e o tempo de prototipagem de componentes geometricamente complexos, que são muito caros ou impossíveis de fabricar usando métodos tradicionais.

Em trabalho mais recente, Vendra e Achanta (2020) destacaram as potenciais aplicações de MA de metais no campo petrolífero, incluindo exemplos demonstrativos, como componentes para perfilagem de fundo de poço, ferramentas de perfuração, turbo máquinas, componentes de dutos, etc. Gladkikh *et al.*, (2020) citaram como a relativa simplicidade e velocidade do processo de fabricação via MA pode atender a necessidade de uma resposta rápida na entrega de peças sobressalentes associada com níveis mínimos de estoque, apresentando vários estudos de caso sobre como a MA é capaz de enfrentar os desafios da reposição em diferentes negócios, como válvulas e equipamentos para turbo-máquinas, reduzindo drasticamente o tempo de entrega de peças de reposição e eliminando estoques.

Com a ideia de que MA é livre para a fabricação de qualquer geometria, diversos estudos podem ser encontrados na área de otimização topológica visando o máximo desempenho dos componentes. Barnes e Camisa (2019) discutem o potencial de otimização da topologia junto com a fabricação de MA para instalações *offshore* de baixo peso. De modo mais amplo, Acharya, Zhang e Yang (2020) fizeram simulações e otimizações topológicas de geometrias genéricas que podem ser aplicáveis para o setor de O&G. Por fim, no trabalho de Meli *et al.* (2019), os autores propuseram uma metodologia para projetar, otimizar e fabricar componentes de turbo-máquinas, aproveitando o potencial da otimização topológica e da MA. Além disso aplicaram a metodologia a um impulsor 2D usado para compressores centrífugos como prova de conceito da abordagem proposta. Os autores consideraram tais aspectos essenciais no contexto de O&G, tanto a respeito de novos projetos quanto nas operações de rotina.

A fabricação de peças por MA sem qualquer otimização topológica compete diretamente com os métodos tradicionais de fabricação, e identificar em quais situações uma é mais vantajosa em relação a outra tornou-se um tema para alguns trabalhos. Deja, Siemiatkowski e Zielinski (2020) propuseram um extenso método de MCDM (*Multi-Criteria Decision Making*) no apoio à decisão para a fabricação de componentes de equipamentos offshore. A usinagem CNC e o processo DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*) foram as alternativas consideradas para a produção da peça final. Os autores utilizaram um rotor de turbina *Offshore* como estudo de caso ilustrativo, para o qual a depender das variáveis de entrada (material, dimensões, complexidade, espessura, formato, acabamento etc.) um processo seria mais eficiente e vantajoso que o outro.

Já no campo prático, isto é, na materialização do componente via MA, diversos estudos com em escala de laboratórios (tipicamente paredes finas) foram observados, objetivando futuras aplicações no setor de O&G e *offshore*. Uns dos materiais mais relatados para MA nesse campo é o Inconel, que são superligas austeníticas à base de níquel-cromo, sendo materiais resistentes à oxidação e corrosão, adequados para serviços em ambientes extremos sujeitos a pressão e calor.

A influência das etapas de tratamento térmico relevantes para o uso da liga Inconel 718 para componentes sob a especificação *API 6A* foi investigada por Sutton *et al.* (2019). Os autores testaram múltiplas condições de tratamento térmico da liga 718, construída pelo processo *L-PBF*, bem como por prensagem isostática a quente (*HIP*). Eles utilizaram uma combinação de simulações termodinâmicas e caracterização metalúrgica, e concluíram que nenhuma das abordagens de tratamento térmico estudadas é apropriada para a especificação *API 6A*, e que as rotas específicas de pós-processamento térmico em conformidade com a especificação precisam ser avaliadas. Em outro trabalho publicado por Saint John *et al.* (2016), ficou demonstrado que a anisotropia nas peças do Inconel 718 produzidas com *L-PBF* não é totalmente removida por tratamentos térmicos subsequentes, resultado que corrobora o trabalho anterior.

Amostras de testes de impacto *Charpy* também foram construídas em Inconel 625 depositadas por LMD (*Laser Metal Deposition*, um processo *DED-L* com pó) para investigar o comportamento da tenacidade em duas orientações diferentes (vertical e horizontal) e duas condições (como depositadas e tratadas termicamente), resultando em diferentes resultados, destacando-se a influência da estratégia de fabricação na tenacidade final (VERDI *et al.*, 2021). Os resultados desses trabalhos evidenciam os desafios desse material.

O aço *ASTM* 131 grau EH36 que é amplamente utilizado na indústria de construção naval, tanto na construção de cascos quanto na própria estrutura, foi tratado por WU, W *et al.*, (2015). Eles produziram corpos de prova de alta densidade sem trincas com o EH36 em pó via SLM (*Sintering Laser Melt*, um processo *L-PBF*), variando parâmetros de velocidade de varredura e espaçamento de trajetória. O estudo concluiu que as peças EH36 podem ser produzidas usando *SLM* e que isso forneceu o trabalho de base para a viabilidade técnica de fabricação de componentes de aço de alta resistência à tração para a indústria de construção naval.

Jing *et al.* (2018) verificaram a anisotropia do aço EH36 em amostras fabricadas por MA. O trabalho envolveu ensaios mecânicos de tração e fadiga em chapas depositadas, em 4 direções diferentes com esse aço em pó processadas com LENS (*Laser Engineered Net Shaping – Optomec®*, um processo *L-DED* com pó). As amostras com direção de construção horizontal resultaram em propriedades mecânicas superiores em comparação com peças feitas convencionalmente. No entanto, as amostras com direção de construção vertical ou direções de construção vertical de 45° tiveram propriedades comparáveis ou inferiores às peças feitas por métodos convencionais devido a defeitos de construção.

Outra classe de material amplamente estudada em MA para indústria de O&G e *offshore* são os aços inoxidáveis duplex e super duplex. Chandrasekaran, Hari e Amirthalingam (2020) realizaram um estudo experimental de materiais com graduação funcional (FGM - *Functionally Graded Material*), combinando aço inoxidável duplex (arame ER 2209) com aço carbono-manganês (arame ER 70S-6). Pré-formas foram depositadas com *WAAM-CMT* e comparadas com o aço X-52. O FGM proposto pelos autores mostraram vantagens em resistência e durabilidade e, portanto, foi visto como um candidato promissor para aplicações em *risers* marítimos. Outros trabalhos utilizando duplex com o processo *WAAM* foram estudados por Knezović *et al.* (2019) e Mattos (2021).

Na linha dos super duplex, Lervåg *et al.* (2020) publicaram um extenso trabalho com diferentes aportes térmicos com arame de aço inoxidável super duplex (*LNM Zeron 100X* da marca *Lincoln Electric*) na fabricação de paredes finas, a fim de investigar a formação de fases deletérias, tendo sido as paredes realizadas com o processo *WAAM-CMT*. Devido aos múltiplos ciclos de aquecimento e resfriamento durante a deposição das camadas, fases secundárias frágeis podem se formar, por exemplo a fase intermetálica *sigma* (σ), mas, entretanto, nenhuma fase intermetálica foi encontrada nos aportes de calor estudados.

Outro trabalho publicado na linha dos super duplex com ênfase na fases intermetálicas foi publicado por Kannan *et al.* (2021). Neste caso, paredes finas com arame superduplex ER2594 foram depositadas com *WAAM MIG/MAG-Sinérgico*. Verificou-se através da microestrutura que a fração austenita-ferrita variou ao longo da parede devido à complexa história térmica durante a deposição. Fases prejudiciais, como *sigma* (σ) ou *lambda* (λ), não foram observadas, segundo os autores, devido à menor entrada de calor e temperatura adequada entre as camadas.

Para ligas especiais, foi encontrado o trabalho de Li *et al.* (2021) que destacaram o excelente desempenho mecânico e resistência à corrosão, cavitação, desgaste e incrustação biológica da liga de níquel-alumínio-bronze (Cu – 9Al – 5Fe – 5Ni), que é forte candidata para a fabricação de bombas, válvulas e hélices na indústria *offshore*. Entretanto é difícil alcançar a complexidade geométrica dessa liga usando os processos convencionais. Os autores publicaram um trabalho investigando a capacidade de impressão, microestrutura e desempenho mecânico de uma liga Cu – 9Al – 5Fe – 5Ni fabricada por LMD.

Segundo Xing *et al.* (2019) os danos da corrosão sob tensão será uma grande ameaça para as peças de MA de metal no ambiente marítimo. Esses autores estudaram efeito do tratamento de *peening* ultrassônico (UPT - *Ultrasonic Peening Treatment*) na resistência à corrosão sob tensão de componentes de AlSi10Mg fabricados por SLM. Uma série de medições e análises foram realizadas para os espécimes antes e depois do processo de UPT. As tensões residuais e a dureza dos corpos-de-prova foram medidas e a morfologia da superfície observada em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A resistência à corrosão sob tensão foi avaliada pelo ensaio de corrosão eletroquímica. Os resultados experimentais mostram que o UPT pode melhorar significativamente a resistência à corrosão sob tensão de corpos de prova fabricados com SLM.

Kovacs W. *et al.*, (2018) salienta que atualmente a MA não é uma rota de produção abordada pela *ANSI/NACE MR0175-2015/ISO 15156-31 (Petroleum and Natural Gas Industries—Materials for use in H2S-Containing Environments in Oil and Gas Production)*. Para utilizar os benefícios da MA em ambientes de serviço corrosivos, serão necessários novos requisitos de qualificação e teste de materiais. Assim, os autores propuseram determinar a resistência à fragilização por sulfetos (*sulphide stress cracking - SSC*) por meio de testes do Método A da norma *NACE TM01772* em relação ao material S17400 (pó de aço inoxidável martensítico endurecido por precipitação), e em seguida verificaram como esse limite de serviço foi impactado pela orientação e superfície de construção.

Em menores quantidades, foram encontrados trabalhos de fabricação de peças por MA para o uso direto no setor de O&G e *offshore*. A Siemens, *Gas and Power*, tem uma organização dedicada para implementar e adotar a tecnologia MA, o que permite aos engenheiros projetar novos componentes sem as barreiras e restrições dos métodos convencionais de fabricação. Um produto como a turbina a gás SGT-A35 (Industrial RB211 – Siemens), que tem aplicação mundial em *offshore*, foi aprimorado de várias maneiras pela MA. Panfili e Balestrino (2020) exploraram alguns dos esforços do desenvolvimento da MA para o SGT-A35, bem como os muitos benefícios que foram obtidos. Esses benefícios incluem maior confiabilidade e desempenho, simplificação da cadeia de suprimentos e fabricação, iterações mais rápidas e programas de desenvolvimento reduzidos e oportunidades para novas soluções de reparo e pós-venda.

Com os sensores embutidos na estrutura via MA é possível monitorar os preditores de manutenção e falhas com monitoramento da integridade estrutural. Essa tecnologia pode inovar a próxima geração de dispositivos *offshore* da indústria de O&G, capazes de fornecer dados de detecção de dentro do elemento estrutural de metal (JUHASZ *et al.*, 2020). Esses autores utilizaram um sistema *Ambit™* (processo Híbrido, usinagem *CNC* e *LMD*) para fabricar uma barra de tração com um sensor de deformação encapsulado na estrutura para fornecer uma demonstração de prova de conceito. A expectativa acerca do processo híbrido é ter o acesso à estrutura em etapas intermediárias da fabricação da estrutura para encapsular o sensor.

Chew *et al.* (2020) fabricaram por MA, com o aço *ASTM* A131 grau EH36, um nó de suporte com 70 kg (90 horas de deposição) que conecta a plataforma principal com as colunas para embarcação *offshore* semissubmersível, utilizaram o processo de *LAAM* (*Laser Aided Additive Manufacturing*, um processo *L-DED* a pó) para avaliar a viabilidade técnica e econômica, sendo que mais detalhes podem ser encontrados no artigo. Concluiu-se que a tecnologia *LAAM* é viável para a fabricação de grandes perfis estruturais de aço.

Deng, Kendall e Wakefield (2018) projetaram e fabricaram por *SLM* um anel de backup de ultra-alta expansão (utilizado na completação de poços revestidos) com desempenho superior em relação ao produto convencional. Os autores realizaram a otimização topológica para liberar os engenheiros das limitações de complexidade da forma e gerar projetos que visam objetivos extremos de desempenho. O novo projeto reduziu o número de peças a serem utilizadas e aumentou notavelmente a capacidade de expansão e a classificação de pressão. O anel foi fabricado em aço inoxidável 316 (pó AM 316 SS) e segundo os autores foram obtidos ótimos resultados, sendo que a Figura 2.27 mostra o desenho e o anel fabricado

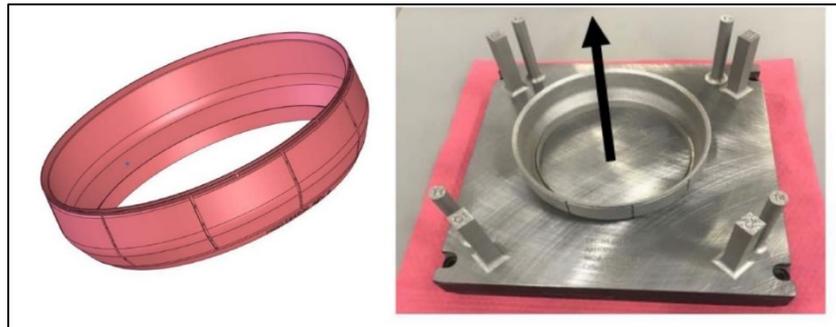


Figura 2.27 - Desenho (esq.) e peça real fabricada por *DMLS* (dir.) (DENG; KENDALL; WAKEFIELD, 2018)

Por fim, Burns e Wangenheim (2019), da *GE Company*, otimizaram e fabricaram via *SLM* de três componentes do setor de O&G e os testaram em campo. A primeira peça é uma grade de lama, sendo que o projeto original (Figura 2.28 - A) exigia que as barras de metal fossem redondas e soldadas ao tubo, de modo que o fluxo era turbulento, prejudicando desempenho e reduzindo sua vida útil. Para melhorar o desempenho do componente, foi realizado um estudo para otimizar o padrão de fluxo (Figura 2.28 - C). A versão mais otimizada, de menor erosão, foi fabricada via *SLM* (Figura 2.28 - B) e obteve-se um aumento de quatro vezes na vida útil em comparação com o projeto original. Além disso, o tempo de entrega foi reduzido em 80%.

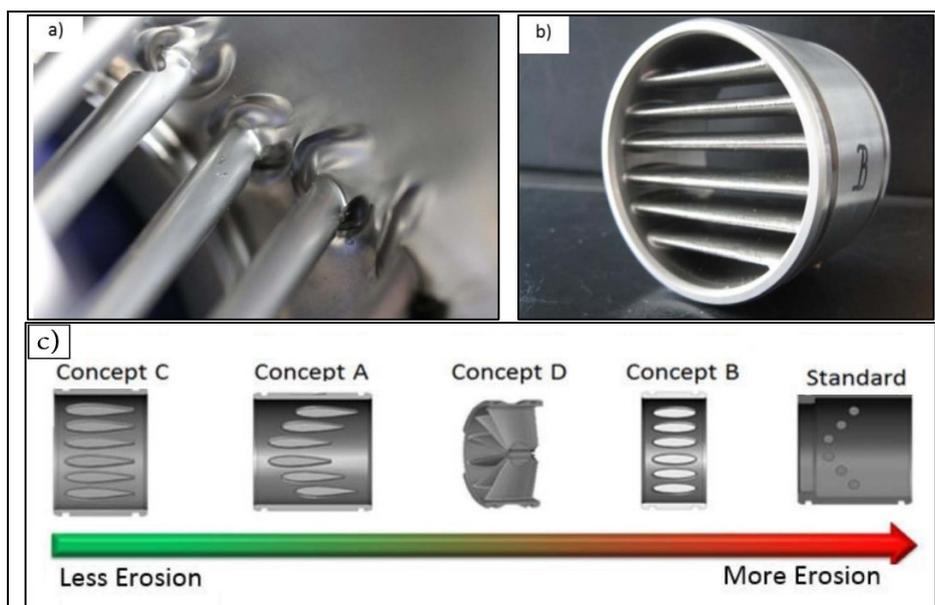


Figura 2.28 – A: grade original com barras circulares soldadas em barras soldadas, b: tela de lama otimizada produzido por MA e c: Estudo de otimização organizado de acordo com os resultados dos testes (BURNS; WANGENHEIM, 2019)

A segunda peça é um filtro que é composto por duas partes que são encaixadas entre si e o elemento filtrante, no interior do filtro, normalmente fabricado via usinagem por eletroerosão (EDM) para obter a precisão necessária para o bom funcionamento. Entretanto, tal rota demandava um longo prazo de entrega a um alto custo de aquisição. O filtro foi redesenhado para melhorar a funcionalidade e desempenho, as duas partes foram consolidadas para formar uma única peça, reduzindo um processo de montagem, e a área do filtro foi reprojetaada com uma estrutura helicoidal (Figura 2.29), resultando em um aumento de aproximadamente 50 % na área útil do filtro, uma malha mais resistente e capaz de lidar com variações de pressões. Embora os autores afirmem que componente fabricado via MA teve redução de mais de 70 % no custo da peça em comparação com o método de fabricação convencional, não mostram como foi feito este cálculo.

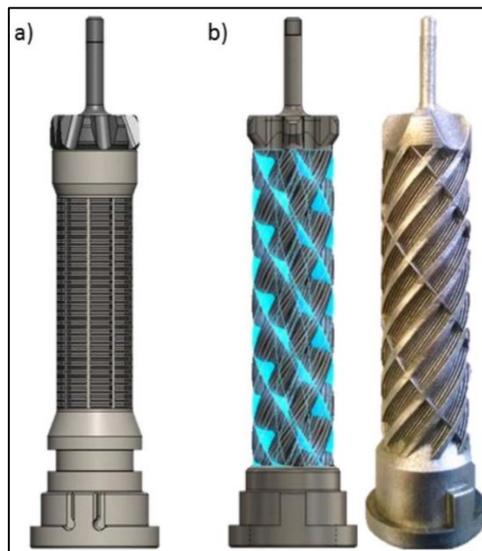


Figura 2.29 – a) modelo *CAD* original e b) modelo *CAD* MA redesenhado e peça fabricada (BURNS; WANGENHEIM, 2019)

O terceiro componente é um desviador de fluxo, tradicionalmente fresado, que estava desgastando rapidamente levando a falha prematura, sendo que a durabilidade média do desviador era de 45% da vida útil esperada. Os componentes foram redesenhados para aproveitar os benefícios do processo de MA (ou seja, liberdade de projeto), no caso via *SLM*, e enviados para operação. Em comparação com os desviadores de fluxo fresados, aqueles produzidos por MA foram mais duradouros, sendo que 5 deles apresentaram vida útil acima de 65% da vida esperada. Os autores associaram o bom desempenho dos desviadores ao design bastante aprimorado, no qual as câmaras internas dos desviadores de fluxo são mais curvas e em forma de lua em comparação com a versão fresada, conforme a Figura 2.30.

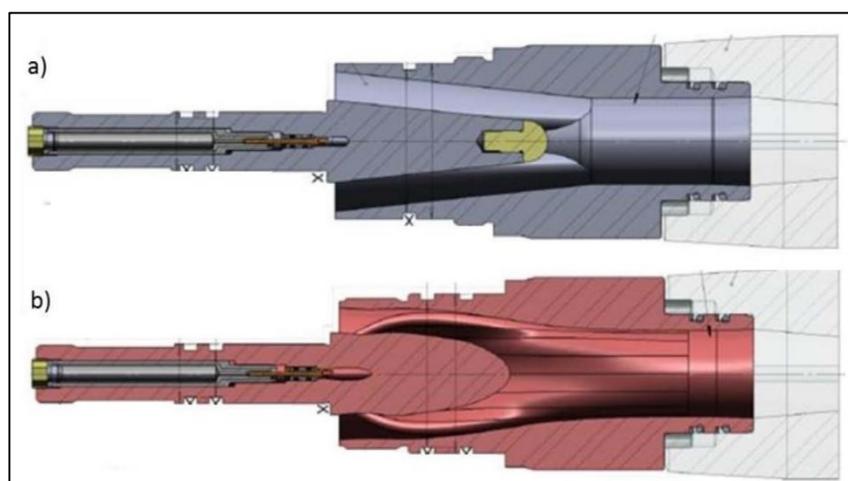


Figura 2.30 –a) desviador de fluxo fresado padrão e b) desviador de fluxo reprojetoado (BURNS; WANGENHEIM, 2019)

Tabela 2.14 - Tabela descritiva dos artigos que realizaram estudos e/ou materializaram peças de uso diretamente ligados à indústria Óleo & Gás, naval e *offshore*

Autores	Setor	Processo	Material	aramé/pó	Tipo de peça
Chandrasekaran; Hari; Amirthalangam, 202;	Naval	<i>DED - WAAM-CMT</i>	Duplex	Arame	Paredes em escala de laboratório, com aplicação em <i>riser</i> marítimos
Chew <i>et al.</i> , 2020	O&G naval	LAAM	<i>ASTM A131</i> , grau EH36	Pó	Nó de treliça <i>offshore</i> ; Semi-submersível
Deja; Siemiatkowski; Zielinski, 2020	<i>offshore</i>	<i>DMLS</i>	<i>Nickel alloy IN718 e Maraging Steel MS1</i> , ambos EOS®	Pó	Simulação, comparação com processo <i>CNC</i> de usinagem
Deng; Kendall; Wakefield, 2018	O&G	SLM	AM316 SS (inox 316)	Pó	Anel ascendente do <i>completion packer</i> , tubulação fundo do mar
Ebrahimi; Kenny; Mohammadi, 2021	<i>offshore</i> , Naval	<i>DMLS</i>	Inox e aço	Pó	Simulação de tubos (MA) soldados
Eriksson <i>et al.</i> , 2018	O&G	<i>DED-WAAM-CMT</i>	Superduplex	Arame	Pesquisa em paredes
Jing <i>et al.</i> , 2018	O&G <i>offshore</i>	LENS	<i>ASTM A131</i> Aço EH 36	Pó	Pesquisa com chapas e ensaios

Tabela 2.15 - Tabela descritiva dos artigos que realizaram estudos e/ou materializaram peças de uso diretamente ligados à indústria Óleo & Gás, naval e *offshore* (continuação)

Juhasz <i>et al.</i> , 2020	O&G <i>offshore</i>	Híbrido (usinagem CNC e DED/LMD)	diversos	Pó	Pesquisa de sensor infraestrutura
Kannan <i>et al.</i> , 2021	O&G	DED-WAAM	SuperDuplex	Arame	Pesquisa com paredes finas
Klapper <i>et al.</i> , 2019	O&G	SLM	718 (UNS N07718) a liga de níquel	Pó	Pesquisa em paredes
Knezović <i>et al.</i> , 2019	O&G	WAAM-GMA	Aço inoxidável duplex	Arame	Parede fina
Lervåg <i>et al.</i> , 2020	O&G	WAAM-CMT	SuperDuplex	Arame	Estudo em paredes
Li, B <i>et al.</i> , 2021	Naval e <i>offshore</i>	LMD	Liga Cu – 9Al – 5Fe – 5Ni	Pó	Estudo em escala de laboratório
Mondragón-Rodríguez <i>et al.</i> , 2020	Aeroespaciais de defesa, petróleo e gás	L-PBF	Inconel (IN718)	Pó	Estudo em escala de laboratório
Saint John <i>et al.</i> , 2016	O&G	L-PBF	Inconel 718	Pó	Estudo em escala de laboratório
Sutton <i>et al.</i> , 2019	O&G	L-PBF	Inconel 718	Pó	Estudo em escala de laboratório
Verdi <i>et al.</i> , 2021	O&G, aeroespacial, produção de energia	LMD	Inconel 625	Pó	Blocos para ensaios de Charpy Vertical e horizontal
Wu, W <i>et al.</i> , 2015	Naval	SLM	ASTM A131 EH 36 steel	Pó	Estudo em escala de laboratório
Burns e Wangenheim (2019)	O&G	SLM	Inox e outros materiais	Pó	Otimizaram, fabricaram e testaram uma grade, um filtro e desviador de fluxo

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Inicialmente, se apresenta uma metodologia de fabricação de flanges de pescoço pelo processo *GMA-DED*. O flange estudado possui a classificação conforme a Tabela 3.1 (conforme detalhado na secção 2.4). Durante o desenvolvimento da metodologia variou-se alguns parâmetros para analisar o impacto no tempo, qualidade e nos custos de fabricação via *GMA-DED*, sendo que os parâmetros que foram variados estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 - Classificação do flange de estudo

Tipo	Flange de Pescoço Soldável (<i>Weld Neck Flange</i>) ASME B16.5
Diâmetro Nominal	2"
Schedule	Padrão
Classe de pressão	300
Tipo de face	Ressalto 2 mm
Material	F22 – Classe 3 - <i>ASTM A182</i>

Tabela 3.2 – Condições testadas

Parâmetros	Variáveis
Processo MADA	GMA-DED-Pulsado e GMA-DED-CMT
Material de deposição	ER 90S B3
Sistema de Movimentação	Robô MotoMan HP20 e Mesa de Coordenadas <i>CNC</i>
Gerenciamento térmico	Sem e com RAQI
Trajectoria	3 trajetórias diferentes
Tratamento térmico	Com e sem tratamento térmico

Entre as várias técnicas de gerenciamento térmico abordados na revisão utilizou-se a invenção referida em BR1020180153145 – técnica de resfriamento ativo para manufatura aditiva por deposição com energia direcionada batizada pelos autores de RAQI ou *NIAC* do inglês *Near-Immersion Active Cooling*. As operações de pós-processamento foram usinagem, tratamento térmico e inspeção final. A usinagem ocorreu para a retirada das ondulações

deixadas por cada camada e para atender as dimensões e tolerâncias exigidas, para realizar a furação do componente e fazer o acabamento da face do flange. Já o tratamento térmico foi utilizado para conferir as propriedades mecânicas adequadas. Por fim, para analisar o tempo e os custos de fabricação utilizou-se o método por absorção pleno com departamentalização.

A Figura 3.1 é um fluxograma geral da tese como forma de apresentar também um panorama da metodologia seguida.

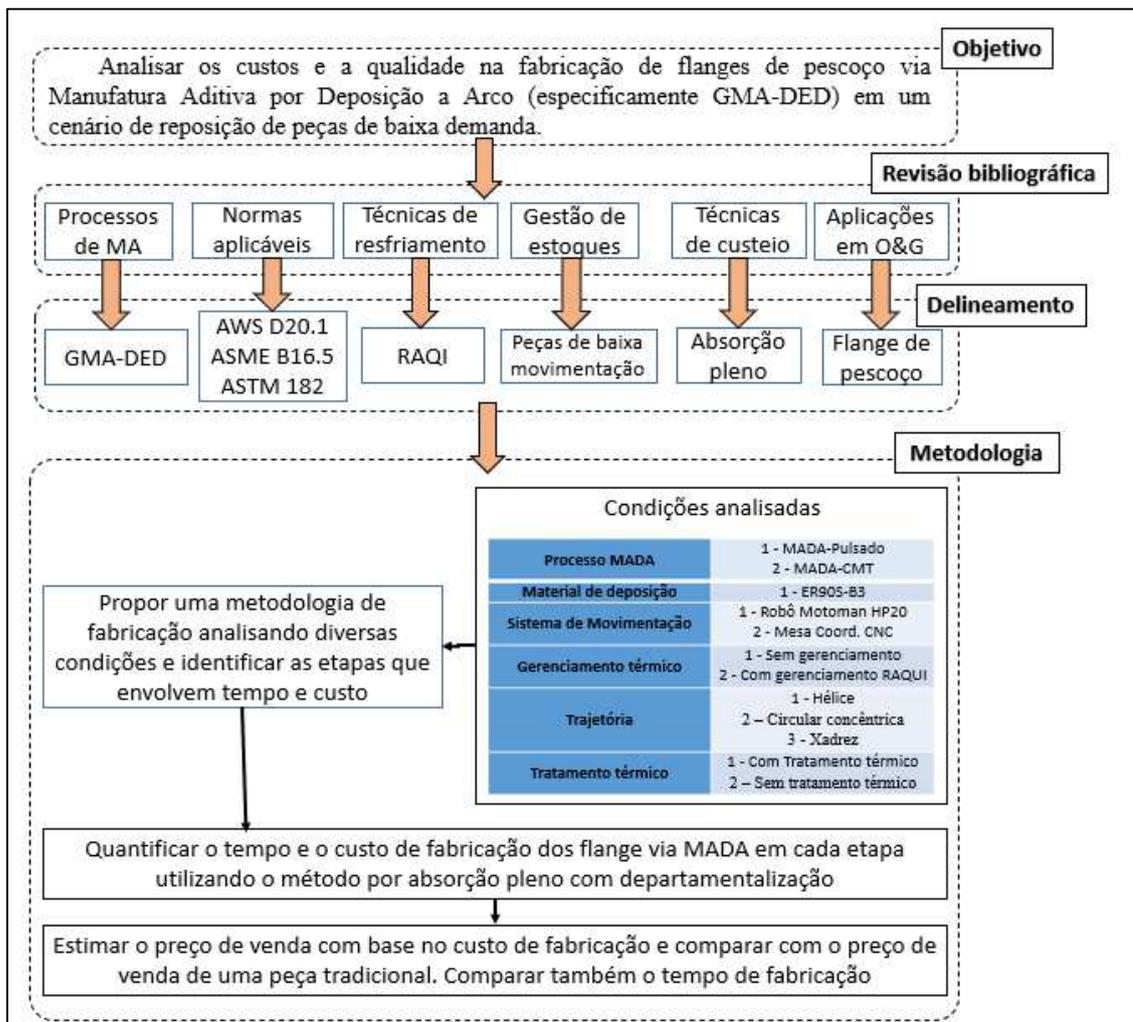


Figura 3.1 – Fluxograma da tese

3.1 Materiais, Equipamentos, Instrumentação e Inspeção

3.1.1 Materiais para a deposição

O material do substrato de deposição foi um aço carbono SAE 1020: 200x200x19 mm. O arame escolhido para as deposições foi o ER 70S 6 (Pré-teste) e o ER 90S-B3 (correspondente

mais próximo do F22 – O *datasheet* do arame está em Anexo 1). O gás de proteção foi Ar+4 %CO₂.

3.1.2 Equipamentos de deposição

3.1.2.1 Fontes de deposição

Dentre as diferentes possibilidades do processo *GMA-DED*, utilizou-se neste trabalho duas variantes, que são: *TransPuls Synergic* (pulsado); e o *CMT (Cold Metal Transfer)*, ambos os processos com uma fonte da Fronius®. A Figura 3.2 mostram os equipamentos. No modo pulsado utilizou-se a fonte Fronius® modelo *TransPuls Synergic 5000/MV*. Trata-se de uma fonte inversora totalmente digitalizada comandada por microprocessadores, e conta com uma unidade central de comando e regulação da deposição que é acoplada a um processador de sinais digitais. A unidade de comando e regulação central e o processador de sinais controlam o tempo todo o processo de deposição. Durante a deposição, os dados reais serão medidos permanentemente e as alterações serão imediatamente reajustadas, e os algoritmos de regulação providenciam para que o respectivo estado nominal desejado continue preservado.

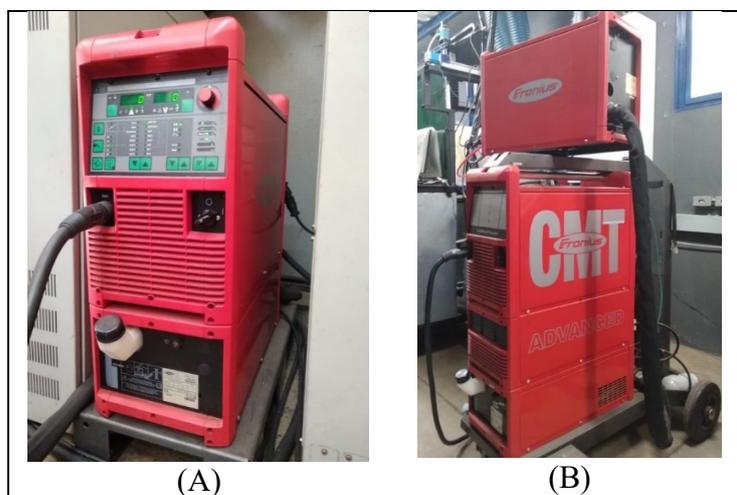


Figura 3.2 – A) Fonte de deposição, *Fronius TransPuls Synergic 5000/MV*; B) *Fronius CMT Advance VR 7000* (direita)

Dois parâmetros foram ajustados no controle para alcançar melhores resultados de deposição: Correção do Comprimento do Arco Voltaico (mais curto ou mais longo); e a Correção do destacamento das gotas/correção Dinâmica (mais pulso ou menos pulso). Tais parâmetros, uma vez ajustados, não demandam necessidade de alteração. Sinais de tensão e corrente foram adquiridos por um sistema externo, que será detalhado mais adiante.

Além do processo *GMA* pulsado, foram analisadas deposições de pré-formas com o *CMT* (*Cold Metal Transfer*) que tem menor aporte de calor e maior estabilidade do arco. O controle digital do processo detecta um curto-circuito e ajuda a destacar a gota retraindo o arame. Durante a deposição, o arame se move para frente e é puxado novamente assim que ocorre o curto-circuito. Como resultado, o arco só introduz calor por um período muito breve durante a fase de reignição do arco. O curto-circuito é controlado e a corrente é mantida baixa, resultando em uma transferência de material com baixo respingo. O comprimento do arco é detectado e ajustado mecanicamente. O arco permanece estável, independentemente da superfície da peça de trabalho ou da velocidade de deposição do usuário. A fonte utilizada no modo *CMT* foi a *Fronius CMT Advance VR 7000*.

3.1.2.2 *Sistemas de movimentação e resfriamento RAQI*

Inicialmente a execução das trajetórias para as deposições de paredes e construções dos flanges foram feitas com o Robô Motoman HP 20 com controlador NX 100 (Figura 3.3). Trata-se de um robô articulado de 6 graus de liberdade com repetibilidade de $\pm 0,06$ mm com até 1717 mm de alcance horizontal. Junto com a bancada do robô, utilizou-se um módulo opcional de gerenciamento térmico RAQI (Figura 3.4), sendo que mais detalhes do desenvolvimento deste sistema podem ser encontrados na patente o BR1020180153145.

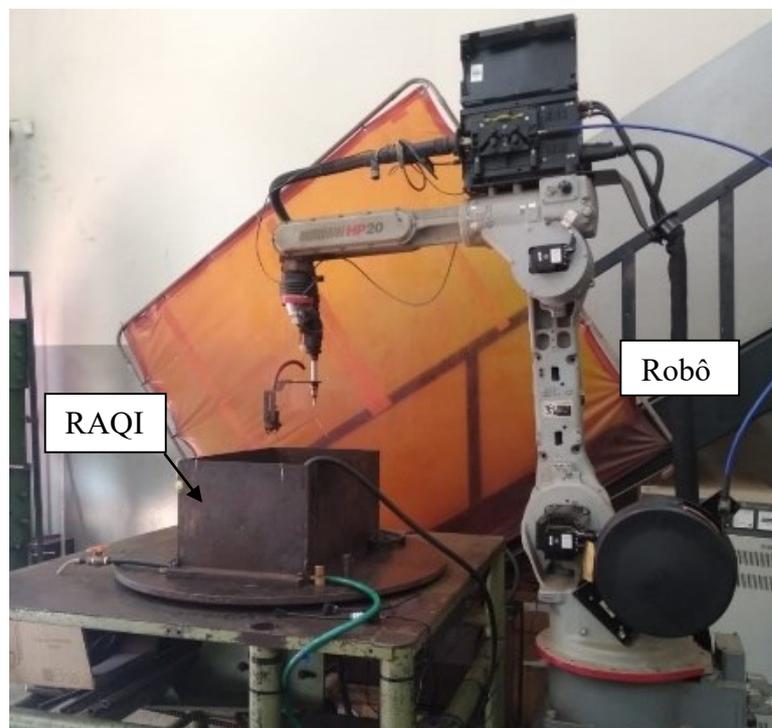


Figura 3.3 - Robô Motoman HP 20 com RAQI

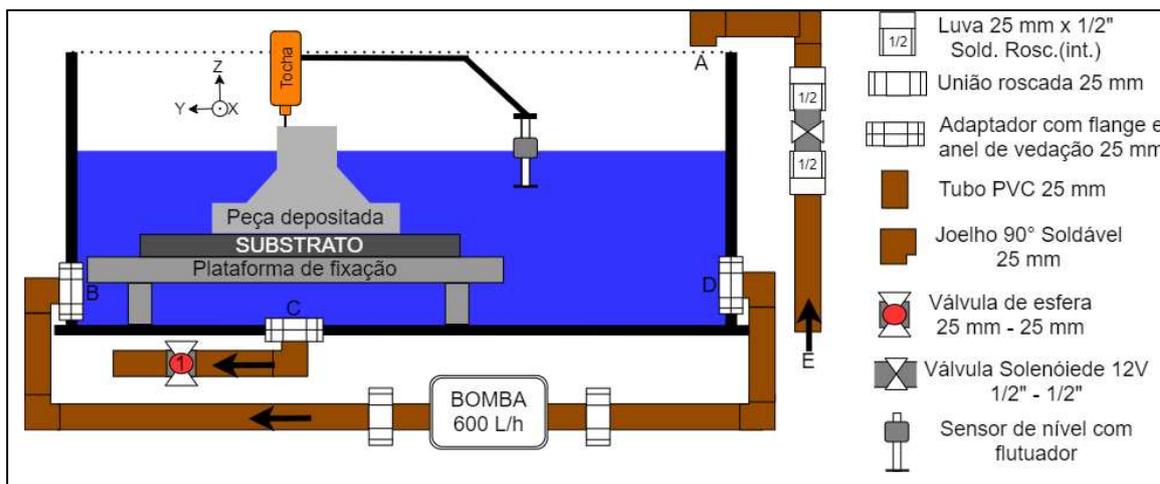


Figura 3.4 – Módulo de gerenciamento térmico por RAQI instalado na bancada junto ao Robô

A recirculação da água no RAQI é feita por uma bomba e dois pontos de água, um de sucção (ponto D) e outro de recalque (ponto B), e essa recirculação é responsável por agitar a água dentro da cuba melhorando a troca térmica da peça com a água (Figura 3.4). A refrigeração da água dentro da cuba é feita pelo descarte contínuo da água quente e injeção de água fria. O descarte da água se dá por gravidade pelo ponto C (indicado na Figura 3.4) que é controlado através da válvula 1. À medida que a água sai da cuba o flutuador do sensor de nível se desloca para a parte inferior da haste, emitindo um sinal de abertura da válvula solenoide de 12V. O ponto E é uma tomada de água comum, e com a abertura do solenoide a água entra na cuba pelo ponto A, fazendo com que o flutuador se desloque para a parte superior da haste, cessando o sinal do solenoide e fechando a válvula. Desse modo, como a água quente está continuamente saindo da cuba enquanto a água fria está entrando, o controle da válvula 1 implica diretamente no controle da temperatura da água dentro da cuba. Paralelamente, o sensor de nível atua também para manter a distância da lâmina da água constante em relação ao nível de deposição. À medida que a deposição ocorre a tocha se desloca em direção ao Z+, a haste do sensor de nível se desloca para cima, fazendo com que o flutuador do sensor fique na parte inferior da haste, emitindo um sinal de abertura da válvula solenoide e injetando água fria pelo ponto A. Com a injeção de água, o flutuador se desloca para a parte superior da haste cessando o sinal, fechando a válvula.

Um outro equipamento de coordenadas bidimensional (XZ) para deposição de paredes com RAQI foi originalmente desenvolvido por Silva (2019). Para este presente trabalho, realizou-se um *retrofit* do equipamento supracitado para a inserção do terceiro eixo (Y) para a deposição de peças tridimensionais. Todo o trabalho de *retrofit* está detalhado no Apêndice A.

A Figura 3.5 mostra o *retrofit* pronto, sendo formado basicamente por uma mesa de coordenadas tridimensionais para a deposição das peças e utilização do software *Mach 3* para a movimentação dos eixos de coordenadas (XYZ - linguagem de programação *G-Code*). O quarto eixo é o W, um eixo programável que controla a distância da lâmina da água até a deposição da peça. A cuba RAQI tem 815 mm x 600 mm x 400 mm, totalizando ~200 L. A plataforma de fixação tem 540 mm x 400 mm de base, que corresponde verdadeiramente a área útil de deposição, a altura do volume útil é de 300 mm, tendo assim um volume útil de deposição de 540 mm x 400 mm x 300 mm, totalizando 64,8 L. O interior da cuba possui um trocador de calor com a função de refrigerar a água no interior da cuba, tendo esse trocador um circuito de água gelada fechado com uma unidade de refrigeração. A Figura 3.6 mostra um desenho do esquema de recirculação de água atmosférico por bomba d'água. Com a válvula 4 fechada e a 5 aberta a bomba impulsiona a água em direção a cuba pela tubulação de recalque. O fluxo de água entra na cuba pelos pontos A e B, sendo que o ponto A tem a função de agitar a água dentro da cuba e/ou direcionar o fluxo por meio de um ducto flexível em algum ponto específico da peça. Já o ponto B direciona o fluxo contra um trocador de calor que está conectado em um circuito fechado com uma unidade de refrigeração de água, onde é possível ajustar sua vazão e temperatura.



Figura 3.5 – Mesa de coordenadas CNC com eixos XYZW independentes

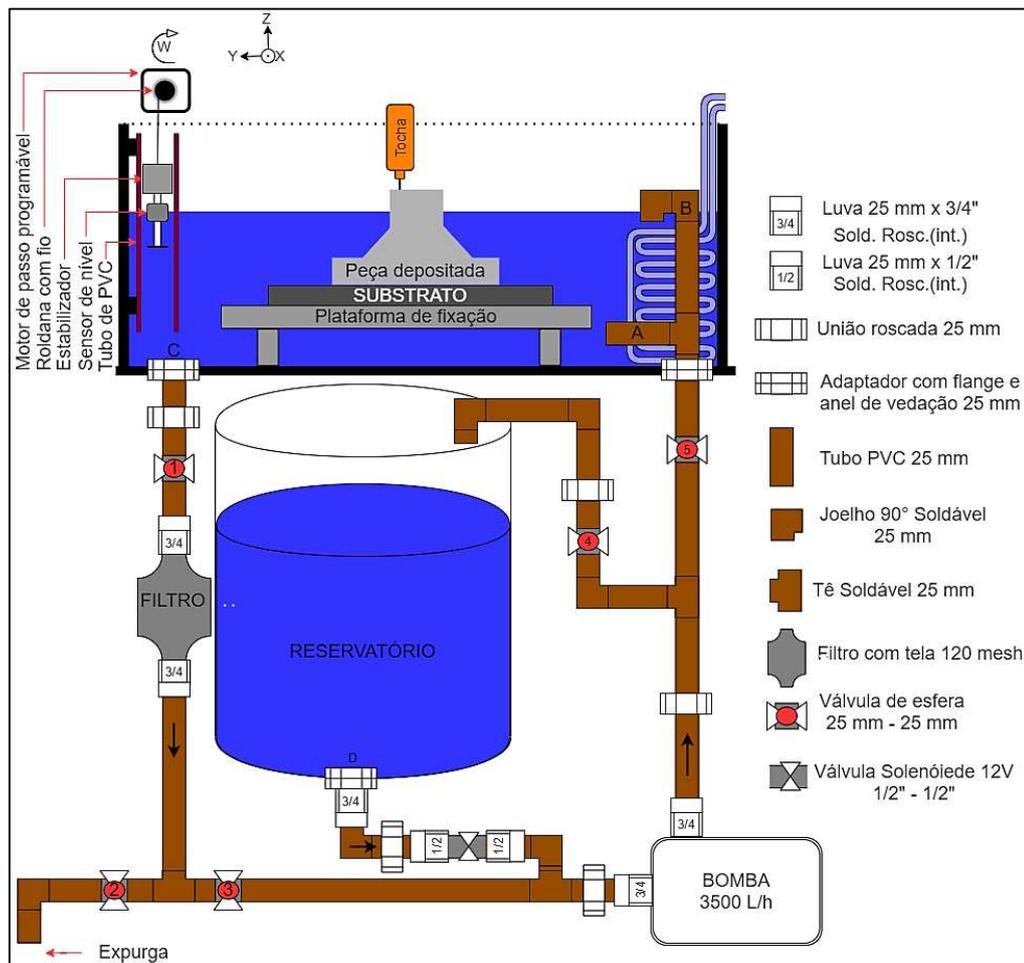


Figura 3.6 – Montagem esquemática da técnica RAQI utilizada em conjunto à mesa CNC

Com as válvulas 1 e 3 abertas e a 2 fechada a água dentro da cuba é sugada pelo ponto C, onde passa por um filtro de 120 mesh para captar resíduos que possam danificar a bomba. Depois do filtro o fluxo segue pela tubulação de sucção, e enquanto a bomba estiver ligada a água estará circulando e sendo filtrada.

Com o gerenciamento térmico da peça, à medida que a deposição ocorre e a tocha sobe em direção ao eixo Z+, é necessário subir o nível de água. Com o eixo W escravo do eixo Z ambos deslocamentos terão a mesma medida, e com isso a haste do sensor de nível se desloca para cima, fazendo com que o flutuador do sensor fique na parte inferior da haste, emitindo um sinal de abertura da válvula solenoide situada abaixo do reservatório de água. Com isso a água do reservatório é aspirada pelo tubo de sucção da bomba enchendo a cuba, e esse enchimento ocorre até o flutuador do sensor se deslocar para a parte superior da haste e cessar o sinal de abertura da válvula solenoide. Como o eixo W é totalmente independente e programável, ele não precisa ser necessariamente escravo do eixo Z, e desse modo pode-se programar diferentes

níveis de água durante a deposição, isso dá uma maior flexibilidade no gerenciamento térmico da peça. A válvula 2 é utilizada quando se deseja purgar a água do sistema e a válvula 4 quando é preciso retornar a água para o reservatório.

3.1.3 Instrumentação e parâmetros de controle

O sistema de aquisição de sinais de tensão e corrente utilizado foi composto por: Placa de aquisição da *National Instrument* modelo USB-6009 com resolução de 13 bits e faixa de medição de ± 10 V; Sensor de corrente; Sensor de tensão; Condicionador de sinais; Computador com software de aquisição de dados desenvolvido em *LabView*. Todo sistema de aquisição de dados foi calibrado antes da realização da deposição. Na obtenção dos sinais, empregou-se frequência de aquisição de 5 kHz para a tensão e corrente de deposição. O condicionador de sinais é responsável por receber os sinais de tensão e corrente, digitalizar a uma frequência de 5 kHz e enviar ao computador. Desse computador, através do *LabView* apresenta o oscilograma de tensão e corrente (Figura 3.7) para avaliação de estabilidade, energia, modo de transferência e eventuais falhas de deposição.

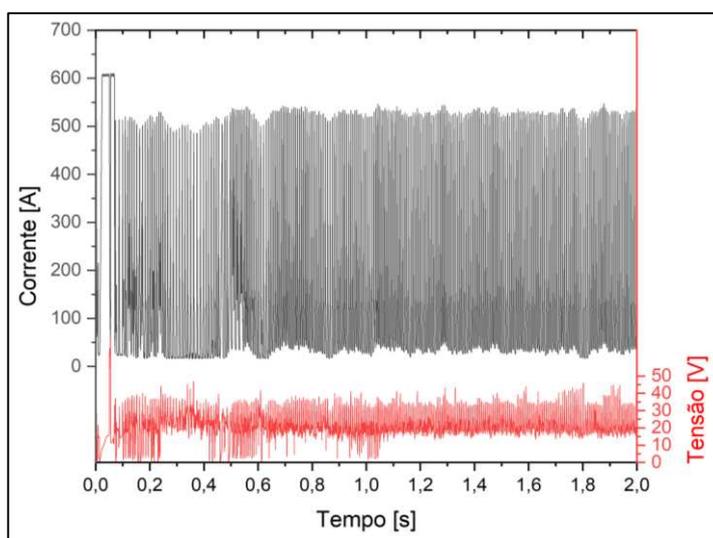


Figura 3.7 –Exemplo de dados de tensão e corrente adquiridos

3.1.4 Equipamentos para tratamento térmico

Quando necessário as peças poderão passar por um tratamento térmico para conferir as propriedades mecânicas necessárias. Nesse trabalho foi utilizado um forno de resistência elétrica de 3 600 W da JUNG (Modelo 2513) com controlador *PID* (*Proportional – Integral – Derivative* – Modelo: *Novus 1100*) com capacidade de até 1300 °C e com mostrador de

temperatura em tempo real. É possível programar até 20 trechos entre: subida; patamar; e descida. O registrador de temperatura utilizado é o EXTECH INSTRUMENT HD 200, que possui interface com um software computacional para registros de temperatura de 1Hz com resolução de 0,1°C, sendo que o termopar utilizado foi do tipo K (-200 °C a 1372 °C).

3.1.5 Equipamentos de metalografia, micrografia e medidas de microdureza

Amostras dos flanges e paredes depositadas foram preparadas e analisadas em microscópio óptico e depois ensaiadas em microdurômetro. Para o preparo das amostras elas foram cortadas, embutidas (se necessário), lixadas, polidas (se necessário) e atacadas em Nital (solução de álcool e ácido nítrico) entre 5 – 8 %. Para o corte de amostras depositadas foi utilizada a cortadora metalográfica CM 120 TECLAGO com unidade de circulação de fluido corte, e quando necessário utilizou-se a embutidora EM400 TECLAGO.

Depois de esquadrear as amostras, elas foram lixadas de 120 *mesh* a 1200 *mesh* e quando necessário polidas mecanicamente com alumina de 1,0 µm até 0,25 µm.

Para obtenção dos valores de microdureza das regiões de interesse do material foi utilizado um microdurômetro SHIMADZU modelo HMV-G série 2, com capacidade de ajuste de carga variando de 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500g, 1000g e 2000 g, correspondente a HV = 0,01, 0,025, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1 e 2 respectivamente. O microdurômetro conta com uma objetiva de 40 vezes.

Foi utilizado o microscópio óptico LEICA DM750 com câmera LEICA MC120 HD conectada ao computador para a visualização em tempo real e aquisição das imagens (5 lentes de aumento que são: 5, 10, 20, 50 e 100 vezes).

3.2 Equipamentos de ensaio mecânicos, análises e inspeção

Os ensaios de tração foram realizados em um equipamento SHIMADZU AGX 300KN. As amostras retiradas do flange foram feitas com base na ASTM 370 (Figura 3.8) conforme determina a norma de material ASTM 182.

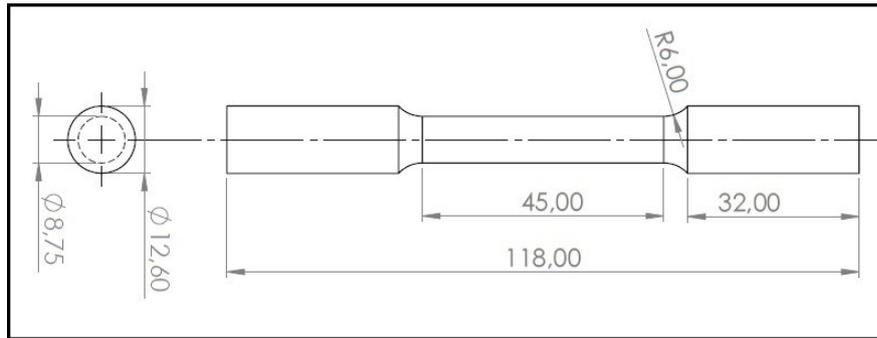


Figura 3.8 – Dimensões do corpo de prova de tração

Os ensaios de impacto foram de acordo com *ASTM 370*, sendo as dimensões dos corpos de provas normais (10 x 10 x 55 mm) com entalhe em V (Figura 3.9). A amostra é resfriada abaixo de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, com nitrogênio líquido, em seguida é posicionada no equipamento, com o auxílio de um termopar de contato (tipo K) conectado ao um mostrador de temperatura EXTECH INSTRUMENT HD 200 (o mesmo utilizado para o tratamento térmico da secção 4.3.5) com o qual se monitora a temperatura da amostra até atingir a temperatura do ensaio ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$), e em seguida libera-se o pêndulo realizando assim o teste de impacto.

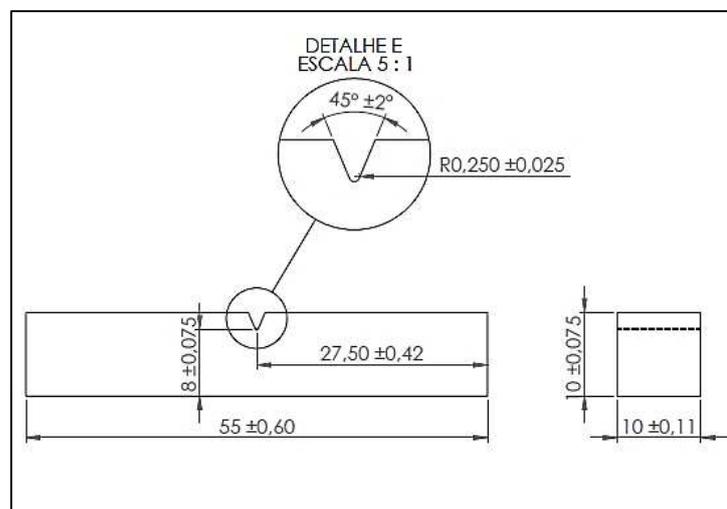


Figura 3.9 – Dimensões do corpo de prova de impacto

A Figura 3.10 mostra o local de onde foram retirados os corpos de provas de tração e de Charpy no flange. As microdurezas e micrografias foram feitas na parte traseira do corpo de prova de impacto.

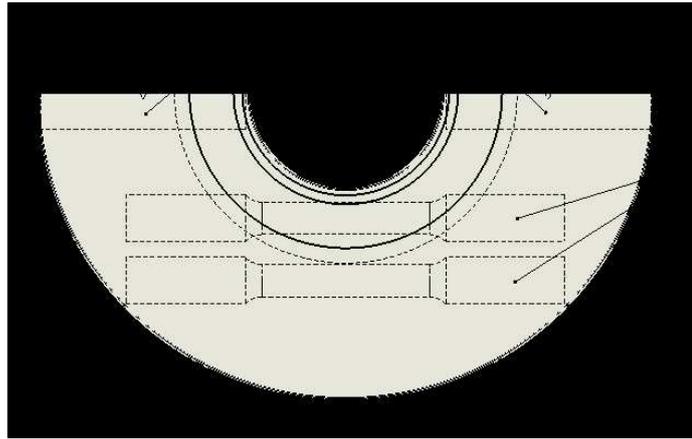


Figura 3.10 – Vista superior da metade do flange indicando a disposição dos corpos de prova de impacto e tração

Para a análise da composição química foi utilizado um analisador portátil por fluorescência de raios X (RFX) da *Olympus modelo Vanta*™. Esse ensaio não destrutivo, além de auxiliar na classificação correta das ligas independentemente da origem do material, mostra o percentual de cada elemento detectado (exceto o Carbono).

3.2.1 Ensaio não destrutivo por Ultrassom

A maior parte da geometria do flange é circular com faces não paralelas, o que dificulta a inspeção por ultrassom e exige transdutores específicos. Assim, o ensaio não destrutivo por ultrassom foi realizado apenas na aba do flange (sem os furos) com a utilização de um transdutor normal pulso-eco da KARL DEUTSCH – ECHOGRAPH 9000.

3.2.2 Ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante (LP)

Os ensaios por líquido penetrante foram realizados de acordo com a norma Petrobras N1596. Dependendo do caso, o ensaio foi realizado sobre a superfície como depositada com escovamento manual, ou sobre a superfície usinada. Realizou-se a limpeza previa da superfície, eliminando quaisquer vestígios de óleo, graxa e óxidos. Aplicou-se o líquido penetrante sobre toda a superfície a ser analisada a uma temperatura entre 20 e 40 °C (ambiente) que se manteve úmida durante todos o tempo de penetração que foi de 15 minutos. Após os 15 minutos, fez se a limpeza do líquido penetrante sobre corrente branda de água, retirou-se o excesso de água sobre a superfície com um papel absorvente e a secagem final da peça foi ao natural por cerca de 5 minutos. Só então aplicou-se o revelador aerossol de modo a obter uma fina camada de revelador. A secagem do revelador foi ao natural por cerca de 10 minutos. Após este

procedimento, fez-se os registros fotográficos e medições das descontinuidades reveladas pelo contraste do líquido vermelho com o fundo branco.

3.2.3 Outros equipamentos de oficina

Em menor uso, torneadora (TIMEMASTER modelo CDL 400), fresadora (FG modelo 5KVIG) e serra de fita (SAWMASTER modelo SM 330M) são equipamentos convencionais de remoção de material, que foram utilizados para a fabricação dos flanges. Eles foram utilizados para cumprir os requisitos dimensionais desses componentes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Desenvolvimento da metodologia de deposição para flanges – Flange 1

A *AWS D20.1* não fornece uma metodologia de fabricação e sim os requisitos de projeto, qualificação, fabricação, inspeção e critérios de aceitação a serem seguidos. Assim, esta secção tem como objetivo criar uma metodologia de fabricação de flanges via *GMA-DED*, atendendo as considerações da *AWS D20.1*, *ASME B16.5* da *ASTM A182*, e outras normas auxiliares. No decorrer do desenvolvimento da metodologia de fabricação em *GMA-DED* foram identificadas 7 etapas, conforme ilustra a Figura 4.1:



Figura 4.1 – Etapas sequenciais de fabricação de um flange de pescoço via *GMA-DED*. 1) Modelagem 3D e definição do produto; 2) Geração do arquivo *STL*; 3) Planejamento da trajetória de deposição; 4) Composição da linguagem de programação; 5) Deposição; 6) Pós processamentos; 7) Acabamento e inspeção

No método de custeio por absorção pleno com departamentalização, com enfoque em peças sob demanda, o produto absorve todos os custos incorridos no período de fabricação.

Sendo assim, ao longo das discussões de cada etapa serão identificadas quais são as atividades envolvidas e os recursos consumidos.

4.1.1 Modelagem 3D e definição do produto – etapa 1

Os requisitos mínimos que compõe o conjunto de dados de definição do produto pela *AWS D20.1* são:

- (1) Nível de classificação do componente (Classe A, B ou C);
- (2) Desenho ou modelo das dimensões finais exigidas dos componentes, incluindo os requisitos de acabamento da superfície.
- (3) Tipo do material do componente e propriedade mecânicas;
- (4) Requisitos de pós-processamento de componentes;
- (5) Requisitos de inspeção e critérios de aceitação.

A seguir serão discutidos os requisitos do produto:

Requisito (1): Em função dos riscos da não integridade dos flanges para o setor de óleo e gás, este foi classificado como B, que segundo a *AWS D20.1* é para aplicação semicrítica, onde o componente cuja falha reduziria a resistência geral do equipamento ou sistema ou impediria o funcionamento ou uso pretendido do equipamento, mas não ocorreria a perda do sistema ou o perigo do pessoal.

Requisito (2): A modelagem 3D consiste na representação matemática de um objeto através de *softwares CAD 3D (Inventor, SolidWorks, Autodesk, Solidedge)*, sendo que pode ser feita de forma manual diretamente no software através das ferramentas de linha, círculo, extrusão, corte, ressaltos etc., ou de forma semiautomática através de *scanners 3D (Creaform 3D, por exemplo)*. A depender das informações disponíveis da peça a ser modelada foram identificados 4 níveis de dificuldade que impactam diretamente no tempo e nos custos de fabricação:

Nível 1 – Quando a peça já está modelada em algum software *CAD 3D*, neste nível basta a transferência do arquivo e se atentar com a compatibilidade. O tempo considerado para obter o modelo 3D neste nível foi de 4 horas.

Nível 2 – Quando o desenho da peça está impresso em papel ou em *CAD 2D* é necessária a transcrição do desenho 2D para um software *CAD 3D*, e o tempo considerado para modelagem neste nível, considerando uma boa expertise do desenhista, foi de 8 horas.

Nível 3 – Quando não existe o desenho da peça, entretanto o componente é normatizado. Neste nível deve-se obter o acesso às normas, compreender e criar o modelo tridimensional. O tempo considerado para modelagem neste nível, considerando uma boa expertise do desenhista, foi de 16 horas.

Nível 4 – Quando a peça não é padronizada e não existe o desenho. Neste caso deve-se ter acesso ao componente que pode estar desgastado, falhado ou distante do local de fabricação. As medições devem ser feitas diretamente na peça ou quando há tecnologia disponível a modelagem pode ser feita através de Scanners 3D. A complexidade da modelagem neste nível torna-se uma etapa cara e demorada, além disso, deve-se estimar as tolerâncias desejáveis para a peça final. Neste caso, o tempo para modelagem neste nível pode ser considerado em dias.

Requisito (3): O Tipo do material do componente e as propriedades mecânicas foram discutidos na secção 2.5. Os pós-processamentos são remoção da peça do substrato, torneamento, furação e tratamento térmico que serão detalhados mais adiante.

Requisito (4): Os requisitos de inspeção do componente fabricado, por se tratar de um componente classe B são: Inspeção Visual; Inspeção Dimensional; Líquido Penetrante ou Partícula Magnética; Teste Radiográfico; e Teste de Densidade. O teste radiográfico e teste de densidade não foram realizados, mas para efeito de custo serão considerados. Além disso, foram realizados ensaios de Charpy-V a -30 °C para atender a uma especificação da Petrobras - ET-5000.00-0000-500-PPC-001 (*Additional Requirements For CrMo and CrMoV Low Alloy Steels*), e como critério de aceitação não pode haver nenhum teste menor que 47 J e a média deve ser superior a 55 J.

A depender da dificuldade para executar essa etapa os custos e o tempo podem ser completamente diferentes. Diante disso algumas empresas já investem na digitalização do estoque, isto é, ter parte do estoque em *CAD* 3D com todas as informações, visando uma futura fabricação por MA. Após todas essas definições, é redigido um contrato contendo todas essas informações, e isso leva tempo de dedicação do engenheiro, que mais adiante serão computados como custos ao produto.

A Tabela 4.1 mostra o tempo gasto (determinado nesta pesquisa) para esta etapa em função da dificuldade para se obter o desenho em *CAD* 3D e as demais informações padrões. Essas informações serão utilizadas mais adiante para a estimativa do custo de fabricação.

Tabela 4.1 – Estimativas do tempo gasto para a modelagem e definição do componente em função da dificuldade de acesso às informações

Obter ou criar o modelo 3D	
Dificuldade	Tempo*
Nível 1	4 h
Nível 2	8 h
Nível 3	16 h
Nível 4	Dias

*Tempo estimado a partir de consultores especializados e do volume de trabalho a ser realizado

4.1.2 Gerar o arquivo STL – etapa 2

A segunda etapa consiste em converter as superfícies do modelo 3D em um arquivo *STL*. Os arquivos *STL* (*Standard Triangle Language*) podem armazenar as informações do modelo de duas maneiras diferentes, em codificação binária e em codificação *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII). Na codificação *STL*, a descrição do sólido é feita por uma superfície discretizada em triângulos que possuem módulo, direção e sentido. O arquivo *STL* é uma malha de triângulos que serve para auxiliar os geradores de trajetória (próxima etapa), que mantêm as informações referentes à geometria das superfícies do objeto 3D e geralmente são gerados diretamente a partir software *CAD* 3D. Quanto maior o número de triângulos (a definir pelo usuário) mais bem definido o sólido será representado em *STL*, e por consequência melhor será a resolução.

Esta é uma etapa simples, e a conversão de arquivo leva no máximo alguns minutos e está disponível na maioria dos softwares *CAD* 3D. Em *GMA-DED* uma densidade média de triângulos é o suficiente para auxiliar no planejamento da trajetória. Embora essa etapa exista como uma atividade em si, os recursos consumidos (tempo e energia) são tão baixos que podem ser discretamente inclusos junto à etapa de desenho.

4.1.3 Planejamento da trajetória de deposição – etapa 3

A terceira etapa consiste em planejar um caminho de deposição para a materialização da peça, e para isto se requer o conhecimento da geometria do cordão. A partir das informações geométricas do cordão é possível propor uma trajetória para cada camada e definir a quantidade de camadas.

Esse planejamento é feito através da transformação do arquivo *STL* em uma sequência de pontos cartesianos. A união desses pontos sequenciais traça o caminho em que a tocha deverá

percorrer para a deposição do material. Nesse sentido, planejar um caminho de deposição requer pré-testes (escala reduzida) iterativos: Proposição da trajetória; Deposição; e Verificação.

A proposição da trajetória inicial parte da experiência prévia do operador/programador qualificado, e em seguida executa-se a deposição de uma pré-forma piloto e verifica a geometria depositada em termos de largura, altura e preenchimento. Assim, esse processo se repete até que se encontre um envelope de parâmetros satisfatório. Esta etapa se assemelha a qualificação do procedimento exigido pela *AWS D20.1*.

Para a realização dos pré-testes é necessário definir os seguintes parâmetros de deposição:

- ✓ Trajetória inicial (experiência prévia);
- ✓ Material de deposição (ER 90S B3);
- ✓ Velocidade de alimentação do arame (V_{alim});
- ✓ Velocidade de Deposição Resultante (V_{dep});
- ✓ Distância do bico de contato a peça (DBCP);
- ✓ Tipo de gás de proteção e vazão;

Quando se faz o uso do gerenciamento térmico RAQI, os parâmetros são:

- ✓ Tipo de fluido;
- ✓ Temperatura do fluido;
- ✓ Distância entre a lâmina d'água e a deposição (DLAD);

É desejável encontrar um envelope de parâmetros que além da poça de fusão não colapse durante a deposição, e não se tenha problemas com trincas, poros, falta de preenchimento, ondulações excessivas na superfície, degradação das propriedades mecânicas, distorções e tensões residuais. Objetivo principal é a integridade geométrica da peça (formato de flange sem escorrimento excessivos) e integridade interna da peça depositada, isto é, obter um flange via *GMA-DED* com ausência de trincas, sem poros e sem falta de preenchimento.

Desse modo, a qualificação do procedimento seguiu uma metodologia conforme a Figura 4.2, destacando-se que o flange foi dividido em três blocos de desenvolvimento (base, pescoço e tubo), em função da geometria e complexidade similar. Cada bloco iterativo de pré-testes resulta em um pacote de parâmetros. Os pré-testes começaram pelo tubo para a definição da velocidade de alimentação. Feito isso foi possível propor uma trajetória satisfatória para cada bloco de pesquisa, e ao final tem-se a trajetória de deposição consolidada, isto é um procedimento de fabricação para flange de pescoço.

Esta é uma etapa que demanda muito tempo de pesquisa para desenvolver e qualificar um procedimento padrão de deposição de flanges de pescoço. Entretanto, uma vez que a trajetória padrão é desenvolvida, as mesmas características dessa trajetória podem ser estendidas para outras dimensões de flange de pescoço, reduzindo significativamente o tempo de elaboração do novo procedimento (segundo os padrões da *AWS D20.1*, qualquer mudança na geometria do componente requer a requalificação do procedimento).

É neste sentido que um estoque digital de mais 1 400 flanges de pescoço (assunto comentado na introdução deste trabalho) pode ser fabricado rapidamente sob demanda. Diante disso, o gasto (pesquisa, tempo, mão de obra, material, ensaios e monetário) para o desenvolvimento de um procedimento fabricação de um componente pode ser razoavelmente considerado como um investimento. Após o *know-how* adquirido, essa etapa consiste sempre na adaptação de um procedimento já existente. A Tabela 4.2 apresenta o tempo gasto para o desenvolvimento de um novo procedimento qualificado e para a adaptação de um procedimento já existente. A Figura 4.3 mostram algumas imagens durante o desenvolvimento das trajetórias que a depender do operador pode demandar mais ou menos tempo.

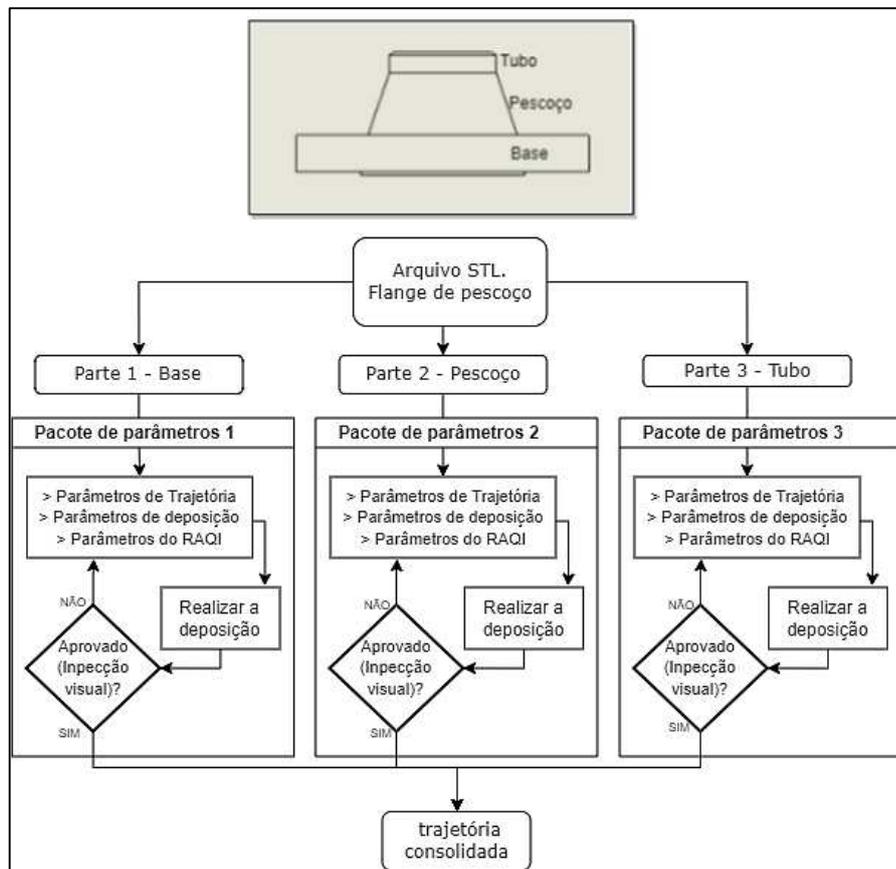


Figura 4.2 – Metodologia para a consolidação da trajetória

Tabela 4.2 – Tempo gasto no planejamento da trajetória

Tipo	Tempo*
Desenvolvimento de um procedimento padrão	60 - 90 dias
Adaptação de um procedimento existente	8 h

*Tempo real gasto em função desta pesquisa.

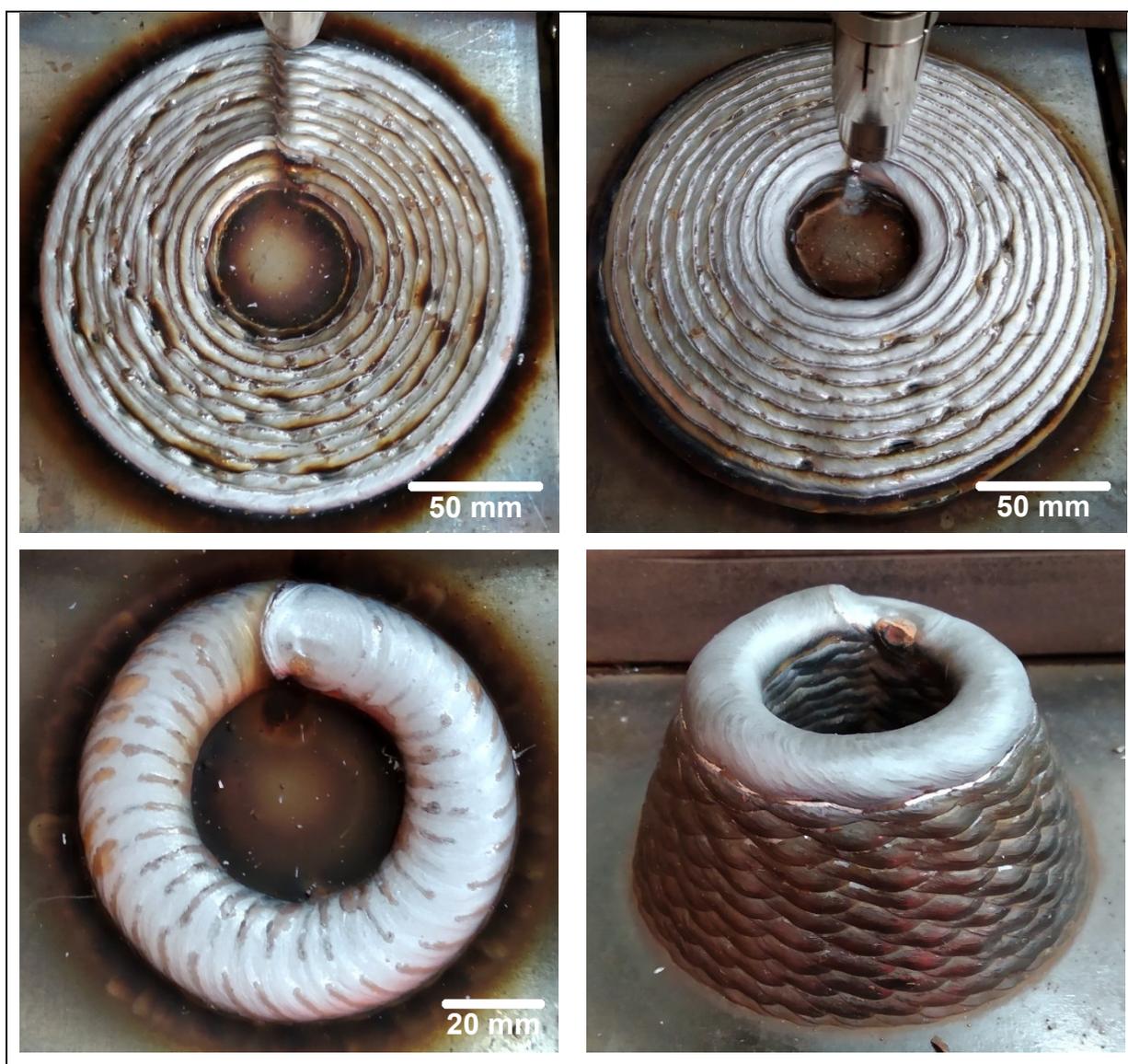


Figura 4.3 – Imagens dos pré-testes de trajetória do flange para o desenvolvimento de um padrão

A qualificação da máquina de MA e do operador de MA não foram aprofundados neste trabalho pois são assuntos independentes, e por razão do foco deste trabalho ser no produto. Entretanto os custos dessas qualificações serão contabilizados para estimar o custo unitário do produto. A qualificação de máquina MA e operador de MA também entrarão como

investimento, pois com o mesmo registro de máquina e operador pode-se fabricar diversos componentes.

4.1.4 Composição da linguagem de programação – etapa 4

A quarta etapa consiste em converter a trajetória (sequência de pontos cartesianos - X, Y e Z) em uma linguagem de programação que dará instruções para a movimentação da máquina, que pode ser um braço robótico ou uma mesa *CNC*.

As etapas de conversão do modelo 3D em *STL* (etapa 2), planejar a trajetória (etapa 3) e converter em linguagem de programação (etapa 4), embora estas sejam etapas independentes e com possibilidade de *softwares* independentes para cada uma delas, atualmente já existem softwares que unificaram essas três etapas. Nestes softwares o operador entra com modelo 3D e através da configuração de alguns parâmetros, como geometria de cordão, sobreposição, altura da camada, velocidade de deposição, tipos de trajetórias, sobremetal desejado etc., e tem como retorno a trajetória na linguagem desejada. São alguns exemplos de softwares utilizados para o planejamento da trajetória em *GMA-DED* que convertem para linguagem de programação especificado: MetalXL desenvolvido pela MX3D; o SculptPrint OS™ utilizado pela Lincoln Electric; 3DMP-CAM desenvolvido Gefertec; e o Robotmaster que possui programador para dezenas de robôs.

Lembrando que o uso desses softwares não descarta os pré-testes descritos anteriormente (propor, realizar e qualificar um procedimento), pois esses softwares apenas unificam as tarefas de malha, planejamento da trajetória e conversão em linguagem de programação. Futuramente, a ideia desses softwares é alcançar o *CAD/CAM* para MA, ou seja, a etapa de deposição também será inclusa.

Foi identificado nesta etapa 4, que é a conversão da trajetória para a linguagem de programação, que essa atividade, apesar de rápida, levaria algumas poucas horas pois alguns detalhes na linha de programação podem ser necessários e que são realizados manualmente. O gasto para esta etapa foi realizado através do *software Robot Master®*. Com esse *software* é possível carregar o modelo tridimensional, entrar com os parâmetros de deposição, geometria de cordão (determinado no procedimento) e definir uma trajetória de preenchimento (determinado no procedimento) através da escolha de pacote predefinidos de trajetória e o software retornar um código de programação específico para o braço robótico Motoman HP 20 (descrito na seção 3.1).

4.1.5 Deposição – etapa 5

A quinta etapa é a deposição do flange de pescoço, que consiste em preparar o substrato de deposição (*build platform*), descarregar o programa na máquina, ajustar a fonte de deposição, ajustar os parâmetros de RAQI e iniciar a deposição. Neste trabalho o substrato de deposição tem somente a função de dar suporte à primeira camada, mas a depender da estratégia o substrato poderia fazer parte do componente, como é previsto na *AWS D20.1*.

O substrato não precisa ser exatamente compatível com o material depositado, mesmo que alguns elementos do substrato contaminem as primeiras camadas do componente. No caso, essas camadas devem ser removidas pelo corte ou pela usinagem. Portanto deve haver um planejamento para a remoção dessas camadas. Além disso, o substrato deve ter rigidez suficiente para que ao final da deposição a distorção do componente, devido as tensões térmicas, não impossibilite o uso da peça fabricada. Entretanto, uma rigidez demasiada pode causar trincamento ou descolamento da peça ao substrato, ou ser custosa demais. Uma medida razoável para o dimensionamento correto do substrato é que para cada quilo de peça depositada deverá haver de 1 a 1,5 quilo de substrato, mas claramente isso dependerá do perfil empregado para dar a rigidez ao substrato. Preparar o substrato é uma atividade que exige material, corte, furação e HH de um técnico.

Os parâmetros do gerenciamento térmico são: temperatura média da água de recirculação e distância entre a lâmina d'água e a deposição (DLAD). Os detalhes do gerenciamento térmico são apresentados na secção 3.1.2.

O primeiro flange foi depositado com o arame ER 90S B3 (certificado de composição química - ver **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) e será chamado de Flange 1. A Figura 4.4 mostra uma imagem durante a fabricação da base. A Tabela 4.3 traz todas as informações a respeito da deposição. Por fim a Figura 4.5 mostra 4 imagens do Flange 1 sob diferentes ângulos.

Tabela 4.3 – Envelope de parâmetros de deposição do Flange 1

	FLANGE 1
Processo de Deposição	GMA-DED- Pulse
Fonte de energia	TransPuls Synergic 5000/MV
Material do substrato	Chapa SAE 1020 – 1/2"
Material de deposição	ER 90S B3 Ø 1,2 mm
Local de fabricação	Robô/RAQI

Tabela 4.4 – Envelope de parâmetros de deposição do Flange 1 (continuação)

Trajetória de base	14 camadas
	Espiral de Arquimedes com 14 voltas
Velocidade dep. base	8,3 mm/s ³
Trajetória do pescoço	13 camadas
	Hélice cônica
	Oscilação 12 mm decrescente até 0
Velocidade Dep. Pescoço	1,4 mm/s – 4,0 mm/s ¹
Trajetória do tubo	14 camadas
	Hélice cilíndrica
Velocidade Dep. tubo	4,2 mm/s ³
Velocidade Alimentação	5,5 m/min
DBCP	17 mm
Gás de Proteção	Ar + 4 %CO ₂
	15 L/min
RAQI	Sim
DLAD	20 mm
Temperatura da água	30 °C – 70 °C
Água dentro do tubo	Não
Peso como depositado (Pd)	9 196 g
Peso como usinado (Pu)	3 510 g ⁴
Relação (Pd/Pu)	2,6
Tempo de deposição	3 h 15 min

1 – Velocidade deposição tangencial ao círculo, independente da oscilação, começa com 1,4 mm/s com incremento de 0,2 mm/s por camada.

2 – Velocidade de deposição tangencial a senoide

3 – Velocidade tangencial a trajetória.

4 - Valores de referência segundo a norma *ASME B16.5*

DBCP – Distância do bico de contato a peça

DLAD – Distância da lâmina d'água a deposição



Figura 4.4 – Imagem da deposição (base) do flange com o Robô com RAQI.

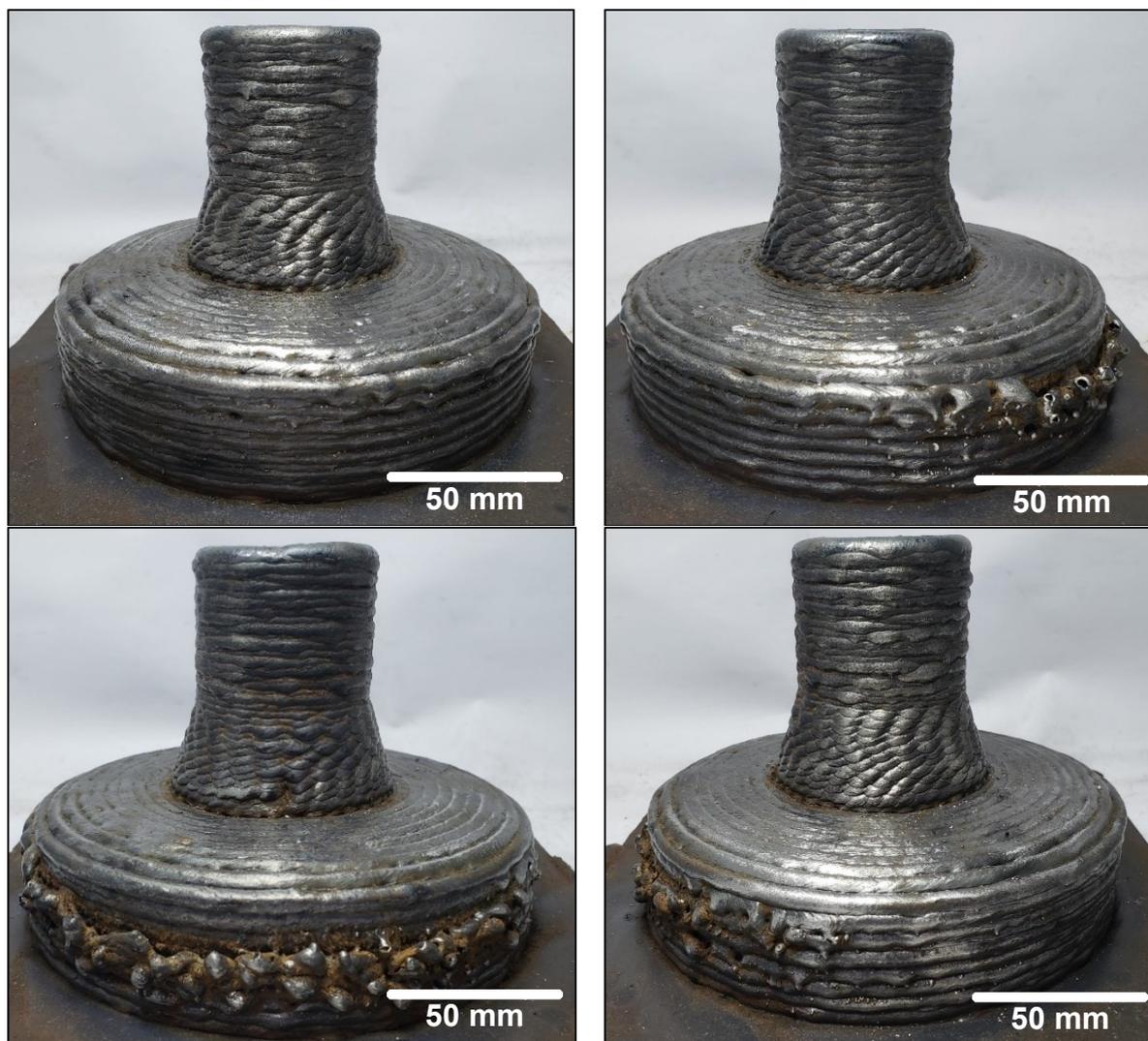


Figura 4.5 – 4 Imagens do Flange 1 como depositado

O tempo total de deposição, utilizando o RAQI sem interrupções foi de 3 h e 15 m. Estimando uma situação sem RAQI, além das 3 h e 15 m de arco aberto teria aproximadamente mais 10 minutos de espera a cada camada, resultando num tempo de espera de 6 h e 50 m, sendo assim o tempo total de deposição sem RAQI seria de 10 h e 5 m, com isso é possível reduzir significativamente o tempo de fabricação com a utilização do RAQI.

Ficou claro que uma região da base ficou com um aspecto grosseiro (Figura 4.5), e isso ocorreu devido a trajetória cruzada entre uma camada e outra. A trajetória de deposição da base é uma espiral que se inicia no centro e termina na extremidade e gira no sentido horário, sem reverter o sentido. Inicia-se uma segunda espiral a partir da extremidade para o centro, e neste retorno a espiral da camada inferior não se sobrepõe geometricamente com a espiral da camada superior, e essa defasagem gera instabilidade no arco elétrico.

A Figura 4.6 detalha o cruzamento da trajetória entre camadas, quando a arco termina a trajetória da primeira camada (A→B) e dá-se o início à deposição da segunda camada, em vermelho (B→C). Neste trajeto ocorre o cruzamento da trajetória em níveis de altura diferentes (um degrau) e, por se tratar de uma poça líquida, durante o cruzamento a poça de fusão escorre sobre a lateral da primeira camada, resultando no aspecto grosseiro. Este efeito também ocorre da mesma maneira no centro do tubo.

Embora tenha se realizado pré-teste, percebe-se aqui que a trajetória inicialmente proposta para a base do flange não foi satisfatória. Isso mostra que os pré-testes nem sempre são representativos o suficiente para a situação real. Nesse sentido a trajetória da base foi alterada, como será mostrado mais adiante.

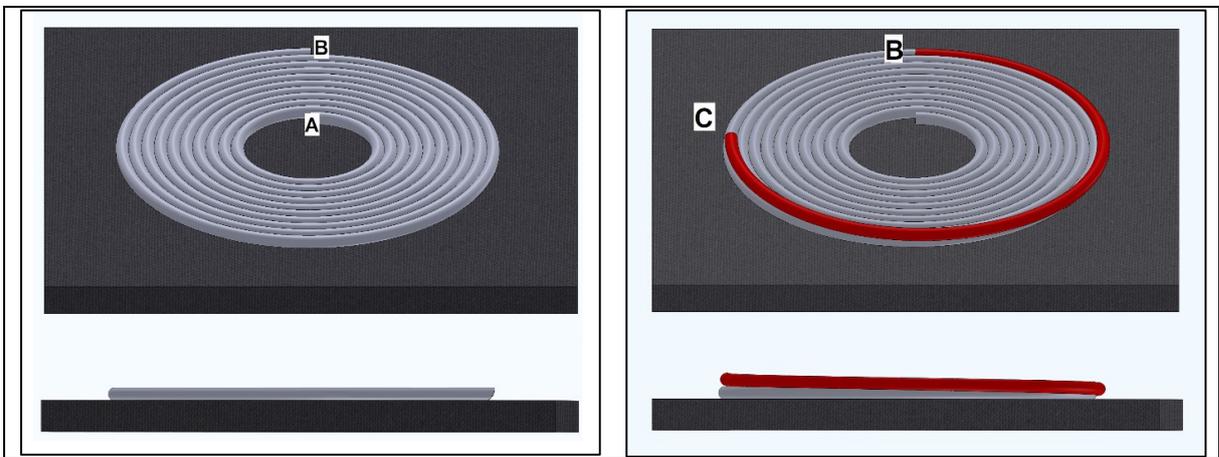


Figura 4.6 – Vista em perspectiva e lateral da primeira camada espiral depositada, no sentido de A para B (esquerda); Vista em perspectiva e lateral do início da segunda camada, em vermelho de B para C (direita)

Continuando a análise do Flange 1, tem-se na Figura 4.7 a corrente média adquirida durante a deposição da base. Cada ponto corresponde à média de 5 segundos de aquisição de uma revolução de espira, e, portanto, neste caso cada 14 medições correspondem a uma camada completa conforme indicado na Figura 4.7. Percebe-se que dá 1ª até a 10ª camada tem-se uma queda de corrente acentuada nas exterminadas (borda de raio maior) e o centro (borda de raio menor) das camadas. Acredita-se que este fenômeno é devido à falta de ancoramento da poça de fusão, ocasionando um ligeiro escorrimento da poça, e isso faz com que a DBCP aumente, aumentando o comprimento livre do eletrodo, e para manter a alimentação, por consequência a corrente deve cair. À medida que as camadas vão sendo depositadas mais a poça escorre, tornando a queda de corrente mais acentuada. O escorrimento acentuado deixou a última

camada visualmente abaulada, conforme as imagens da Figura 4.6, que corrobora a queda de corrente das camadas conforme a Figura 4.7.

Ficou claro a forte relação da tensão e corrente com a geometria final da peça, neste sentido a aquisição da tensão e corrente, e de outros parâmetros como velocidade de alimentação, vazão de gás, diâmetro do eletrodo etc., pode auxiliar no mapeamento das possíveis discontinuidades e defeitos, facilitando a inspeção pontual, um assunto promissor ainda pouco abordado.

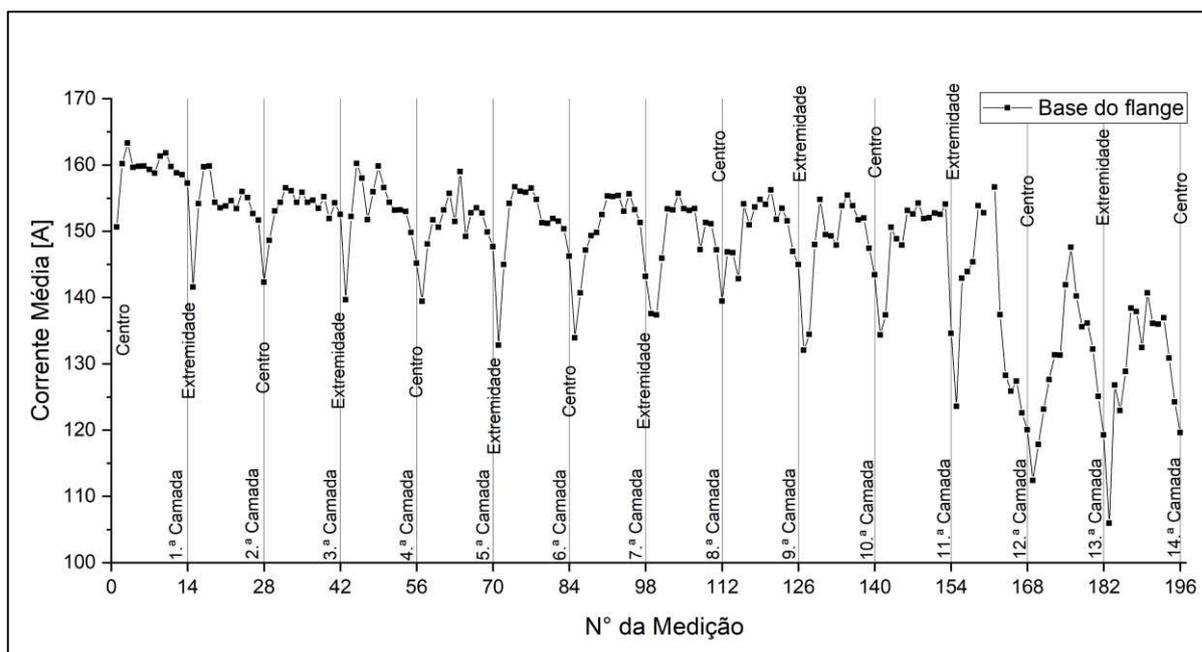


Figura 4.7 – Corrente média em função das várias medidas adquiridas durante a deposição da base do flange (cada 15 medidas correspondem a uma camada)

A Figura 4.8 mostra a deposição do pescoço e tubo, sendo que cada ponto de 197 a 209 corresponde a uma camada do pescoço e cada ponto de 210 a 223 corresponde a uma camada do tubo. Não foram encontradas relações entre as oscilações de média com algum aspecto visual da pré-forma. A média global de corrente para o pescoço e tubo foi de 134 A.

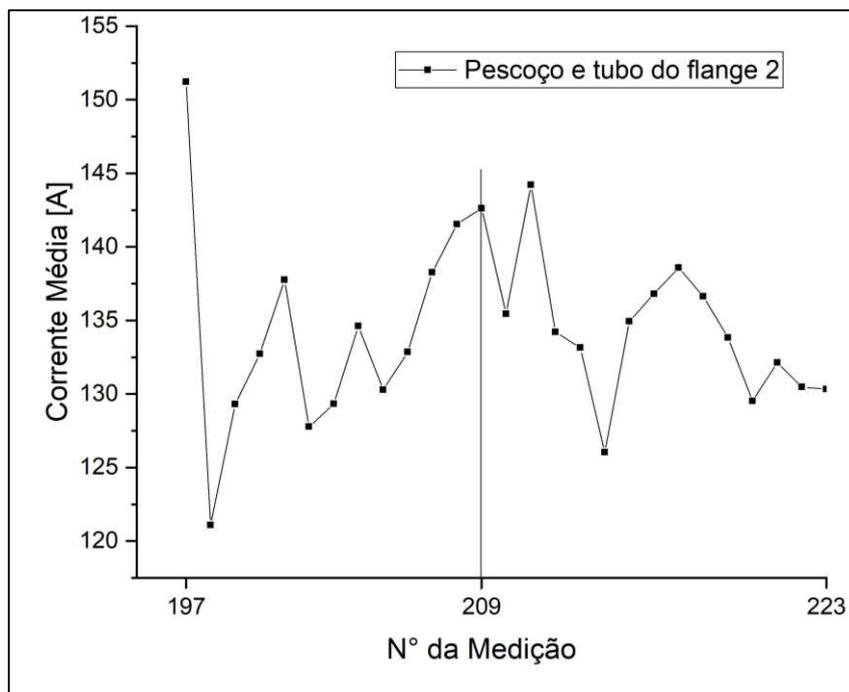


Figura 4.8 - Corrente média em função das várias medidas adquiridas durante a deposição do pescoço e do tubo (medição de 241 a 256 (pescoço) e de 256 a 273 (tubo))

4.1.6 Pós-processamento – etapa 6

A sexta etapa é de pós-processamento, que envolve a remoção da pré-forma do substrato, torneamento, tratamento térmico e furação.

A primeira atividade dessa etapa é a remoção da pré-forma do substrato. A remoção da pré-forma foi feita por corte mecânico a frio em serra de fita, onde o corte é realizado o mais próximo possível do substrato (Figura 4.9). Através da sobra de deposição deixada no substrato foi estimado que menos de 3 % da massa depositada foi inutilizada devido a remoção. O tempo de corte foi medido com um cronômetro para o cálculo de custo, mas foi feito também um cálculo do tempo gasto em função da área da base a ser cortada e a velocidade de corte.



Figura 4.9 – Peça depositada fixada a Serra de fita (esquerda); Vista da seção do corte realizado para separação do metal depositado do substrato (direita)

Após a remoção do metal depositado, a peça foi escovada para remover a escória e os óxidos remanescentes da deposição (Figura 4.10), assim como para melhorar o aspecto visual da peça para realizar as medições geométricas e a inspeção visual.

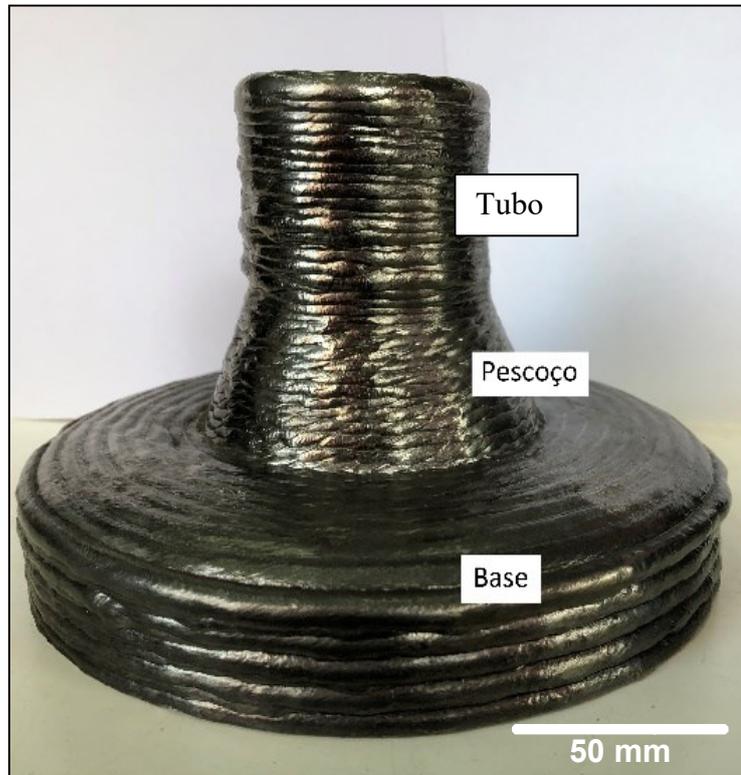


Figura 4.10 - Exemplo de uma peça escovada fora da base de deposição

A segunda atividade do pós-processamento é o torneamento para finalizar a geometria do flange. Inicialmente a peça não possui nenhuma superfície de referência, e foi necessário o uso da placa de 4 castanhas para minimizar o batimento. Posteriormente fez-se usinagem da base e da parte interna da peça, criando assim a primeira superfície de referência (Figura 4.11). Percebeu-se nesta etapa um tempo de *setup*, tempo este que será contabilizado nos custos de fabricação.

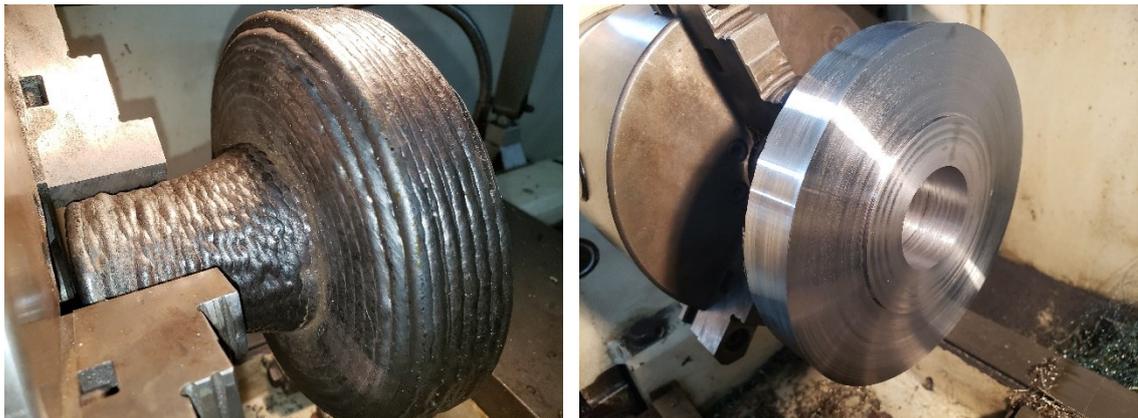


Figura 4.11 - Peça fixada ao torno para usinagem da base e da parte interna, criando a primeira superfície referência

Para finalizar o torneamento a peça é reposicionada no torno pela base, Figura 4.12, seguiu-se com a usinagem da parte superior externa, conferindo a geometria próxima de um flange.



Figura 4.12 – Reposicionamento da peça para a usinagem externa e bisel (esquerda) e exemplo de um flange torneado (direita)

Analisando agora a etapa de torneamento, a Figura 4.13 mostra as várias discontinuidades existente após a usinagem. O escorrimento da poça de fusão faz com que o

metal líquido não fique aderido à camada gerando vazios ao longo da trajetória, obtendo uma falsa impressão de preenchimento, e tais vazios podem ser observados nas imagens da Figura 4.13.

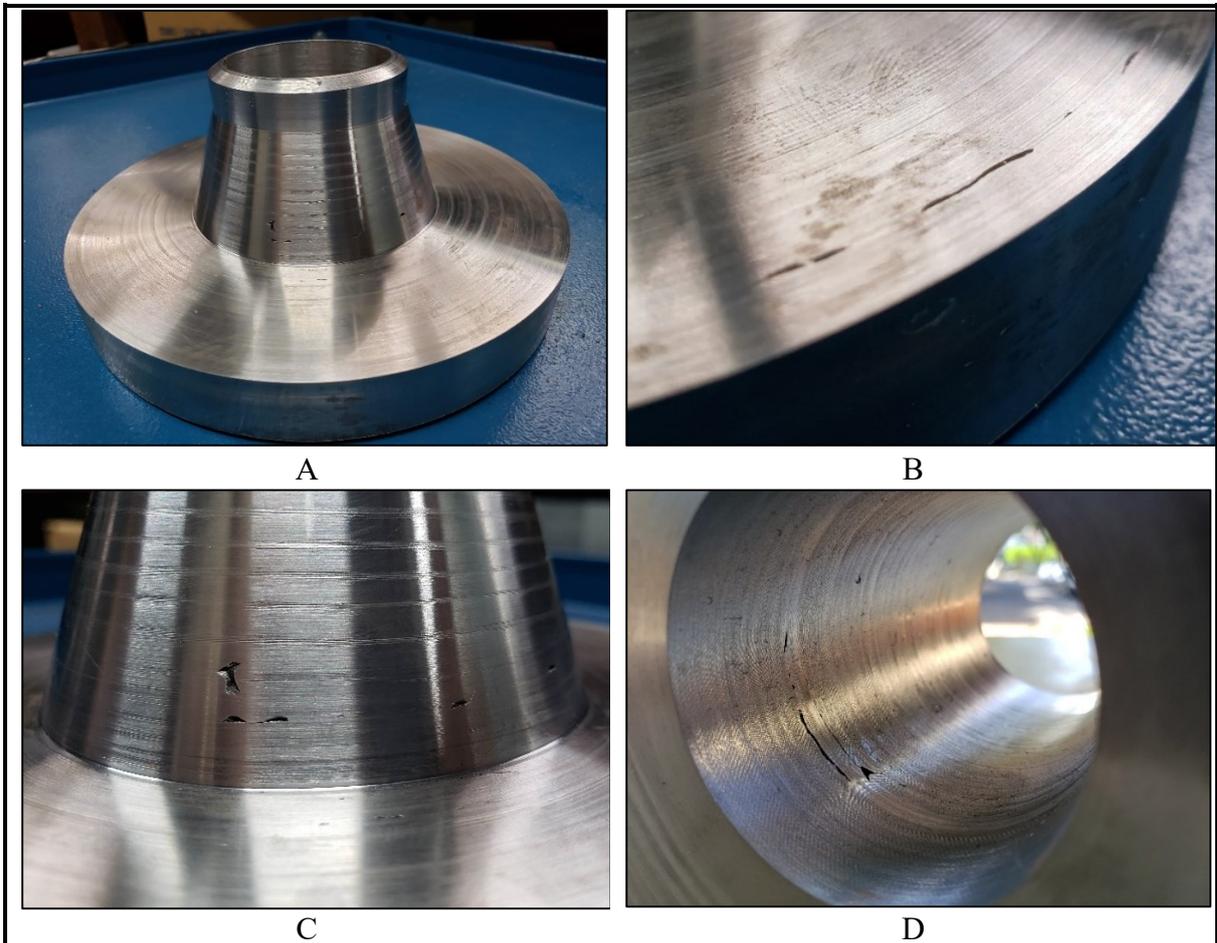


Figura 4.13 – (A) Flange usinado nas dimensões finais; (B) Falta de fusão entre os cordões laterais da espiral bidimensional da base; (C) ondulações e vazios visíveis; (D) vazios na parte interna do tubo, sugere-se falta de aderência entre as camadas da região mais interna.

Tem-se na Tabela 4.5 a composição química do certificado do arame ER 90S B3 (emitido pelo fabricante), do depósito do Flange 1 (realizado com *Vanta Olympus*® no laboratório) e da Norma *ASTM 182 F22*, e a última coluna traz um comparativo entre o depósito e a norma. Pode se concluir que o Flange 1 está adequada quanto à composição química exceto para silício, que mesmo considerando o erro de medida de 0,029 % para mais ou para menos não se encaixa dentro da *ASTM 182*. O silício é empregado como desoxidante na soldagem *MIG/MAG* e geralmente está presente nos arames na faixa de 0,40 % a 1,00 %. A presença deste elemento deixa a poça de fusão mais fluida, o que pode ter contribuído com as discontinuidades

acima apresentadas, visto que essas descontinuidades estão associadas com os escorrimentos da poça.

A adição controlada de oxigênio aos gases de proteção na soldagem pode contribuir para a redução dos teores do silício e conseqüentemente do manganês no metal depositado. A adição de oxigênio é utilizada para melhorar a qualidade das juntas soldadas, especialmente em ligas de aço que contenham silício e manganês para evitar problemas como trincas a frio e fragilidade.

O oxigênio adicionado ao gás de proteção reage tanto com o silício quanto com o manganês presentes na poça de fusão, formando óxidos de silício (SiO_2), óxidos de manganês (MnO_2 , Mn_2O_3 e Mn_3O_4) e silicato de manganês (MnSiO_3). Esses óxidos são mais leves que o metal líquido e formam uma camada de escória na superfície da poça de fusão.

É importante ressaltar que essa técnica requer um controle preciso da quantidade de oxigênio adicionada, pois um excesso de oxigênio pode levar à oxidação excessiva e comprometer a qualidade da solda.

Valores para o Carbono não podem ser medidos com o equipamento, mas pelo certificado de composição química tem-se indicação que o carbono tenha ficado dentro do exigido.

Tabela 4.5 – Comparativo de composição química [%]

Elemento	Certificado do arame ER 90S B3	Depósito (Flange 1)	ASTM 182 F22 Cl. 3	Comparação Depósito com ASTM 182
C	0,075	-	0,05 - 0,15	--
Mn	0,570	0,524 ± 0,025	0,30 - 0,60	ok
P	0,007	0,011 ± 0,008	0,040	ok
S	0,007	0,012 ± 0,012	0,040	ok
Si	0,440	0,658 ± 0,029	0,50	+ 0,158
Ni	0,110	0,061 ± 0,009	--	--
Cr	2,380	2,415 ± 0,026	2,00 - 2,50	ok
Mo	0,920	0,911 ± 0,008	0,87 - 1,13	ok
Fe	95,491*	95,304	--	--
Cu	0,160	0,103 ± 0,009	--	--

* valor para o ferro não consta no equipamento (restante)

A macrografia da Figura 4.14 mostra a secção transversal do flange 1 preparada e atacada em solução de Nital 5% para revelar a microestrutura como depositada.

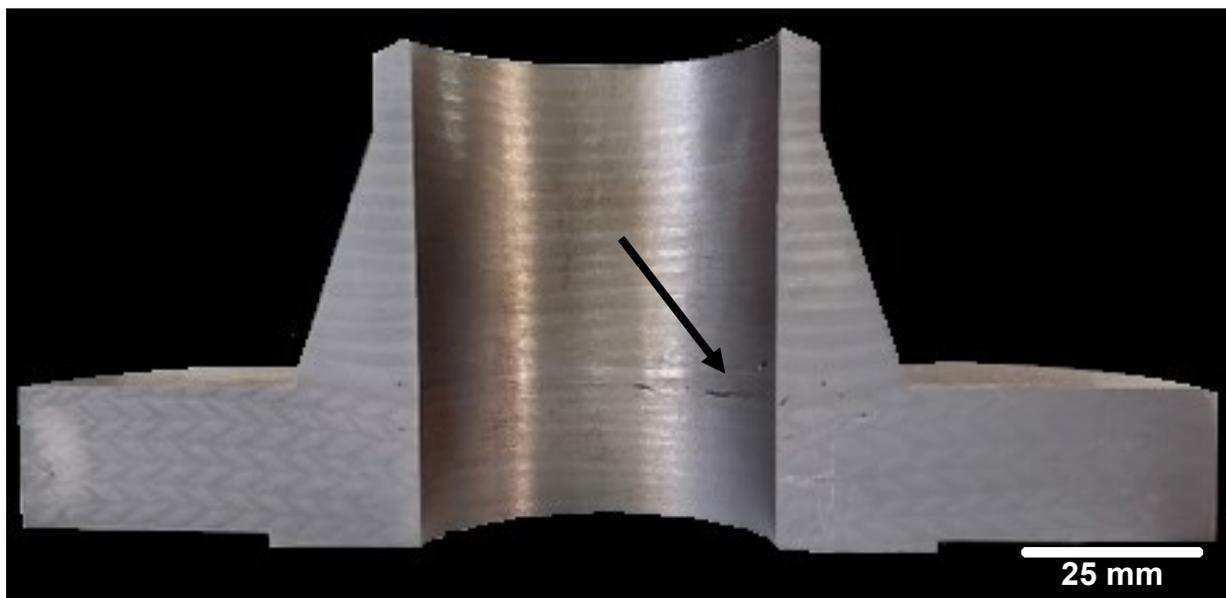


Figura 4.14 - Macrografia da seção transversal do Flange 1 como depositada

Na macrografia é notada a presença de descontinuidades próximo ao furo interno, que podem ser poros ou vazios ao longo da trajetória. É possível visualizar também que as camadas estão declinadas nesta região devido ao escorrimento da poça de fusão por falta de ancoramento e acúmulo de calor o que corrobora a queda de corrente e instabilidades do arco mostradas na Figura 4.7.

As demais regiões estão ausentes de descontinuidades, o que indica que as descontinuidades existente podem estar atreladas ao acúmulo de calor acentuado na região interna do tubo, exatamente por estar mais longe da extração de calor (não havia água recirculando dentro do tubo) e diâmetro pequeno (o tempo de uma revolução no tubo é menor comparado com o tempo de uma revolução extremidade da base que tem diâmetro maior, portanto no tubo o arco retorna ao mesmo ponto mais rapidamente acumulando calor).

A terceira etapa do pós-processamento é o tratamento térmico, a fim de comparar as propriedades mecânicas do flange como depositado com um flange tratado, metade do flange foi deixada como depositada (não submeteu a nenhum tipo de tratamento) e a outra metade para tratamento térmico (normalização e revenimento, conforme *ASTM 182*). Em ambos os casos serão retiradas amostras para micrografia, microdureza, e corpos de prova para ensaios de tração e impacto Charpy-V.

4.1.6.1 Análises das propriedades mecânicas do flange 1 – A metade sem tratamento térmico

A Figura 4.15 mostra uma macrografia da base do flange como depositado. As múltiplas camadas ao longo da direção de construção (indicado pela seta) são típicas de uma soldagem multipasses. É possível ver regiões grosseiras com um formato semicircular de cor clara e regiões colunares, mais escuras. Os pontos em vermelho na Figura 4.15 dentro do retângulo indicam o local exato das indentações para levantar um perfil de microdureza.

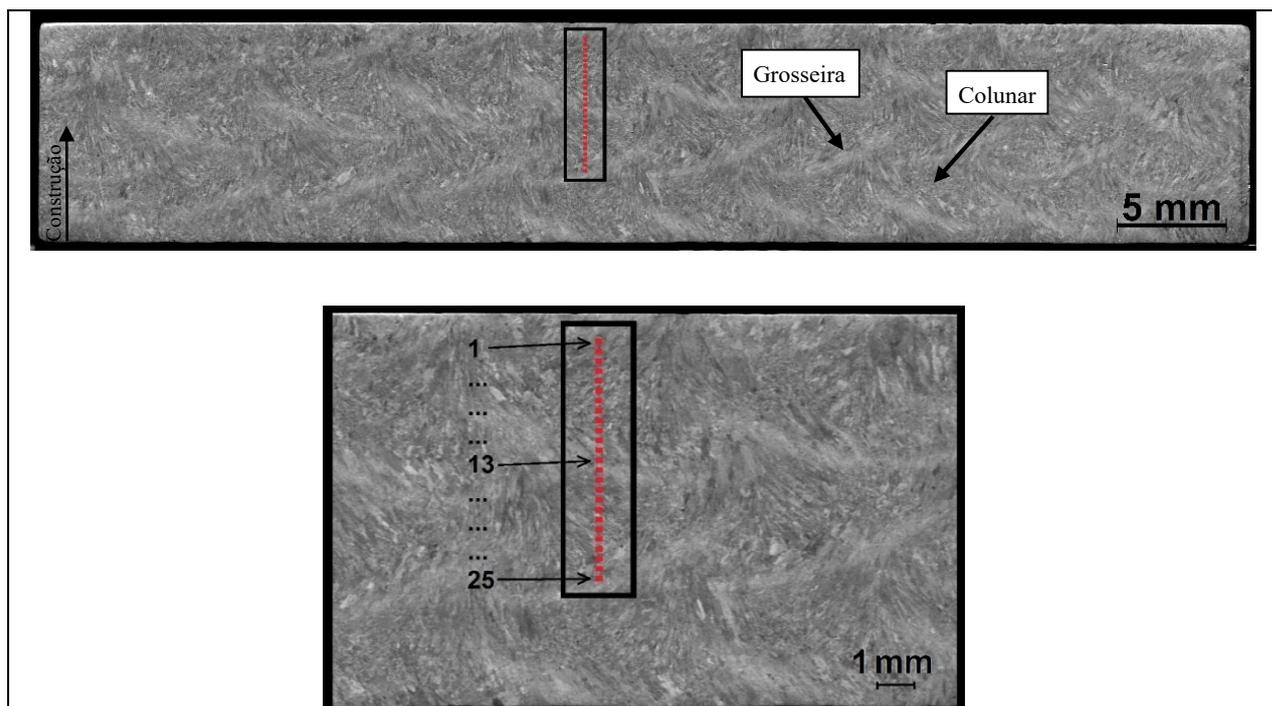


Figura 4.15 - Macrografia para análise de microdureza (os pontos vermelhos enumerados indicam a ordem das indentações)

A Figura 4.16 mostra o perfil de microdureza da região retangular da Figura 4.15. A região grosseira (pontos 1, 13 e 25) exibiu valores de dureza significativamente menor em relação a região colunar dos cordões. A microdureza média de todos os pontos, foi de 346,1 Vickers com desvio padrão de 36,2 Vickers. O intervalo de confiança de 95% para a média com base nos dados foi de (331,6 - 360,6) Vickers. Convertendo o intervalo de confiança para Brinell de acordo com a tabela de conversão da *ASTM 1058*, tem-se um intervalo de (311 - 344) Brinell. O intervalo de dureza Brinell exigida pela norma *ASTM 182* é de (156 - 207), e comparando com o intervalo de dureza Brinell obtido (311 - 344) pode-se concluir que o flange como depositado não está adequado quanto ao requisito de dureza.

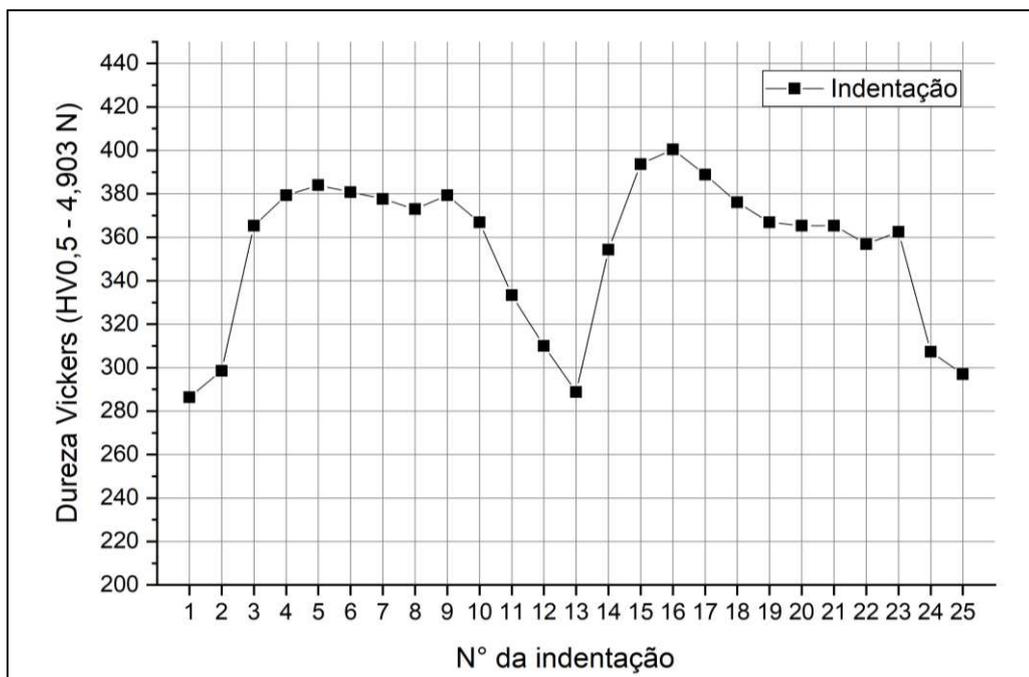


Figura 4.16 – Perfil de microdureza com 25 indentações igualmente espaçadas em 0,25 mm

Analisar a microestrutura de uma amostra de MA é extremamente complexa, pois a região analisada é resultante dos ciclos térmicos dos cordões laterais e dos ciclos térmicos das camadas superiores. Para uma afirmação mais assertivas acerca da evolução microestrutural em MA, deve ser feita uma análise isolada a cada passe depositado.

O que foi observado neste trabalho é que existe uma diferença microestrutural (Figura 4.17) entre as regiões colunares e grosseiras associado a uma diferença de microdureza.

A região dos grãos colunares possui dureza elevada, de 380 a 400 Vickers conforme o gráfico da Figura 4.16, analisando o diagrama CCT deste material (Figura 4.20), esses níveis de dureza está associado às altas taxas de resfriamento e que favorece a formação da martensita mas podendo também formar bainita. O que foi encontrado na região dos grão colunares, conforme a Figura 4.18, é uma mistura de martensita e bainita, o que corrobora com análise. Destaca-se aqui que essa região analisada é uma região que sofreu os efeitos dos ciclos térmicos dos passes laterais e superiores, portanto essa mistura de martensita com bainita podem ter um aspecto já de revenidos.

A região dos grãos grosseiros é uma região re-austenitizada com menores taxas de resfriamento, e que pelo diagrama CCT, favorece a formação da bainita, portanto é uma região de menor dureza. Análise que corrobora com que foi observado conforme a Figura 4.19, a presença de bainita.

Oliveira (2013) e Garcia (2018), avaliaram o comportamento metalúrgico em juntas dissimilares soldadas com o aço *ASTM* 182, grau F22. Ambos os autores indicaram a presença de martensita e bainita na zona afetada pelo calor (ZAC) do F22 associado ao diagrama de resfriamento contínuo CCT, conforme a Figura 4.20, que a depender do gradiente térmico de resfriamento da região leva a formação da martensita e/ou bainita. Santos (2022) caracterizou pré-formas de aços 2,25Cr-1Mo fabricadas via manufatura aditiva por deposição a arco com arame ER90S-B3, na condição com RAQI e foi indicado a formação de bainita, ferrita acicular e ripas de bainita revenida.

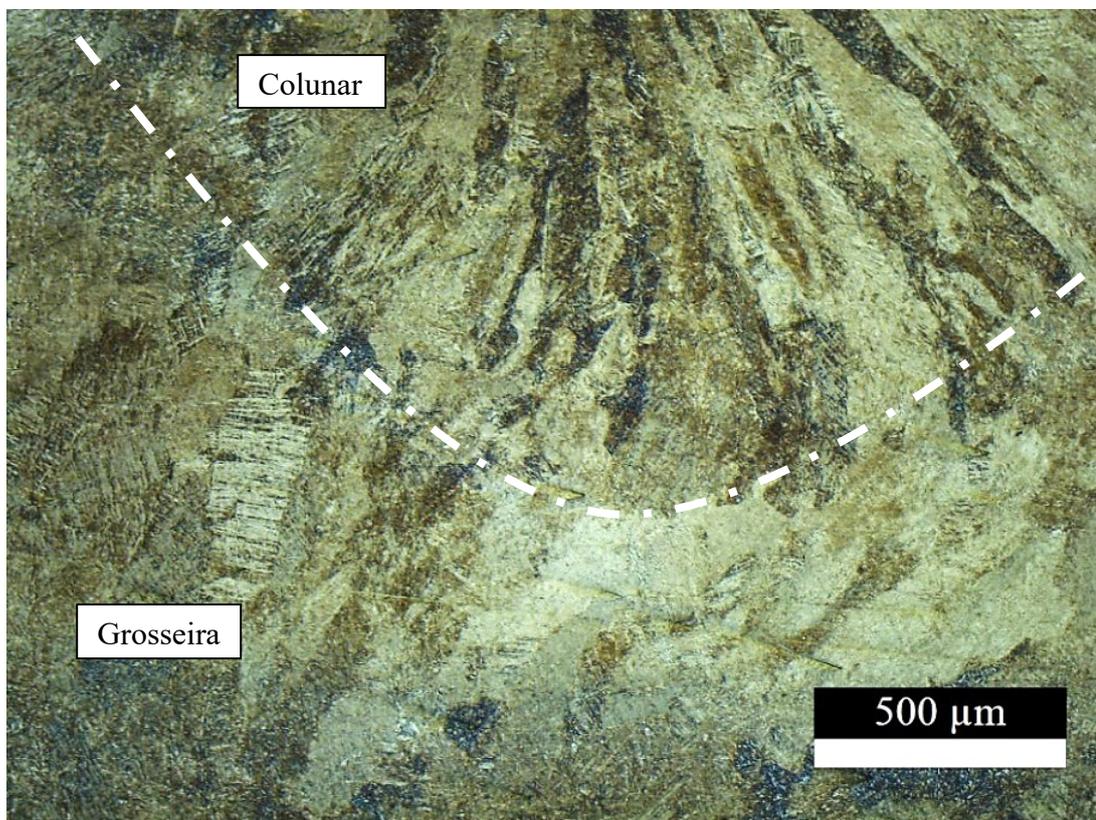


Figura 4.17 - Microestrutura contemplando a região colunar e grosseira

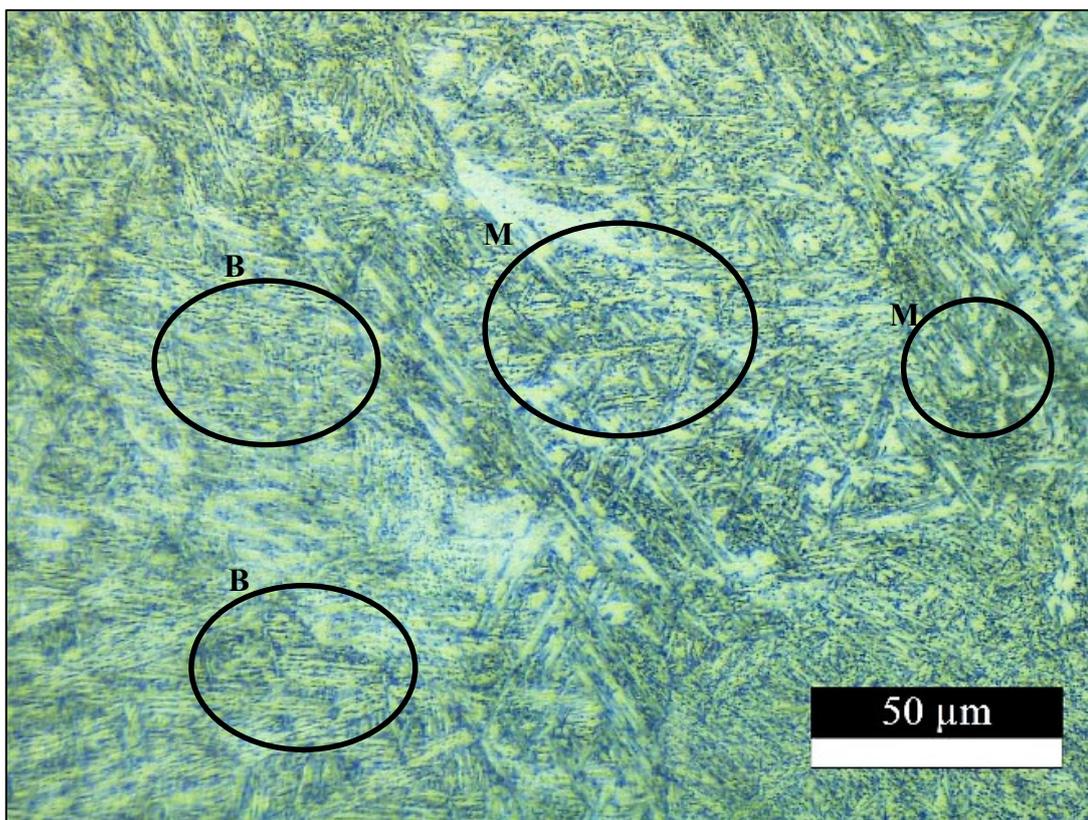


Figura 4.18 – Região colunar ampliada – microestrutura formada por martensita e bainita.
(M- Martensita e B – Bainita)

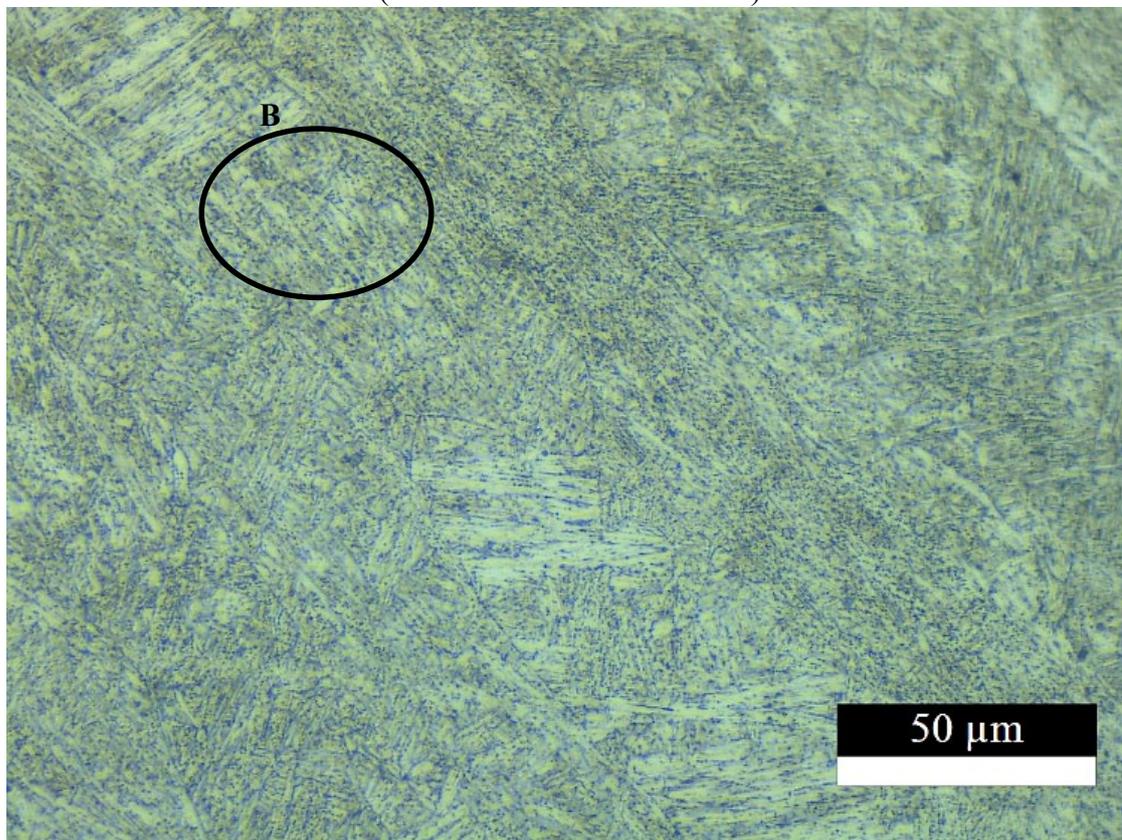


Figura 4.19 – Região grosseira ampliada – microestrutura predominantemente bainítica

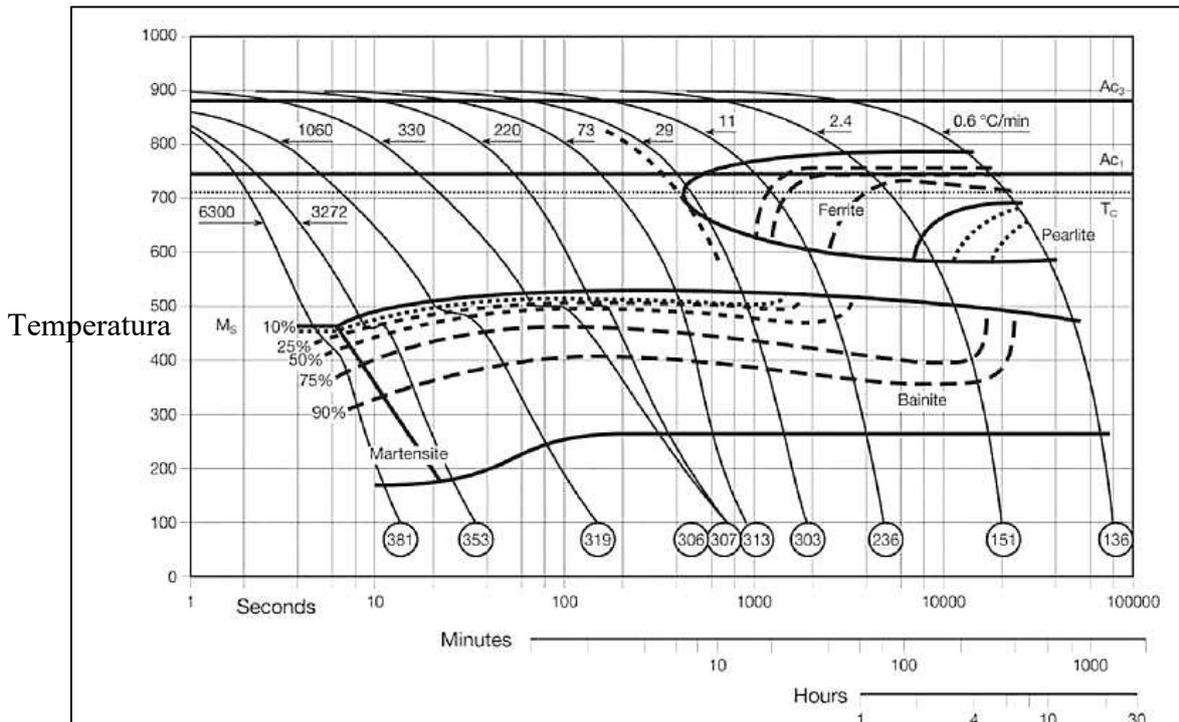


Figura 4.20 – Diagrama de resfriamento contínuo para a aço *ASTM A182* grau F22 (COLPAERT, 2018)

A Figura 4.21 ilustra os resultados dos ensaios de tração do Flange 1, contando com duas amostras conforme a Figura 3.10, sendo:

- Amostra 1 - Como depositada, retirada da parte mais interna (AM1-DEP-INT); e
- Amostra 2 - Como depositada, retirada da parte mais externa (AM1-DEP-EXT).

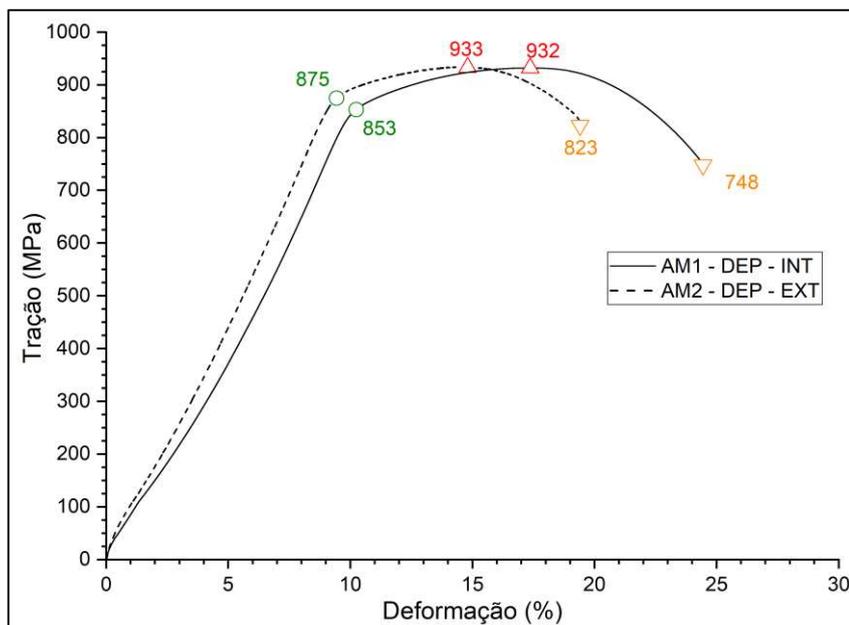


Figura 4.21 – Ensaios de tração de duas amostras do Flange 1 (como depositado)

Como os limites de escoamento não ficaram bem definidos, foi construída uma linha paralela à região elástica a partir de uma deformação de 0,002 ou 0,2 %, e a intersecção desta linha com a curva tensão versus deformação é a tensão do limite de escoamento. Tanto o limite de escoamento quanto o limite máximo de resistência em ambas as amostras ficaram muito superiores ao exigido pela norma *ASTM* 182 (310 MPA para o limite de escoamento e 515 MPA para o limite máximo), o que era esperado devido ao “*overmatching*” e elevada dureza. O alongamento ficou próximo ao mínimo exigido (22%). Como não foi utilizado um extensômetro (*strain gauge*) para medições mais precisas a respeito do alongamento, não se pode tirar quaisquer conclusões à respeito das diferenças de alongamento entre a amostra interna e a amostra externa.

A *ASTM* 182 possui requisito também para a redução de área transversal que deve ser no mínimo 30 %. Para amostra 1 obteve-se 22 % de redução e amostra 2 obteve-se 28 % de redução, ambas rejeitadas.

As duas amostras de Charpy como depositadas foram testadas a -30° C. As energias absorvidas nos testes foram 41,1 Joules (4,2 Kgf.m) e 56,8 Joules (5,8 Kgf.m), ao que foram reprovadas pelos critérios de aceitação (ver secção 4.1.1). Tem-se na Figura 4.22 o aspecto da fratura, e, pelo cálculo de porcentagem dúctil-frágil de acordo com a *ASTM* A370, sugere-se que tenha sido em torno de 95 % frágil.

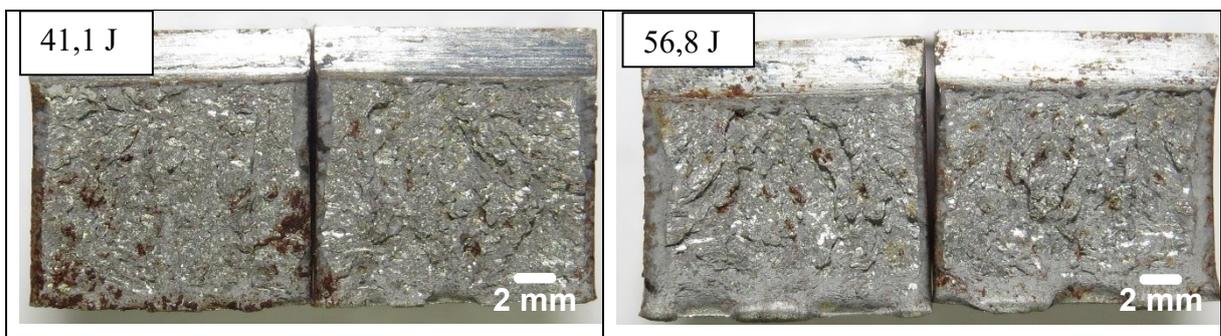


Figura 4.22 – Imagens do aspecto da fratura dos dois corpos de prova de Charpy como depositadas com sua respectiva energia absorvida

4.1.6.2 Análises das propriedades mecânicas do flange 1 – A metade com tratamento térmico

A outra metade do Flange 1 foi tratada termicamente conforme o especificado pela *ASTM* 182 (normalização a 900° C no mínimo e revenido a 675° C no mínimo). O procedimento geral de tratamento térmico foi mostrado na metodologia na secção 3.1.4. Foi fixado um

termopar do tipo K no flange. A Figura 4.23 mostra a curva de tratamento térmico adquirida pelo termopar.

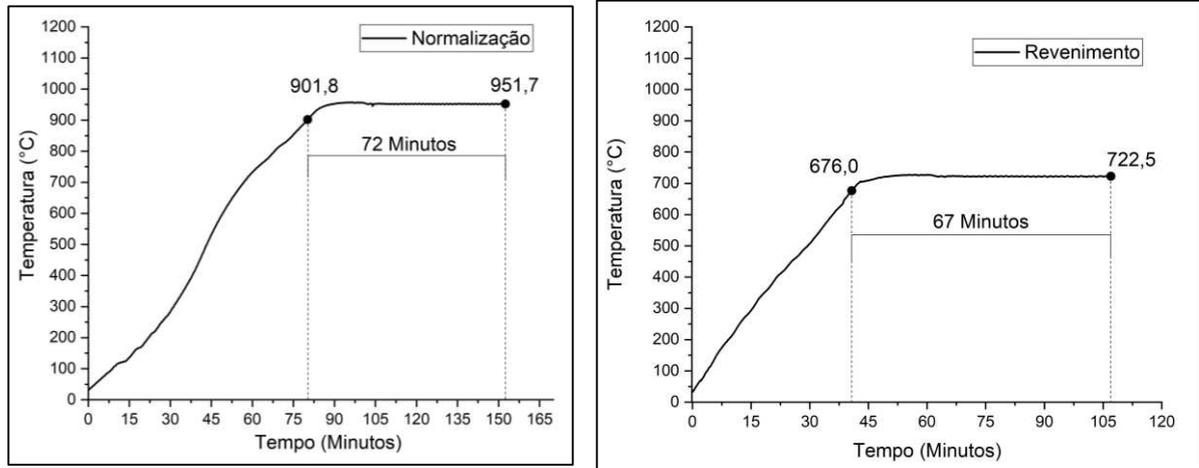


Figura 4.23 – Rota de tratamento térmico adquirido: normalização (esquerda) e revenimento (direita)

Analisando agora a metade do Flange 1 tratada, a Figura 4.24 mostra uma macrografia do corpo de prova de impacto (face oposta do entalhe) com escala de 5 mm. Não é mais possível observar regiões colunares e grosseiras devido ao tratamento de normalização que reaustenitizou toda a região. Os pontos vermelhos na imagem dentro do retângulo indicam o local exato das indentações para levantar um perfil de microdureza (Figura 4.25).

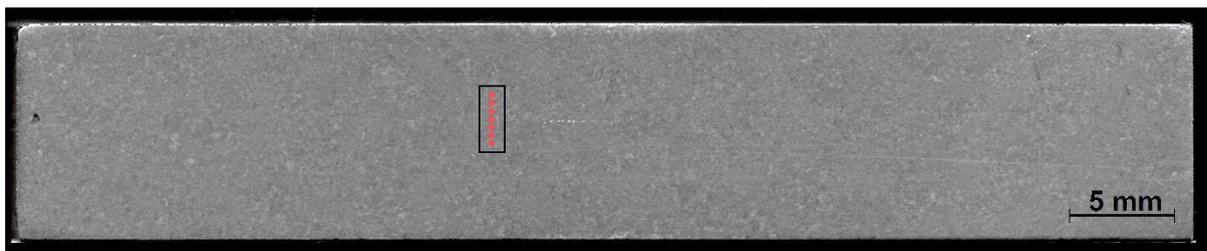


Figura 4.24 – Face oposta do corpo de prova de Charpy da metade do Flange 1 tratada

Não houve diferença significativa entre os valores de microdureza medidos. A microdureza média obtida foi de 202,8 Vickers com desvio padrão de 2,16. O intervalo de confiança de 95 % para a média com base nos dados foi (200,7 - 205,0) Vickers. Convertendo o intervalo de confiança em Brinell de acordo com a tabela de conversão da *ASTM 1058*, tem-se (200 - 205) Brinell. Como o intervalo de dureza exigido pela norma *ASTM 182* é de (156 - 207) Brinell, comparando o intervalo de dureza Brinell obtido (200 - 205), pode-se concluir que toda a faixa de dureza média, do Flange 1 como tratado, está dentro da faixa de dureza exigida.

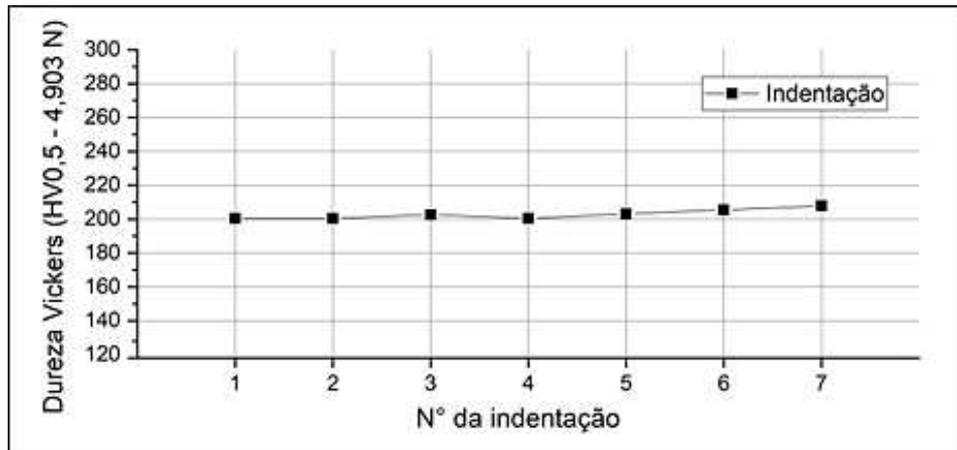


Figura 4.25 – Perfil de microdureza do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido)

Tem-se na Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28 as microestruturas do Flange 1, como tratado (normalizado e revenido) com escala de 500 μm , 200 μm e 100 μm respectivamente. Na imagem de 500 μm é possível observar a homogeneidade da microestrutura. Já na imagem de 200 μm e 100 μm é possível ver a presença de 2 microconstituintes: Ferrita, e Bainita revenida.

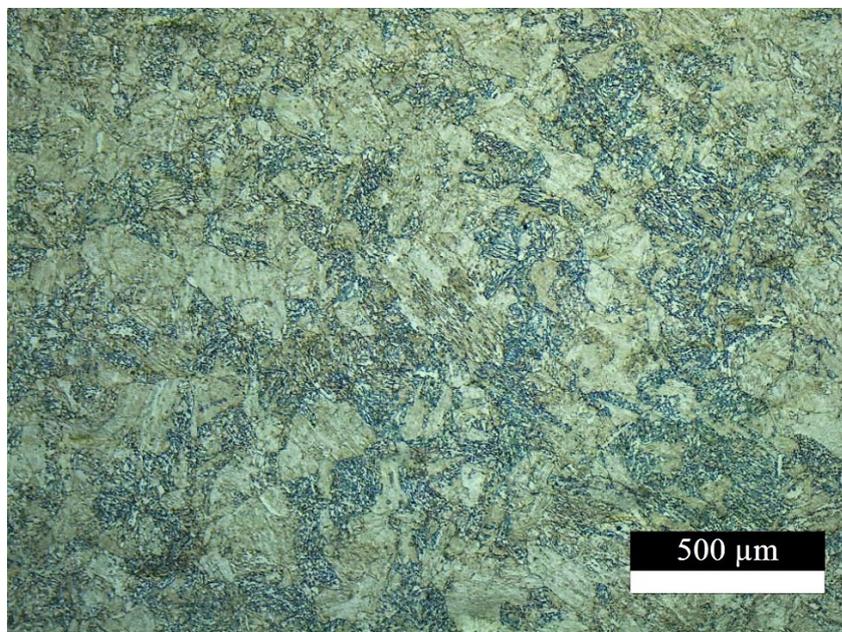


Figura 4.26 – Microestrutura da amostra do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido) numa escala de 500 μm

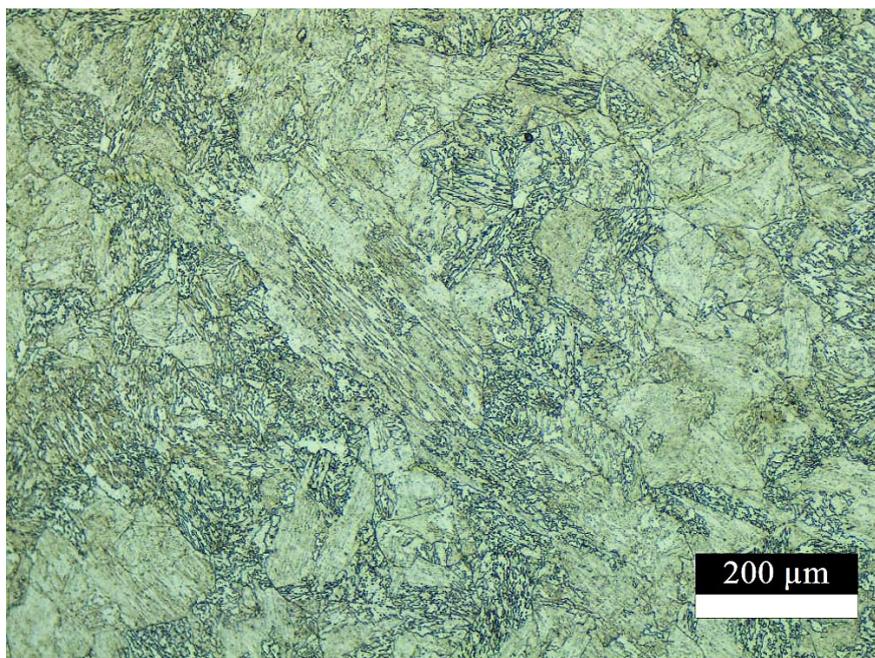


Figura 4.27 – Microestrutura da amostra do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido) numa escala de 200 μm

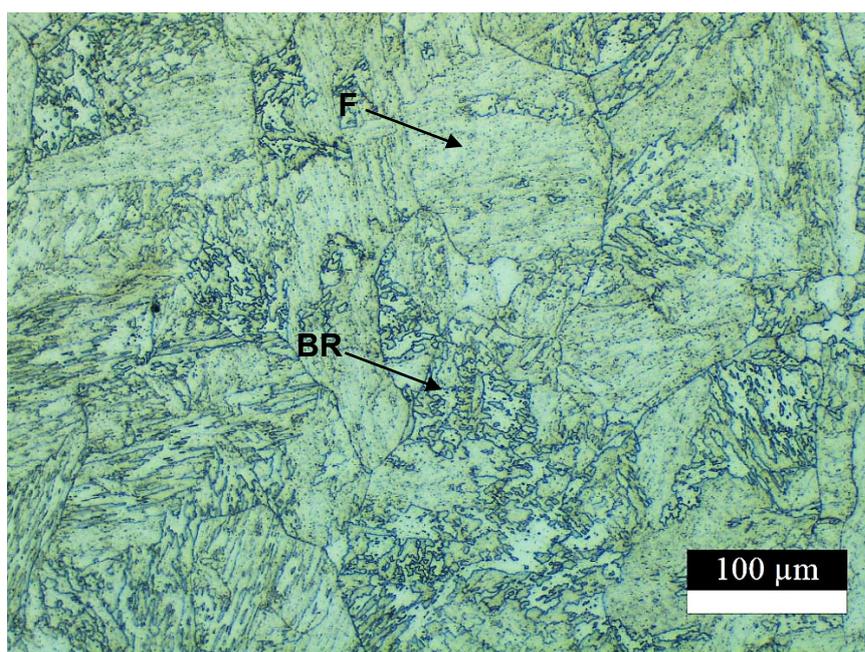


Figura 4.28 – Microestrutura da amostra do Flange 1 como tratado (normalizado e revenido), F – Ferrita e BR – Bainita Revenida

Tem-se na Figura 4.29 os resultados dos ensaios de tração do Flange 1 como tratado. Foram duas amostras conforme a Figura 3.10, sendo: Amostra 1 - como tratada, retirada da parte mais interna (AM1-TRA-INT); e Amostra 2 - como tratada, retirada da parte mais externa (AM2-TRA-EXT).

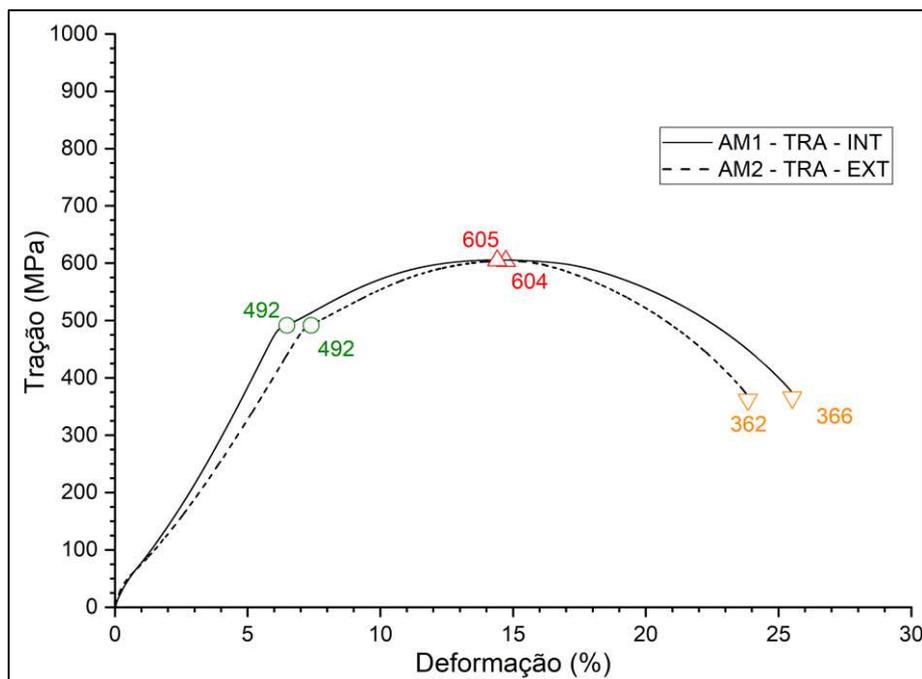


Figura 4.29 – Resultados dos ensaios de tração de duas amostras do Flange 1 como tratado

Percebe-se que as curvas de ensaio de tração são praticamente iguais, havendo uma ligeira diferença apenas no alongamento, mas, que por falta do extensômetro, não permite precisar se existiu alguma diferença real. Tanto o limite de escoamento quanto o limite máximo em ambas as amostras ainda permaneceram superior ao exigido pela norma (310 MPa para o limite de escoamento e 515 MPa para o limite máximo). Como era esperado devido à queda de dureza o alongamento ficou próximo dos 25 %, acima do mínimo exigido (22 %). A *ASTM 182* possui requisito também para a redução de área transversal que deve ser no mínimo 30 %. Para amostra 1 obteve-se 44 % de redução e para amostra 2 obteve-se 41 % de redução, estando ambas dentro do exigido.

As duas amostras de Charpy como tratadas foram testadas a -30 °C. As energias absorvidas nos testes foram 237,2 Joules (24,2 Kgf.m) e 154,8 Joules (15,8 Kgf.m) para amostras 1 e 2 respectivamente, estando também dentro dos critérios de aceitação. A Figura 4.30 mostra o aspecto da fratura resultante. Pelo cálculo de porcentagem dúctil-frágil de acordo com a *ASTM 370*, obteve-se 50 e 30% de fratura dúctil com perfil taça-cone, para amostras 1 e 2 respectivamente.

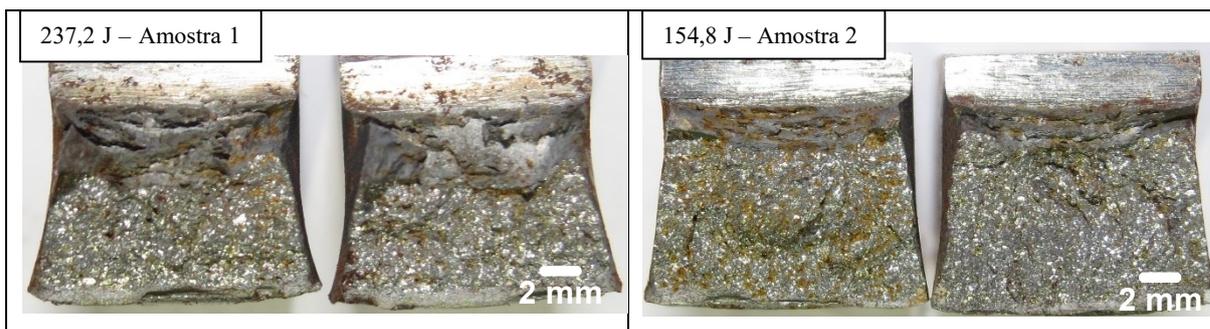


Figura 4.30 – Imagens do aspecto da fratura dos dois corpos de prova de Charpy como depositadas com sua respectiva energia absorvida

Pode-se concluir que com o tratamento térmico de normalização e revenido foi possível a fabricação de um flange funcional via *GMA-DED*. O tratamento térmico do flange depositado foi capaz de reduzir a dureza e aumentar o alongamento a nível desejados. Além disso os ensaios de Charpy também foram aceitos segundo a especificação da Petrobras - ET-5000.00-0000-500-PPC-001.

4.1.6.3 Análises das propriedades mecânicas em uma peça de teste – Somente revenimento

Para além da qualificação da peça, foi investigado se somente com o tratamento de revenimento seria possível alcançar resultados satisfatórios, haja vista que no flange 1 como depositado alcançou-se elevadas resistência mecânica e dureza. Para um teste rápido retirou-se duas amostras de um pré-teste. A amostra ‘A’ ficou como depositada (sem tratamento térmico) e a amostra ‘B’ foi tratada somente com revenimento a 675 °C por 1 h e 30 min. As duas amostras foram retiradas de um pré-teste de deposição do pescoço, os parâmetros de deposição foram próximos dos que foram utilizados para a realização do Flange 1. A Figura 4.31 à esquerda mostra o local das duas amostras, cortadas de um pré-teste do pescoço. À direita da Figura 4.31 tem-se a amostra ‘A’ (sem tratamento) e a Amostra ‘B’ (com tratamento de revenimento a 675 °C por 1 h e 30 min). Nota-se que a amostra tratada tem uma microestrutura mais homogênea quando comparadas com a depositada, onde é possível observa claramente as camadas, este fato pode ser melhor observado na Figura 4.32.

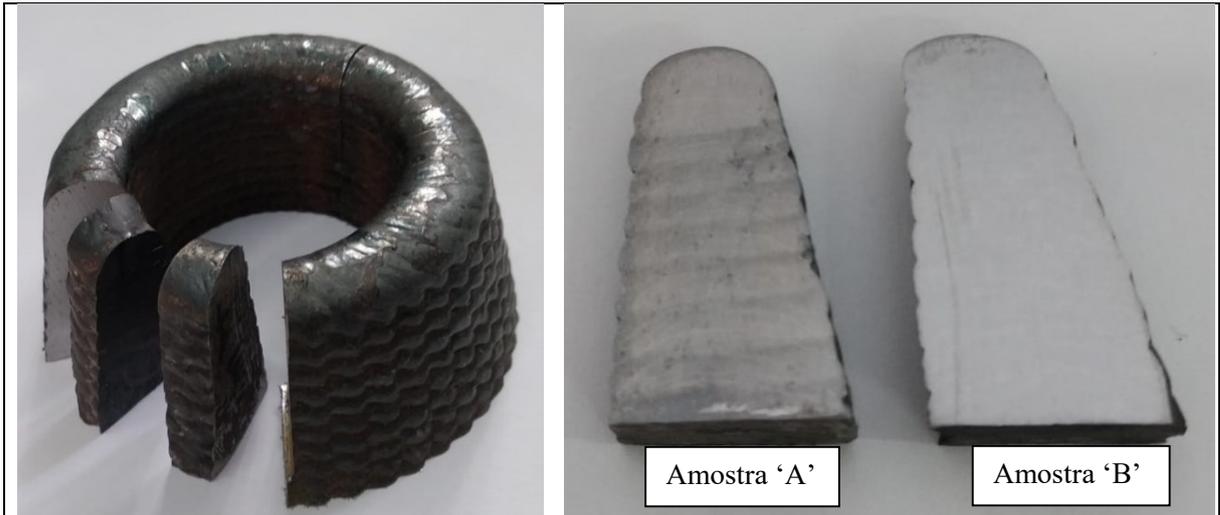


Figura 4.31 - Local de retirada das duas amostras do pré-teste de pescoço (esquerda); Amostra 'A' (sem tratamento) e Amostra 'B' (revenido a 675 °C por 1 h e 30 min) (direita)

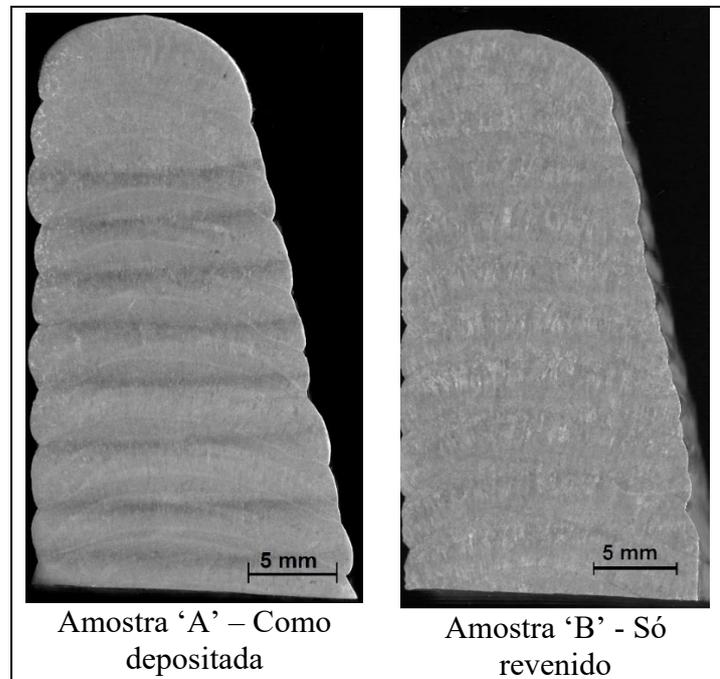


Figura 4.32 – Amostra A com camadas evidentes, amostra B mais homogênea

Figura 4.33 mostra o perfil de microdureza da Amostra 'A'. Como era de se esperar, observou-se a variação da microdureza ao longo das camadas, assim como ocorreu na metade do Flange 1 como depositado. A microdureza média obtida foi de 299,8 Vickers com desvio padrão de 29,25 Vickers.

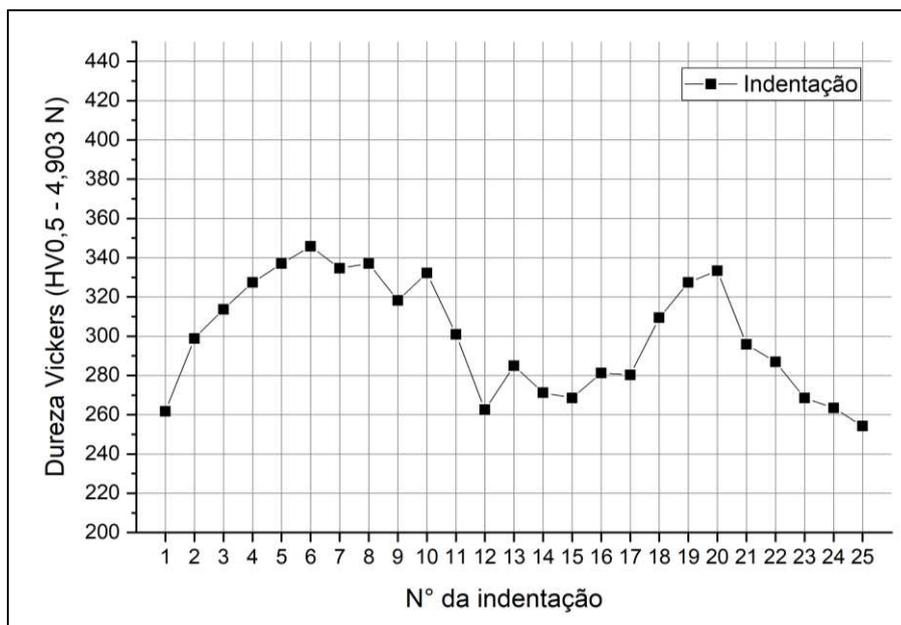


Figura 4.33 – Perfil de microdureza da amostra ‘A’ como depositada

A Figura 4.34 mostra os valores de microdureza da amostra B (somente revenimento). Os valores têm maior média e desvio em relação à metade do Flange 1 tratada com normalização e revenimento. A microdureza média obtida foi de 214,8 Vickers com desvio padrão de 11,80. O intervalo de confiança de 95 % para a média com base nos dados foi (210,1 - 219,4) Vickers. Convertendo o intervalo de confiança em Brinell de acordo com a tabela de conversão da *ASTM 1058*, tem-se (210 - 219) Brinell. Como o intervalo de dureza exigido pela norma *ASTM 182* é de (156 - 207) Brinell, comparando o intervalo de dureza obtido, (210 - 219,4) Brinell pode-se concluir que somente o revenimento, embora tenham reduzido significativamente a dureza, não foi capaz de reduzir os valores de dureza dentro da faixa exigida.

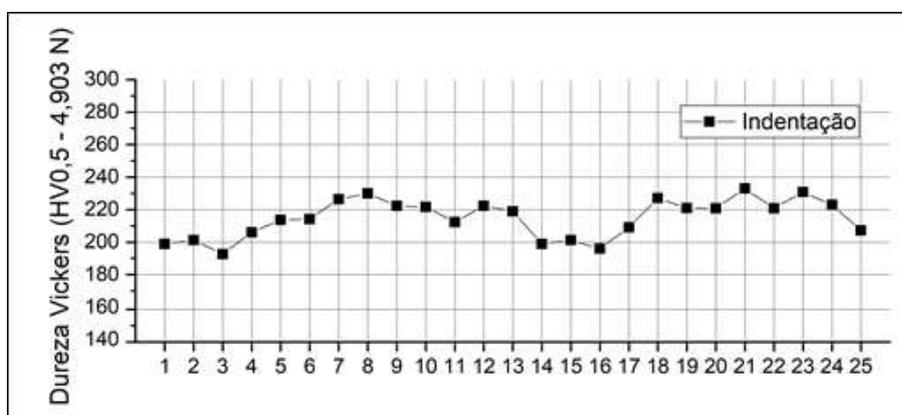


Figura 4.34 – Perfil de microdureza da amostra ‘B’ como tratado (somente revenido)

A quarta etapa do pós-processamento é realizar a furação e o acabamento espiral na face conforme a *ASME B16.5*. A furação da base será realizada em uma furadeira com o auxílio de uma mesa divisora para distanciar corretamente os furos e o acabamento superficial da face foi feito em torno com uma pastilha especial (60° com raio de 1,6 mm).

4.1.7 Inspeção final – Etapa 7

A inspeção final, seguindo a *AWS D20.1*, consiste em exame visual, inspeção dimensional, líquido penetrante, exame radiográfico e teste de densidade. Foi realizado neste trabalho o líquido penetrante e ultrassom parcial (no próximo flange fabricado). Os custos relativos a essa etapa foram considerados como terceirizados.

4.2 Melhoria na trajetória de deposição e aplicação do RAQI – Construção e análise do Flange 2

Visando obter um flange de pescoço com boa integridade (sem defeitos de superfície como ocorreu no flange 1), diminuir o escorrimento da poça de fusão na extremidade e no centro e reduzir acúmulo de calor, para o Flange 2 mudou-se a estratégia de deposição de sua base. Nesse caso, para a base usou-se círculos concêntricos do centro para a extremidade, sendo que na extremidade o arco é interrompido, aguarda-se 2 minutos e reinicia-se a deposição no centro novamente. Nesta estratégia o arco estará sempre depositando numa região da camada mais fria. A Figura 4.35 ilustra a nova estratégia de deposição para a base. A deposição começa no ponto A e termina no ponto B e retorna para o ponto A reiniciando a deposição.

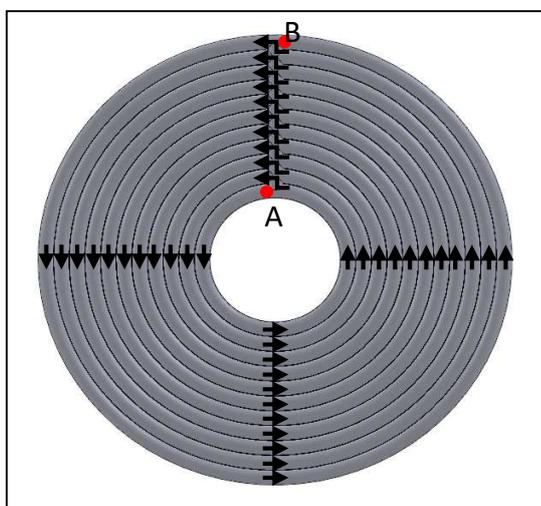


Figura 4.35 – Estratégia de deposição da base do Flange 2

Além da mudança de trajetória, para a deposição do Flange 2 foi feito um furo no centro do substrato para a circulação da água dentro do tubo do flange durante a deposição. Além disso, foram feitas 8 canaletas para melhorar a circulação de água entre o substrato de deposição da peça e o substrato de rigidez. A Figura 4.36 mostra os dois substratos. O Flange 2 foi depositado com o arame ER 90S B3.

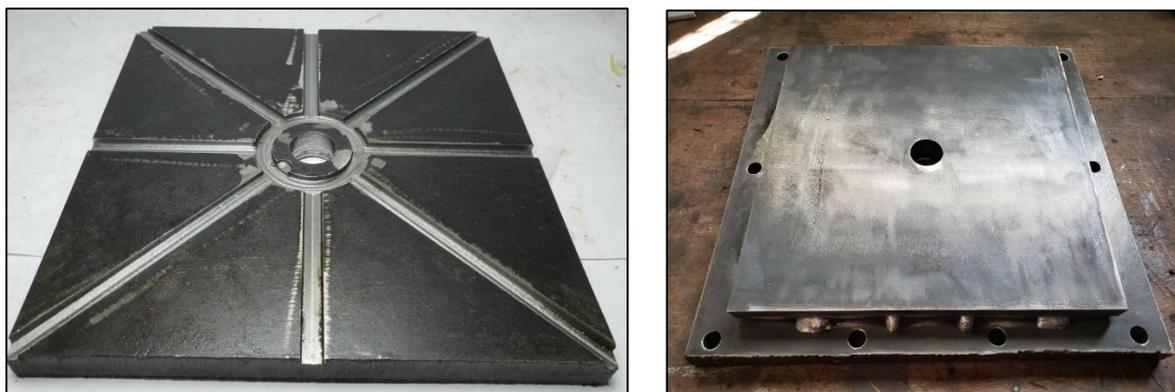


Figura 4.36 – Face oposta do substrato de deposição (esquerda); Substrato de deposição fixado ao substrato de rigidez com as canaletas para baixo (direita)

Após pré-testes, a estratégia de deposição da base foi com 12 camadas concêntricas com 15 revoluções. A estratégia de deposição do pescoço e do tubo foi a mesma do Flange 1, bem como todos os processos de usinagem. A Tabela 4.6 traz um comparativo das variáveis do Flange 1 e do Flange 2.

Tabela 4.6 - Informações de processo referente a cada flange

	FLANGE 1	FLANGE 2
Processo de Deposição	<i>GMA-DED- Pulse</i>	<i>GMA-DED- Pulse</i>
Fonte de energia	TransPuls Synergic 5000/MV	TransPuls Synergic 5000/MV
Material do substrato	Chapa SAE 1020	Chapa SAE 1020
Material de deposição	ER 90S B3 Ø 1,2 mm	ER 90S B3 Ø 1,2 mm
Local de fabricação	Robô/RAQI	Robô/RAQI
Trajétória de base	14 camadas	12 Camadas
	Espiral de Arquimedes com 14 voltas	15 círculos concêntricos
Velocidade dep. base	8,3 mm/s ³	8,3 mm/s ³
Trajétória do pescoço	13 camadas	13 camadas
	Hélice cônica	Hélice cônica
	Oscilação 12 mm decrecente até 0	Oscilação 14 mm decrecente até 0

Tabela 4.7 - Informações de processo referente a cada flange (continuação)

Velocidade Dep. Pescoço	1,4 mm/s – 4,0 mm/s ¹	1,4 mm/s – 4,0 mm/s ¹
Trajétória do tubo	14 camadas	<u>18 camadas</u>
	Hélice cilíndrica	Hélice cilíndrica
Velocidade Dep. tubo	4,2 mm/s ³	4,2 mm/s ³
Velocidade Alimentação	5,5 m/min	5,5 m/min
DBCP	17 mm	17 mm
Gás de Proteção	Ar + 4 %CO ₂ 15 L/min	Ar + 4 %CO ₂ 15 L/min
RAQI	Sim	Sim
DLAD	20 mm	20 mm
Temperatura da água	30 °C – 70 °C	30 °C – 70 °C
Água dentro do tubo	Não	Sim
Peso como depositado (Pd)	9 196 g	<u>8 765 g</u>
Peso como usinado (Pu)	3 510 g ⁴	3 510 g ⁴
Relação (Pd/Pu)	2,60	<u>2,48</u>
Tempo de deposição	3 h 15 min	<u>3 h 23 min</u>

1 – Velocidade deposição tangencial ao círculo, independente da oscilação, começa com 1,4 mm/s com incremento de 0,2 mm/s por camada.

2 – Velocidade de deposição tangencial a senoide.

3 – Velocidade tangencial a trajetória.

4 - Valores de referência segundo a norma *ASME B16.5*.

DBCP – Distância do bico de contato a peça.

DLAD – Distância da lâmina d'água a deposição.

Para o Flange 2 foi adquirido a tensão e corrente durante toda a deposição, sendo que cada camada gera um arquivo bruto com aproximadamente 700 segundos e 3,5 milhões de pontos (taxa de aquisição de 5 kHz). Como um gráfico com essa quantidade de pontos seria de difícil visualização e interpretação, fez-se uma média a cada 10 segundos (50 000 pontos) e resultando no gráfico mostrado a Figura 4.37. Desse modo cada camada tem média de 70 pontos. Com o novo método de aquisição e tratamento dos dados é possível gerar gráficos com mais informações durante toda a camada em comparação com o método da média dos 5 primeiros segundos de cada camada, como foi feito no Flanges 1.

O efeito da queda de corrente nas extremidades e no centro pode ser observado durante toda a deposição, entretanto a média global se manteve estável durante toda a fabricação do flange (155 A). No pescoço a corrente média (Figura 4.38) teve queda linear, provavelmente

devido ao incremento do eixo Z programado ser diferente do incremento real da camada. Esse fenômeno não foi observado nos gráficos dos flanges 1 devido método de aquisição não ser capaz de adquirir com precisão tal fenômeno. Tem-se na Figura 4.39 o Flange 2 depositado, sendo notório o aspecto significativamente melhor que no Flange 1.

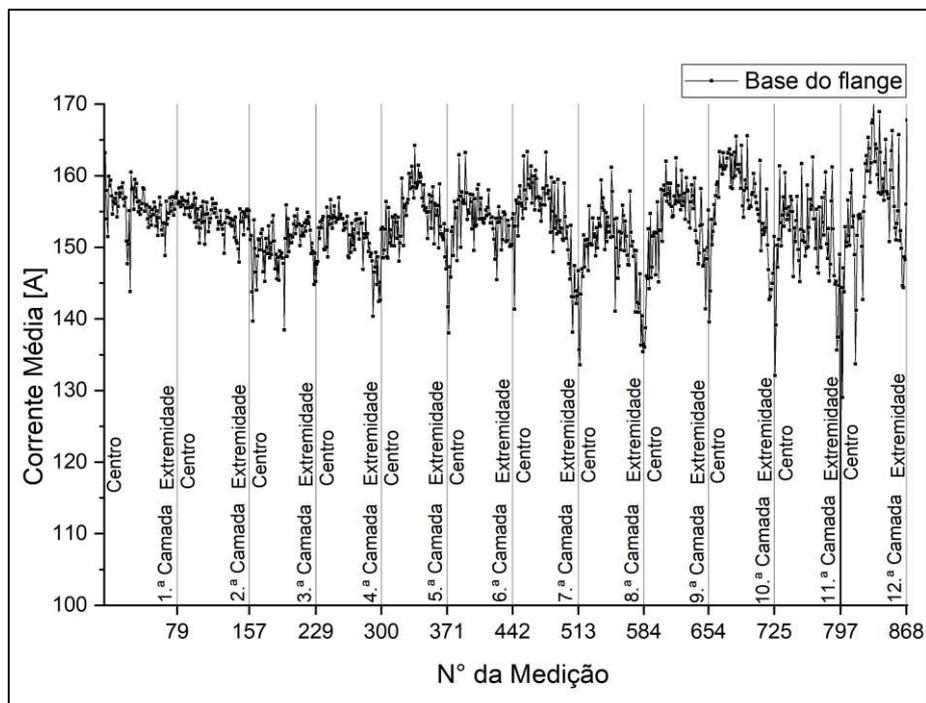


Figura 4.37– Corrente média em função das camadas para o Flange 2

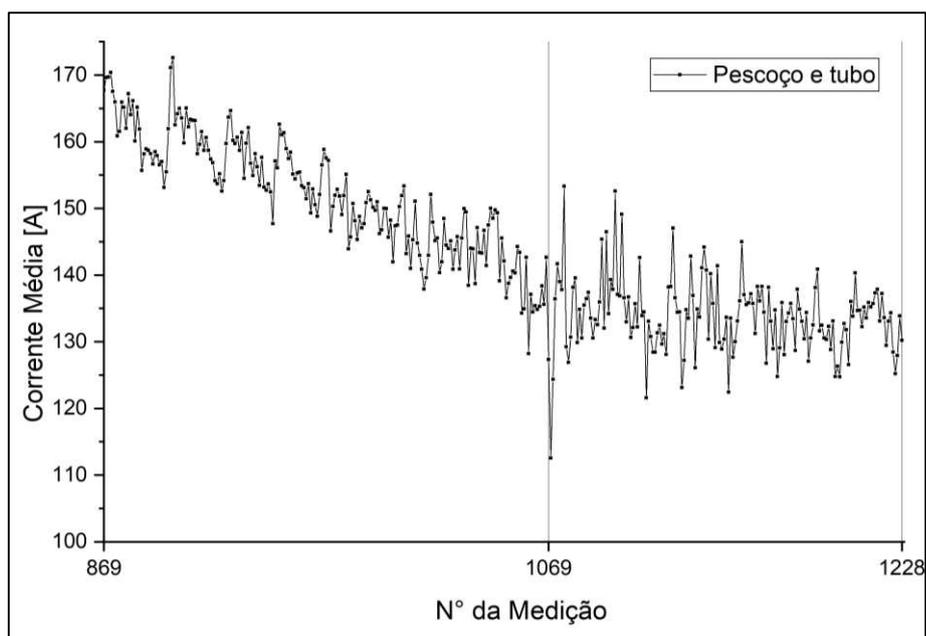


Figura 4.38 - Corrente média em função das várias medidas adquiridas durante a deposição do pescoço e do tubo com medição de 869 a 1069 (pescoço) e de 1070 a 1228 (tubo).



Figura 4.39 – 4 imagens do Flange 2 como depositado

A Tabela 4.8 mostra a composição química do certificado do arame ER 90S B3 (emitido pelo fabricante), do depósito do Flange 2 (realizado pelo *Vanta Olympus* no laboratório) e da Norma *ASTM 182 F22 Cl 3*. A última coluna traz um comparativo entre o depósito e a norma. Pode-se concluir que o Flange 2 está adequado quanto a composição química exceto para Silício, que mesmo considerando o erro de medida de 0,029 % para mais ou para menos obtêm-se valores fora da *ASTM 182*. Valores para o Carbono não podem ser medidos com o equipamento *Olympus Vanta*, mas pelo certificado de composição química indica-se que o carbono tenha ficado dentro do valor exigido

Tabela 4.8 – Comparativo de composição química [%]

Elemento	Certificado do arame ER 90S B3	Depósito (Flange 2)	ASTM 182 F22 Cl. 3	Comparação Depósito com ASTM 182
C	0,075	-	0,05 - 0,15	--
Mn	0,570	0,530 ± 0,025	0,30 - 0,60	ok
P	0,007	0,024 ± 0,008	0,04	ok
S	0,007	0,004 ± 0,012	0,04	ok
Si	0,440	0,666 ± 0,029	0,50	+ 0,166
Ni	0,110	0,064 ± 0,009	--	--
Cr	2,380	2,420 ± 0,026	2,00 - 2,50	ok
Mo	0,920	0,933 ± 0,008	0,87 - 1,13	ok
Fe	95,491*	95,194 ± 0,049	--	--
Cu	0,160	0,162 ± 0,011	--	--

* valor para o ferro não consta (restante)

A Figura 4.40 mostra várias imagens do Flange 2 usinado. Neste caso, as descontinuidades reduziram significativamente comparado com o Flange 1, sendo possível observar alguns pequenos poros espaçados no tubo interno, mas que passam nos critérios de aceitação da *AWS D20.1*. Os 8 furos de fixação do flange não foram feitos para facilitar a inspeção por ultrassom. Foi realizada a inspeção por ultrassom somente na região adjacente do pescoço na base do flange, sendo que as demais regiões (pescoço, tubo e região abaixo do pescoço) não foram passíveis de inspeção. Não foram verificados defeitos internos tais como trincas e falta de fusão entre os cordões da base.



Figura 4.40– Imagens do flange 2 como usinado.

O Flange 2 foi tratado termicamente (normalização e revenimento), sendo o tratamento térmico está descrito em detalhes secção 4.1.6. Após o tratamento térmico, foi realizada a inspeção por ultrassom somente na região adjacente do pescoço da base do flange. As demais regiões (pescoço, tubo e região abaixo do pescoço) não foram passíveis de inspeção por falta de cabeçotes específicos no laboratório. Não foram verificados defeitos internos tais como trincas e falta de fusão entre os cordões da base.

Após a inspeção, o Flange 2 foi usinado novamente para conferir as dimensões e realizar a furação. Após o processo final de usinagem, foi feito o ensaio por líquido penetrante, com resultados mostrados na Figura 4.41, foram encontrados dois poros superficiais distantes entre

eles por mais de 20 vezes o diâmetro do maior poro, portanto o ensaio está aprovado. Essa peça deixou como demonstração para a empresa requerente, caso deseje utilizar em serviço.

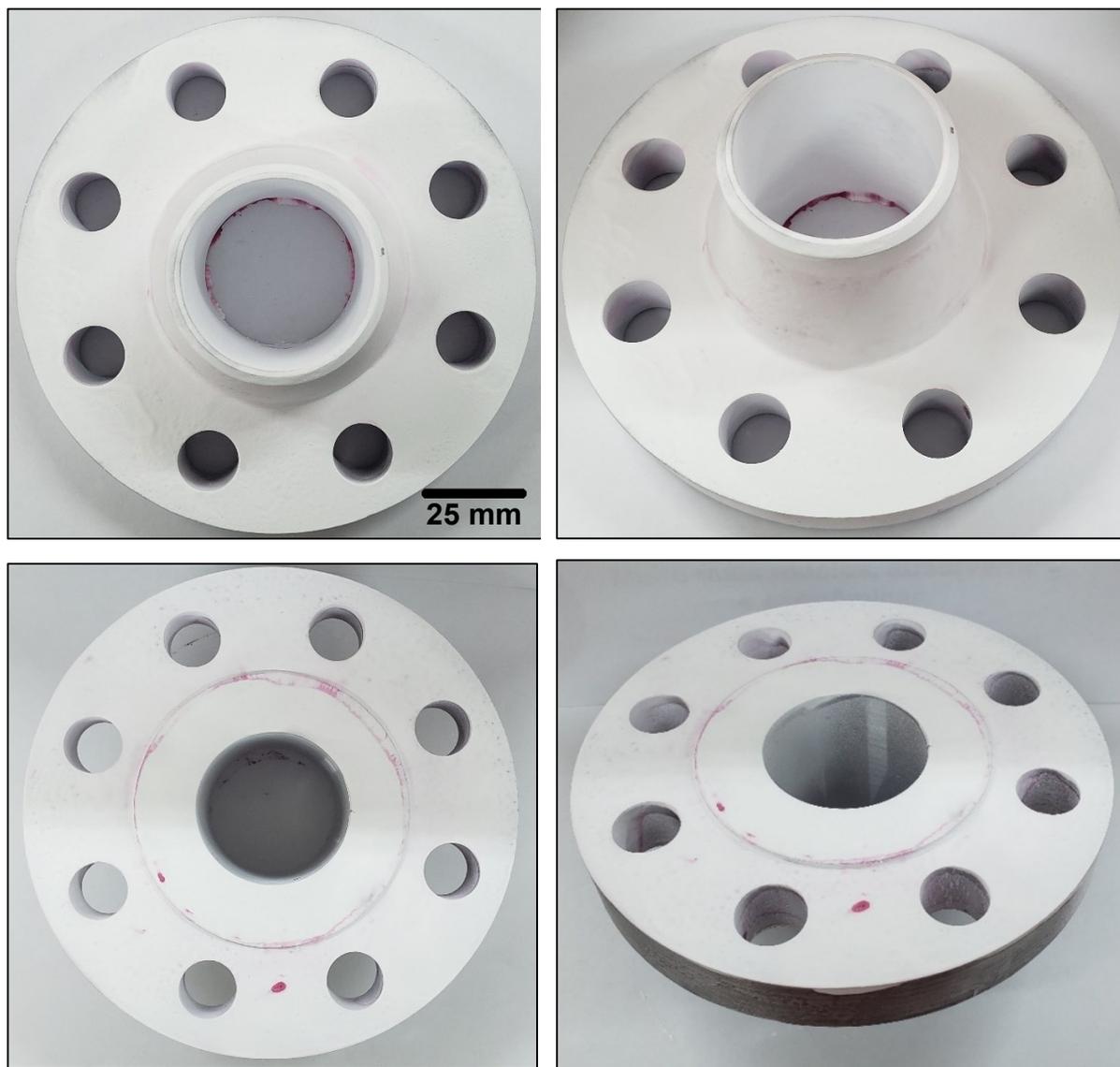


Figura 4.41 – Resultado do ensaio por líquido penetrante do Flange 2 em duas etapas, superior e inferior

4.3 Analisando outra trajetória e outro equipamento - Flange 3

O Flange 3 foi a primeira peça depositada na mesa de coordenadas XYZ, um equipamento nacional desenvolvido no LAPROSOLDA com o financiamento da Petrobras. Os detalhes da bancada foram mostrados na secção 3.1.2.2. O Flange 3 foi depositado com o processo *CMT*, uma das variantes do processo a *GMA-DED*, sendo utilizado um arame

ER 90S B3 de 1,2 mm de diâmetro. A Tabela 4.9 mostra todas as informações de deposição referentes aos flanges 1, 2 e 3.

A Linguagem de código-G facilita a criação de trajetória mais complexas em menor tempo. A Base do Flange 3 tem 12 camadas com trajetória híbrida (Contorno + zigue-zague), e para cada camada fez-se primeiro o contorno interno e externo criando assim um ancoramento da poça de fusão (visando minimizar as distorções geométricas causadas pelo escorrimento da poça de fusão, fenômeno que ocorreu nos Flanges 1 e 2). Após o contorno preencher a camada com cordões lineares de sobreposição lateral de 25 %, a Figura 4.42 mostra a 2ª camada da base do flange depositada.

Tabela 4.9 – Informação de deposição dos flanges 1, 2 e 3

	FLANGE 1	FLANGE 2	FLANGE 3
Processo de Deposição	<i>GMA-DED- Pulse</i>	<i>GMA-DED- Pulse</i>	<i>GMA-DED-CMT</i>
Fonte de energia	TransPuls Synergic 5000/MV	TransPuls Synergic 5000/MV	<i>CMT Advance VR 7000</i>
Material do substrato	Chapa SAE 1020	Chapa SAE 1020	Chapa SAE 1020
Material de deposição	ER 90S B3 Ø 1,2 mm	ER 90S B3 Ø 1,2 mm	ER 90S B3 Ø 1,2 mm
Local de fabricação	Robô/RAQI	Robô/RAQI	Mesa/RAQI
Trajectoria de base	14 camadas	12 Camadas	12 camadas
	Espiral de Arquimedes com 14 voltas	15 círculos concêntricos	(Contorno + Zigue- Zague)
Velocidade dep. base	8,3 mm/s ³	8,3 mm/s ³	5,3 mm/s ³
Trajectoria do pescoço	13 camadas	13 camadas	9 camadas
	Hélice cônica	Hélice cônica	Hélice cônica
	Oscilação 12 mm decrecente até 0	Oscilação 14 mm decrecente até 0	Oscilação 12,6 mm decrecente até 6,5 mm
Velocidade Dep. Pescoço	1,4 mm/s– 4,0 mm/s ¹	1,4 mm/s – 4,0 mm/s ¹	12,5 mm/s ¹
Trajectoria do tubo	14 camadas	18 camadas	17 camadas
	Hélice cilíndrica	Hélice cilíndrica	Hélice cilíndrica oscilação 6,5 mm
Velocidade Dep. tubo	4,2 mm/s ³	4,2 mm/s ³	12,5 mm/s ³
Velocidade Alimentação	5,5 m/min	5,5 m/min	4,5 m/min – base 5,5 m/min - resto
DBCP	17 mm	17 mm	17 mm
Gás de Proteção	Ar + 4 %CO ₂ 15 L/min	Ar + 4 %CO ₂ 15 L/min	Ar + 4 %CO ₂ 15 L/min
RAQI	Sim	Sim	Sim
DLAD	20 mm	20 mm	20 mm

Tabela 4.10 – Informação de deposição dos flanges 1, 2 e 3 (continuação)

Temperatura da água	30 °C – 70 °C	30 °C – 70 °C	30 °C – 40°C
Água dentro do tubo	Não	Sim	Não
Peso como depositado (Pd)	9 196 g	8 765 g	10 684 g
Peso como usinado (Pu)	3 510 g ⁴	3 510 g ⁴	3 510 g ⁴
Relação (Pd/Pu)	2,60	2,48	3,04
Tempo de deposição	3 h 15 min	3 h 23 min	4 h 24 min

1 – Velocidade deposição tangencial ao círculo, independente da oscilação, começa com 1,4 mm/s com incremento de 0,2 mm/s por camada.

2 – Velocidade de deposição tangencial a senóide.

3 – Velocidade tangencial a trajetória.

4 - Valores de referência segundo a norma *ASME B16.5*.

DBCP – Distância do bico de contato a peça.

DLAD – Distância da lâmina d'água a deposição.

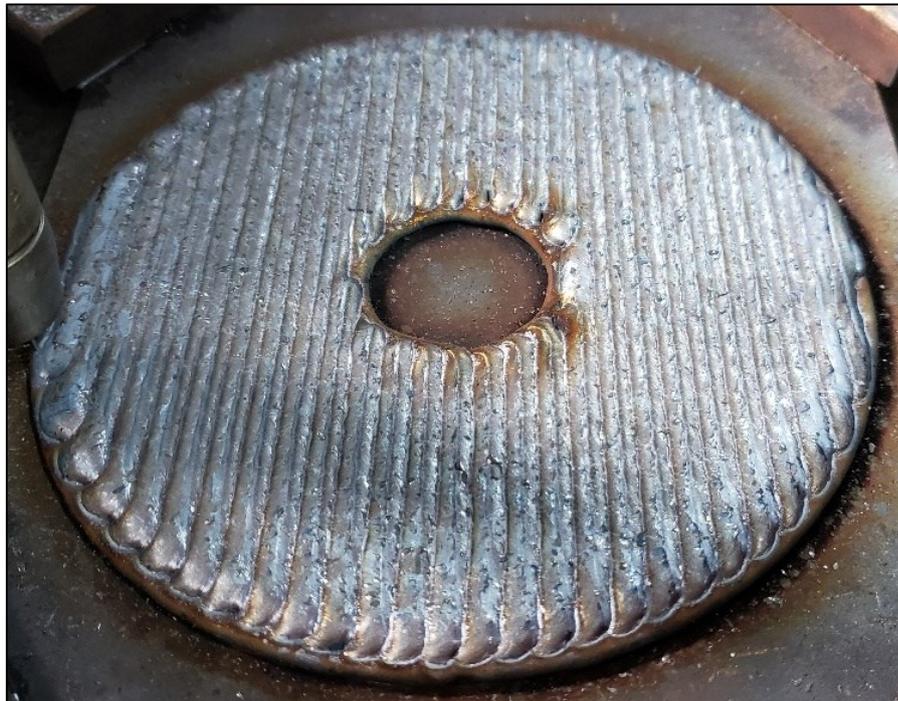


Figura 4.42 – Imagem da 2ª camada da base do Flange 3

A trajetória do pescoço do Flange 3 foi semelhante aos demais. Foram 9 camadas em formato hélice cônica com oscilação perpendicular à direção de deposição, com amplitude da oscilação começando em 12,6 mm e terminando em 6,8 mm. Para o tubo foram 17 camadas em hélice com oscilação de 6,8 mm para todo o tubo. A Figura 4.43 mostra algumas imagens da deposição do Flange 3.



Figura 4.43 – Imagens da deposição do Flange 3

O objetivo deste flange foi testar o equipamento desenvolvido no Laprosolda para MADA e demonstrar que existem diversas estratégias de deposição e equipamentos capazes de depositar uma pré-forma, camada a camada, próxima a de uma peça final, o que comprovou a robustez da tecnologia. Este equipamento usa o código-G para a programação das trajetórias, uma linguagem universal de fácil aprendizado, utilizados em diversas máquina *CNC* globalmente conhecidas. Essas características mostram que o equipamento de MADA pode ter baixíssimo custo de aquisição, manutenção e fácil operação. Além disso, este flange contribui para obter uma média do tempo de fabricação, do peso de deposição. Na próxima secção será discutido se os custos envolvidos na adoção da MADA.

4.4 Estimativa de Custo pelo Método de Custeio por Absorção Pleno com Departamentalização

Para estimar o custo unitário do flange, e posteriormente estimar o preço de venda, toma-se como suposição uma empresa especializada na fabricação de peças metálicas por *GMA-DED* e que recebeu uma demanda de fabricação de alguns flanges de pescoço.

4.4.1 Departamentalização

No método de custeio por absorção, a atribuição de custos aos produtos pode ser realizada por meio da sua segregação em grupos (departamentalização) nos quais os custos relacionados à mão de obra, materiais, energia, aluguel etc. são acumulados elemento a elemento em cada departamento durante a execução da encomenda, e posteriormente é realizada uma análise de quanto cada departamento transferiu seus custos ao produto. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho identificou-se 1 departamento de serviço (que receberá os custos indiretos e as despesas) e 9 departamentos de produção (que receberão os custos diretos) conforme a Tabela 4.11. Nas próximas secções serão detalhadas as características de cada departamento.

Tabela 4.11 – Departamentos de serviço e de produção identificados para *GMA-DED* na fabricação de flanges

Departamentos de Serviço	Departamentos de Produção
Administração (<i>Overheads</i>)*	Modelagem 3D e definição do produto
	Qualificação de procedimento
	Preparação do substrato
	Deposição do componente via <i>GMA-DED</i>
	Remoção da pré-forma do substrato
	Torneamento da pré-forma
	Furação da pré-forma
	Tratamento térmico
	Inspeção final

* - Administração geral, secretaria, almoxarifado, controle de qualidade, manutenção e limpeza.

Considerando as instalações do Laprosolda uma empresa, o departamento de administração é um local com 69,79 m², área que contempla o escritório, banheiro, almoxarifado, estacionamento e demais áreas administrativas. Esse departamento é equipado com um computador no valor de R\$ 6.000,00 (consumo médio de 0,3 kWh), onde trabalha um secretário responsável pelos recursos humanos, pagamento de contas, ordem de serviço, orçamentos de materiais diversos, recebimento de pedido, estoque de materiais (arames, gases, acessórios de fonte e máquinas), embalagem, despacho de peças e documentos. Outros gastos, de manutenção, limpeza e segurança entrarão neste departamento. O departamento de administração é o único departamento de serviço considerado nesta pesquisa, isto é, um departamento auxiliar que atende todos os demais departamentos produtivos.

O Departamento de modelagem 3D e definição do produto, local com 7,5 m², equipado com computador no valor de R\$ 9.000,00 (consumo médio 0,5 kWh), onde trabalha um engenheiro responsável pelas seguintes atividades: obter o desenho *CAD* 3D e definição do produto (etapa 1 da metodologia) e gerar o arquivo *STL* (etapa 2 da metodologia).

Departamento de qualificação de procedimento, local com 19,5 m², equipado com uma fonte de deposição no valor R\$ 200.000,00 (consumo médio 9 KWh), um braço robótico no valor de R\$ 500.000,00 (consumo médio de 10 kWh), onde trabalham um engenheiro e um técnico responsável pela atividade de setup e deposição dos CPs para a qualificação do procedimento (etapa 3 e 4 da metodologia). A qualificação do procedimento pode consistir numa deposição horizontal e vertical, como sugere a *AWS D20.1* ou pode-se retirar CPs do próprio componente (destrutivo, porém mais representativo). A usinagem dos CPS e os ensaios são terceirados. Ao final, o departamento de qualificação entrega a trajetória de deposição qualificada e definida em sua respectiva linguagem de programação para a máquina.

Departamento de preparação de substrato (etapa 5 da metodologia), um local com 7 m², um local de oficina geral, onde trabalha um técnico responsável pela seleção de uma chapa de aço, corte nas dimensões corretas, execução da furação para a fixação e preparação da superfície de deposição.

O departamento de deposição é o mesmo local do departamento de qualificação de procedimento, porém com atividade diferente, onde trabalha um engenheiro responsável pelo setup da máquina e acompanhamento de todo o processo de deposição (etapa 5 da metodologia).

Os departamentos de remoção do substrato, torneamento, furação e tratamento térmico são departamentos de pós-processamento (etapa 6 da metodologia), e são locais com instalação elétrica e o maquinário correspondente, onde trabalha o técnico responsável pela operação dos equipamentos, sendo que cada local possui uma área necessária para a operação, conforme a Tabela 4.12.

O Departamento de inspeção final (Etapa 7 da metodologia) não possui um local dentro da empresa, pois trata-se de um serviço terceirizado, entretanto foi criado um departamento que fica responsável pela execução da atividade.

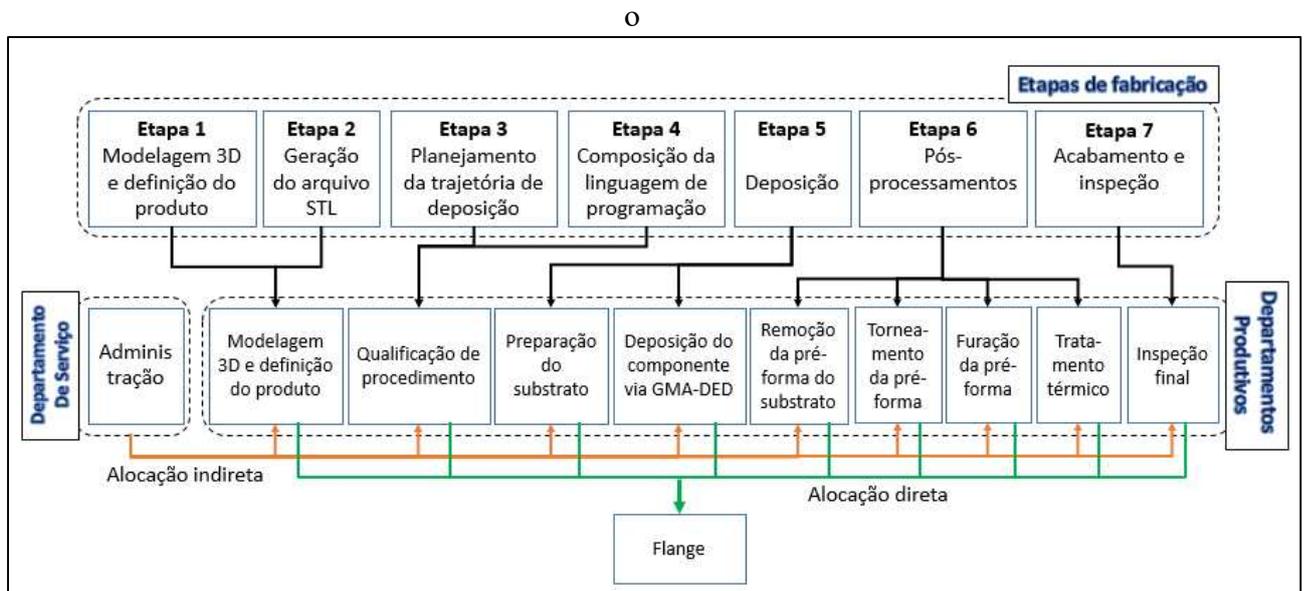


Figura 4.44 – Relação das etapas de fabricação com os departamentos produtivos

4.4.2 Dados de Entrada

Os dados de entrada são dados numéricos que serão utilizados para o cálculo do custo unitário do flange. Da Tabela 4.12 até a Tabela 4.18 contém todos os dados de entrada que serão utilizados para o cálculo do custo unitário.

Tabela 4.12 – Informações do aluguel do prédio e área dos 10 departamentos (1 de serviço e 9 de produção)

Dados de entrada de área	Valor	Unidade
Aluguel do prédio ¹	2500,00	R\$
Área total do prédio ¹	150	m ²
Área do departamento de modelagem 3D e definição do produto ²	7,50	m ²
Área do departamento de qualificação de procedimento e deposição ²	19,50	m ²
Área do departamento de preparação do substrato e remoção do substrato ²	7,00	m ²
Área do departamento de Torneamento ²	9,45	m ²
Área do departamento de Furação ²	5,76	m ²
Área do departamento de Tratamento térmico ²	24,00	m ²
Administração - Almojarifado/banheiro/estacionamento ³	69,79	m ²

¹ - Dado estimado através de uma pesquisa de mercado.

² - Dado medido com uma fita métrica, considerando as dimensões das máquinas contidos no Laboratório com a área de operacional.

³ - Dado calculado, o que restou da área total.

Tabela 4.13 – Dados do flange de pescoço

Dados de entrada do Flange	Valor	Unidade
Peso do flange pronto ¹	3,51	kg
Diâmetro do tubo ¹	52,48	mm
Diâmetro do flange ¹	127,00	mm
Quantidade de furos ¹	8	Adimensional
Diâmetros dos furos ¹	19,05	mm
Profundidade do furo ¹	20,70	mm
Área de corte da base ²	105,04	cm ²

¹ - Dados obtidos através da *ASME B16.5*.

² - Dados calculados.

Tabela 4.14 – Dados do arame, gás e substrato

Dados do arame, gás e substrato	Valor	Unidade
Diâmetro nominal do arame ¹	1,2	mm
Densidade do arame ²	7800	kg/m ³
Preço do arame/kg ³	28	R\$/kg
Preço do m ³ de gás ³	30	R\$/m ³
Preço do substrato/kg ³	14	R\$/kg

¹ - Dado escolhido para esta pesquisa.

² - Dados tabelado.

³ - Valor pago durante a pesquisa.

Tabela 4.15 – Informações referentes à deposição

Dados de entrada da deposição	Valor	Unidade
Fator de sobremetal ¹	2,6	Adimensional
Peso da pré-forma ²	9,126	kg
Peso da pré-produção (Qualificação de procedimento) ¹	8	kg
Velocidade de alimentação ¹	5,5	m/min
Vazão de gás ¹	14	L/min

¹ - Dado real obtido pela pesquisa durante a deposição.

² - Dado calculado, peso do flange multiplicado pelo fator sobremetal.

Tabela 4.16 – Informações referentes aos equipamentos, softwares, P&D, qualificações e normas

Máquinas, softwares, P&D, qualificações e normas	Investimento ¹	Consumo kWh ²	Vida útil (anos) ³	Manutenção Anual ⁴	Hora máquina ⁵
Computador da administração	R\$ 6.500,00	0,30	5	R\$ 130,00	R\$ 0,49
Computador da digitalização	R\$ 9.000,00	0,50	5	R\$ 180,00	R\$ 0,68
Software <i>CAD</i> 3D	R\$ 5.000,00	--	1	0,00	R\$ 1,71
Software de Fatiamento - <i>Robot Master</i> ®	R\$ 40.000,00	--	5	0,00	R\$ 2,74
Mesa coordenadas	R\$ 50.000,00	2,00	5	R\$ 2.500,00	R\$ 4,28
Braço Robótico	R\$ 500.000,00	20,00	10	R\$ 25.000,00	R\$ 25,68
Fonte deposição <i>Fronius</i> ®	R\$ 200.000,00	4,00	5	R\$ 10.000,00	R\$ 17,12
Serra de fita	R\$ 20.000,00	2,20	20	R\$ 1.000,00	R\$ 0,68
Torno convencional	R\$ 35.000,00	5,70	20	R\$ 1.750,00	R\$ 1,20
Furadeira de coluna com mesa divisora	R\$ 15.000,00	2,20	20	R\$ 750,00	R\$ 0,51
Forno para tratamento térmico	R\$ 70.000,00	39,00	10	R\$ 3.500,00	R\$ 3,60
P&D inicial ⁶	R\$ 100.000,00	--	--	--	--
Qualificação de máquina MA	R\$ 4.000,00	--	--	--	--
Qualificação do Operador MA	R\$ 8.000,00	--	--	--	--
Qualificação do Procedimento MA	R\$ 4.000,00	--	--	--	--
Normas Gerais	R\$ 5.000,00	--	--	--	--
Total	R\$ 1.071.500,00				

¹ - Dado estimado através de pesquisa de mercado, como novo. São serão contabilizados como custo de produção,

² - Dado real obtido através das informações de manuais.

³ - Dado estimado através obsolescência, ao final deste tempo seria necessário a troca ou atualização do equipamento

⁴ - Dado calculado, 5 a 10 % do valor pago.

⁵ - Dado calculado, valor pago amortizado ao longo da vida útil.

⁶ - Dado estimado pela pesquisa, tempo gasto para desenvolver a metodologia.

Tabela 4.17 – Informações da qualificação de máquina e procedimento segundo a *AWS D20.1*

Ensaio	Valor por amostra	Valor por peça
Exame visual	R\$ 30,00	R\$ 90,00
Inspeção dimensional	R\$ 40,00	R\$ 55,00
Líquido penetrante	R\$ 60,00	R\$ 90,00
Radiográfico exame	R\$ 90,00	R\$ 120,00
Teste de densidade	R\$ 120,00	R\$ 180,00
Teste de tração - 3x	R\$ 384,00	--
Exame metalográfico	R\$ 198,00	--
Análise química	R\$ 182,00	--
Teste de Charpy	R\$ 318,00	--
Ensaio de dureza	R\$ 132,00	--
Total	R\$ 1.554,00	R\$ 535,00

Tabela 4.18 – Outros dados de entrada

Dados de entrada para obter o modelo	tempo gasto (h)
Nível 1	4
Nível 2	8
Nível 3	16
Nível 4	Dias
Hora-Homem	Valor
HH Engenheiro	R\$ 90,00
HH Técnico	R\$ 45,00
HH Secretário	R\$ 19,00
Energia	Valor
kWh	R\$ 0,65

4.4.3 Cronograma de fabricação

A Tabela 4.19 traz o cronograma de fabricação, sendo que a duração de cada tarefa foi obtida através dos resultados práticos da fabricação dos flanges. As tarefas contidas nesta tabela estão em função dos departamentos e das atividades que interferem no tempo de fabricação. A cada 8 horas trabalhadas tem-se um dia útil de serviço, a cada 5 dias úteis de serviço tem 2 dias de folga, portanto o tempo de fabricação de um flange ficou em 7,35 dias corridos. Para uma melhor visualização do cronograma, a Figura 4.45 mostra um gráfico de barras do cronograma em função da duração de cada atividade.

Tabela 4.19 – Cronograma de fabricação

CRONOGRAMA DE FABRICAÇÃO					
TAREFAS	Departamento	Início [h]	Duração [h]	Término [h]	
Espera do material	--	0,00	16,00	16,00	
Modelagem 3D e definições do produto	Modelagem 3D e definições do produto	0,00	8,00	8,00	
Deposição/usinagem dos CPs	Qualificação de procedimento	4,00	10,00	14,00	
Inspeção dos CPs para a qualificação	Qualificação de procedimento	14,00	6,00	20,00	
Preparação do Substrato	Preparação do Substrato	8,00	4,00	12,00	
Deposição do componente via <i>GMA-DED</i>	Deposição do componente via <i>GMA-DED</i>	20,00	5,13	25,13	
Remoção da pré-forma do Substrato	Remoção da pré-forma do Substrato	25,13	1,35	26,49	
Torneamento da pré-forma	Torneamento da pré-forma	26,49	6,62	33,10	
Furação da pré-forma	Furação da pré-forma	33,10	1,74	34,84	
Tratamento térmico do flange	Tratamento térmico do flange	34,84	4,00	38,84	
Inspeção final	Inspeção final	38,84	4,00	42,84	
				5,35	Horas trabalhadas
				7,35	Dias úteis
					Dias corridos

¹ - Foram consideradas 2 horas a mais de setup

² - Foi considerada 1 hora de setup

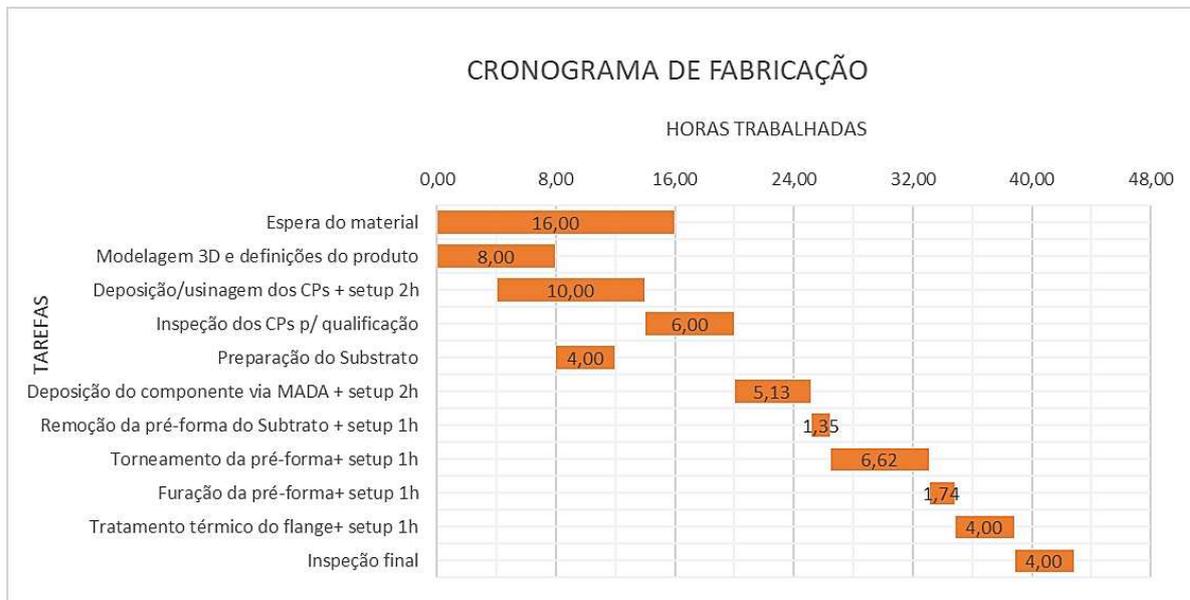


Figura 4.45 – Cronograma de fabricação - tarefas em função das horas trabalhadas

Uma das vantagens da MA é a redução do estoque de matéria-prima para a fabricação dos componentes, haja vista que a deposição de uma bobina de arame pode dar forma a diversas geometrias diferentes. Portanto, o estoque depende basicamente do material a ser depositado. Foi considerado nesta pesquisa um tempo de espera do material de deposição, que não pertence a departamento nenhum, pois a quantidade pode ser insuficiente para a conclusão de uma demanda a depender da necessidade. Entretanto foi considerado que exista um estoque mínimo de poucas bobinas de vários materiais dando-se início a qualificação do procedimento, sendo possível qualificar o procedimento enquanto se aguarda pela chegada do material restante. Uma boa cadeia de suprimentos de arames deve ser considerada para o bom andamento da fabricação.

As tarefas mais longas são de “deposição/usinagem dos CPs” e “inspeção de qualificação”, que são tarefas referente ao departamento de qualificação do procedimento, que juntas necessitam de 16 horas trabalhadas (2 dias corridos). O tempo para a deposição do componente corresponde a apenas 11,9 % do tempo total, existindo, portanto, um grande potencial de redução do tempo de fabricação total com a otimização das demais atividades.

Destaca-se aqui o tempo considerável gasto para o “torneamento da pré-forma” (6,62 horas – 15,4 %), devido a dois motivos. Primeiro, devido a quantidade de material a ser removido, que foi de 5,62 kg (quase duas vezes o peso final do próprio flange). Segundo, devido ao acabamento grosseiro que demanda baixas velocidades de corte. Esse fato foi mencionado por Ding *et al.* (2015), que por causa da acurácia e acabamento superficial grosseiros, tornam-se necessárias operações de usinagem, resultando em maior tempo de produção e desperdícios.

Embora o propósito da MA não seja a fabricação repetitiva de um mesmo componente, um cronograma foi utilizado para estimar uma capacidade mensal de produção. Essa capacidade, como foi dito anteriormente, servirá para rateio dos custos indiretos, estimar o custo unitário de produção e estimar o preço unitário de venda.

Não é trivial estimar a capacidade produtiva em sistemas de produção sob encomenda. Primeiro, como já foi dito, dificilmente irá se fabricar o mesmo produto o mês inteiro. Segundo, não existe uma linha de produção sincronizada onde tem-se um trabalhador responsável para cada tarefa, pois para cada demanda existe um fluxo exclusivo de atividades.

Para este trabalho a capacidade de produção foi estimada em função do tempo que levaria para a qualificação do procedimento e para a deposição do componente, pois ambas as atividades demandam a mesma máquina de deposição e um engenheiro. Ou seja, a capacidade foi estimada baseado em uma operação normal da empresa em função de uma única máquina

de *GMA-DED* (saturação do equipamento). As duas atividades somam 21,13 horas de trabalho (~3 dias corridos) e, se considerarmos 21 dias úteis no mês, tem-se 6,8 flanges por mês. Arredondando, seria possível fabricar 7 flanges por mês (seguindo o cronograma da Figura 4.45).

4.4.4 Cálculo do custo unitário

Os custos do departamento de administração (único departamento de serviço) serão transferidos para os departamentos produtivos (demais departamentos) por meio da alocação indireta. O rateio será proporcional ao custo da alocação direta de cada departamento. A Tabela 4.20 mostra os custos de cada departamento em função dos recursos utilizados. A Tabela 4.23 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados (continuação)

Departamento Furação			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	1,74	R\$ 78,13
Furadeira	Consumo kWh	2,20	R\$ 2,48
HM da Furadeira	R\$/h	R\$ 0,51	R\$ 0,89
Aluguel	m ²	5,76	R\$ 13,71
		SOMA	R\$ 95,22
	Alocação indireta		Valor
	Administração	1,5%	R\$ 9,08
		TOTAL	R\$ 104,30
Departamento Tratamento térmico			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	4,00	R\$ 180,00
Forno	Consumo kWh	39,00	R\$ 101,40
HM do Forno	R\$/h	R\$ 3,60	R\$ 14,38
Aluguel	m ²	24,00	R\$ 57,14
		SOMA	R\$ 352,93
	Alocação indireta		Valor
	Administração	5,5%	R\$ 33,64
		TOTAL	R\$ 386,56
Departamento de Inspeção final			
Recursos	Alocação direta		Valor
Inspeção	ver tabela 4.14	--	R\$ 405,00
		SOMA	R\$ 405,00
	Alocação indireta		Valor
	Administração	8,3%	R\$ 50,99
		TOTAL	R\$ 585,99

Tabela 4.24 mostra um resumo da Tabela 4.20 que está representada em forma de gráfico de barras na Figura 4.46.

Tabela 4.20 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados

Departamento de Administração			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Secretário	horas trabalhadas	160,00	R\$ 3.040,00
Computador da administração	Consumo kWh	0,30	R\$ 31,20
HM - computador	R\$/h	R\$ 0,49	R\$ 78,36
Aluguel	m ²	69,79	R\$ 1.163,17
		TOTAL Mensal	R\$ 5.312,72
		Capacidade mensal	7
		TOTAL unitário	R\$ 616,10
Departamento de Modelagem 3D e definição do produto			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Engenheiro	horas trabalhadas	8,00	R\$ 720,00
Computador para programação	Consumo kWh	0,50	R\$ 2,60
HM - computador	R\$/h	R\$ 0,68	R\$ 5,42
Aluguel	m ²	7,50	R\$ 17,86
		SOMA	R\$ 745,88
Alocação indireta			Valor
	Administração	11,5%	R\$ 71,09
		TOTAL	R\$ 816,97

Tabela 4.21 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados (continuação)

Departamento de Qualificação de procedimento			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Engenheiro	horas trabalhadas	2,00	R\$ 180,00
HH Técnico	horas trabalhadas	8,00	R\$ 360,00
Arame	kg utilizados	8,00	R\$ 224,00
Gás	m ³ utilizados	2,31	R\$ 69,25
Fonte deposição	Consumo kWh	9,00	R\$ 16,08
HM - fonte deposição	R\$/h	R\$ 17,12	R\$ 34,25
Braço robótico	Consumo kWh	10,00	R\$ 17,86
HM - braço robótico	R\$/h	R\$ 25,68	R\$ 51,37
Usinagem dos CPs	5 Cps	R\$ 500,00	R\$ 500,00
Inspeções	ver tabela 4.14	--	R\$ 1.554,00
Aluguel	m ²	19,50	R\$ 46,43
		SOMA	R\$ 3.053,24
	Alocação indireta		Valor
	Administração	47,2%	R\$ 290,99
		TOTAL	R\$ 3.344,23
Departamento de Preparação do substrato			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	4,00	R\$ 180,00
Chapa de Substrato	kg (igual da pré-forma)	9,13	R\$ 127,76
Serra	Consumo kWh	2,20	R\$ 5,72
HM da Serra	R\$/h	R\$ 0,68	R\$ 2,74
Aluguel	m ²	7,00	R\$ 16,67
		SOMA	R\$ 332,89
	Alocação indireta		Valor
	Administração	5,1%	R\$ 31,73
		TOTAL	R\$ 364,62

Tabela 4.22 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados (continuação)

Departamento de Deposição			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Engenheiro	horas trabalhadas	2,00	R\$ 180,00
HH Técnico	horas trabalhadas	5,13	R\$ 231,07
Arame	kg utilizados	9,13	R\$ 255,53
Gás	m ³ utilizados	2,63	R\$ 79,00
Fonte deposição	Consumo kWh	9,00	R\$ 18,34
HM - fonte deposição	R\$/h	R\$ 17,12	R\$ 34,25
Braço robótico	Consumo kWh	10,00	R\$ 20,38
HM - braço robótico	R\$/h	R\$ 25,68	R\$ 51,37
Aluguel	m ²	19,50	R\$ 46,43
		SOMA	R\$ 916,36
Alocação indireta			Valor
	Administração	14,2%	R\$ 87,33
		TOTAL	R\$ 1.003,69
Departamento de remoção do substrato			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	1,35	R\$ 60,76
Serra	Consumo kWh	2,20	R\$ 1,93
HM da Serra	R\$/h	R\$ 0,68	R\$ 0,92
Aluguel	m ²	7,00	R\$ 16,67
		SOMA	R\$ 80,28
Alocação indireta			Valor
	Administração	1,2%	R\$ 7,65
		TOTAL	R\$ 87,93
Departamento Torneamento			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	6,62	R\$ 297,72
Torno	Consumo kWh	5,70	R\$ 24,51
HM da Torno	R\$/h	R\$ 1,20	R\$ 7,93
Aluguel	m ²	9,45	R\$ 22,50
		SOMA	R\$ 352,66
Alocação indireta			Valor
	Administração	5,5%	R\$ 33,61
		TOTAL	R\$ 386,27

Tabela 4.23 – Custos dos departamentos em função dos recursos utilizados (continuação)

Departamento Furação			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	1,74	R\$ 78,13
Furadeira	Consumo kWh	2,20	R\$ 2,48
HM da Furadeira	R\$/h	R\$ 0,51	R\$ 0,89
Aluguel	m ²	5,76	R\$ 13,71
		SOMA	R\$ 95,22
Alocação indireta			Valor
	Administração	1,5%	R\$ 9,08
		TOTAL	R\$ 104,30
Departamento Tratamento térmico			
Recursos	Alocação direta		Valor
HH Técnico	horas trabalhadas	4,00	R\$ 180,00
Forno	Consumo kWh	39,00	R\$ 101,40
HM do Forno	R\$/h	R\$ 3,60	R\$ 14,38
Aluguel	m ²	24,00	R\$ 57,14
		SOMA	R\$ 352,93
Alocação indireta			Valor
	Administração	5,5%	R\$ 33,64
		TOTAL	R\$ 386,56
Departamento de Inspeção final			
Recursos	Alocação direta		Valor
Inspeção	ver tabela 4.14	--	R\$ 405,00
		SOMA	R\$ 405,00
Alocação indireta			Valor
	Administração	8,3%	R\$ 50,99
		TOTAL	R\$ 585,99

Tabela 4.24 – Resumo da Tabela 4.20 com custos do departamento em função dos recursos utilizados [R\$]

DEPARTAMENTOS PRODUTIVOS ↓	RECURSOS							TOTAL por DEPARTAMENTO ↓
	MDO Direta	Matéria-prima	Máquinas	Energia	Aluguel	Inspeção	Adm.	
Modelagem 3D e definição do produto	720,00		2,60	2,60	17,86		71,09	814,14
Qualificação do procedimento	540,00	293,25	85,62	33,94	46,43	1.554,00	290,99	2.844,23
Preparação do Substrato	180,00	127,76	2,74	5,72	16,67		31,73	364,62
Deposição via MADA	411,07	334,53	85,62	38,72	46,43		87,33	1.003,69
Remoção da pré-forma do Substrato	60,76		0,92	1,93	16,67		7,65	87,93
Torneamento da pré-forma	297,72		7,93	24,51	22,50		33,61	386,27
Furação da pré-forma	78,13		0,89	2,48	13,71		9,08	104,30
Tratamento Térmico do flange	180,00		14,38	101,40	57,14		33,64	386,56
Inspeção final						535,00	50,99	585,99
TOTAL por recurso →	2.467,68	755,54	200,70	211,30	237,40	2.089,00	616,10	6.577,73¹

¹ - Custo total unitário do flange, considerando uma capacidade mensal de 7 flanges

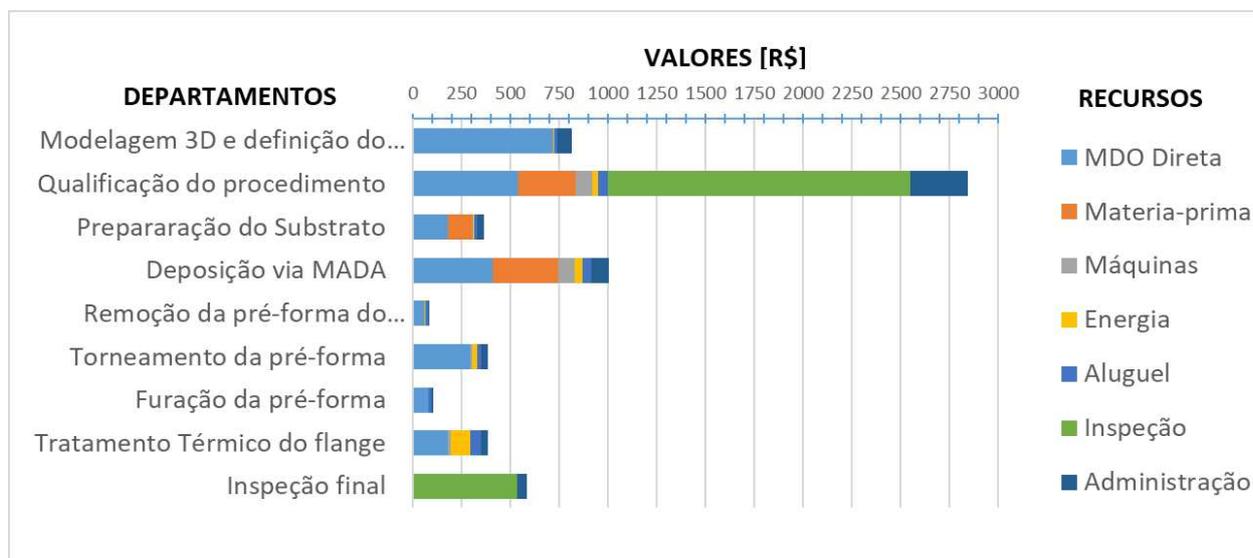


Figura 4.46 - Custo unitário do flange em função dos departamentos e recursos

O gráfico de barras da Figura 4.46, mostra a composição do custo unitário em cada departamento com sua respectiva parcela dos recursos utilizados. Temos que o maior custo está no departamento de “qualificação de procedimento” (R\$ 2.844,23 - 43,2%) com a utilização principalmente dos recursos de inspeção, MDO e matéria-prima que foram necessários para atender requisitos da *AWS D20.1*.

O segundo departamento mais custoso é o de “deposição via *GMA-DED*” (R\$ 1.003,69 - 15,3%) destacando o maior uso da mão de obra (supervisório de máquina) e matéria prima.

Em terceiro lugar tem-se os custos com o departamento de “modelagem 3D e definição do produto” (R\$ 814,14 - 12,4%) com peso significativo da mão de obra, que está ligado ao tempo que se levaria para a modelagem 3D e obter todas as definições da peça. Os custos e o tempo com este departamento podem ser drasticamente reduzidos se o componente fosse registrado e digitalizado (*CAD 3D*).

Em quarto lugar tem-se os custos com o departamento de “inspeção final” (R\$ 585,99 - 8,9%) que neste trabalho foi considerado um serviço terceirizado. Mais uma vez, a grande exigência das normas impôs um custo significativo com inspeção. Uma redução nos custos deste departamento poderá ocorrer com a redução da carga de ensaios exigidos pelas normas, entretanto o custo com este departamento é predominante das produções por encomenda.

Os demais custos são do departamento de “tratamento térmico” (R\$ 386,56 - 5,9 %), “torneamento” (R\$ 386,27 - 5,9 %), “preparação do substrato” (R\$ 364,62 - 5,5 %), “furação da pré-forma” (R\$ 104,30 - 1,6 %) e “remoção da pré-forma do substrato” (R\$ 87,93 - 1,3 %), que juntos somam 19 % e são diretamente ligados às atividades de prés e pós-processamento e fazem o uso principalmente da mão de obra.

Se considerarmos esses 19 % dos prés e pós processamento um único departamento, seria o segundo departamento mais custoso, resultado que corrobora o que fora encontrado por Lindemann *et al.* (2012) que foi um dos primeiros a integrar os custos de pós-processamento e considerou o pós-processamento o terceiro estimador de custo mais significativo.

Pode-se concluir que, há potenciais para redução de custo que estão no departamento de “qualificação do procedimento e modelagem 3D”, pois, à medida que a tecnologia se torna mais confiável e mais abrangente, menores serão as necessidades de ensaios e os estoques serão mais digitais.

Difícilmente ocorrerá uma redução de custo no departamento de deposição pois quase todos os custos desse departamento estão no recurso de matéria-prima, que dificilmente terá redução de custos de fabricação devido à alta maturidade do processo de fabricação dos arames. Talvez a redução possa vir da mão de obra desse departamento à medida que a tecnologia se torna mais autônoma.

O gráfico de pizza da Figura 4.47 mostra uma segunda análise que é a parcela de cada recurso que compõe o custo unitário do flange.

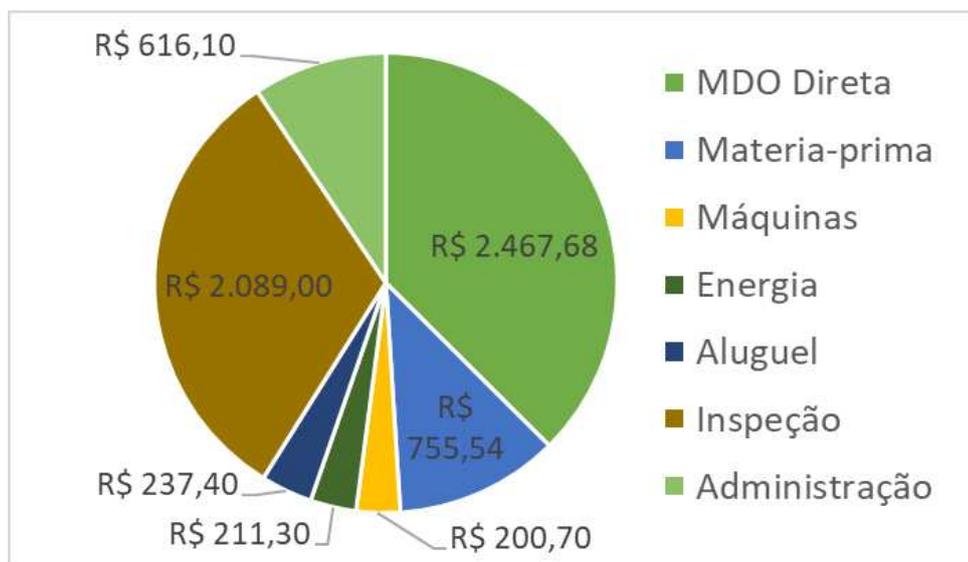


Figura 4.47 – Participação de cada recurso na composição do custo unitário do flange

Os quatro maiores recursos utilizados, conforme o gráfico da Figura 4.47, foram com MDO direta (R\$ 2.467,68 - 37,5 %), inspeção (R\$ 2.089,00 - 31,8 %), matéria-prima (R\$ 755,54 - 11,5 %) e administração (R\$ 616,10 - 9,4 %). Fato que corrobora os resultados de Berti (2006) que afirma que na produção sob encomenda há maiores custos para o controle de cada ordem, tendo gastos maiores com pessoas e recursos financeiros; dependência de uma equipe de planejamento de qualidade para elaboração de orçamentos antes ao encerramento da venda, obtendo-se gastos maiores na formação e manutenção da equipe; necessidade de uma equipe técnica preparada de manutenção e preparo dos equipamentos, pois para cada ordem de produção, que possui modelos de produtos diferentes, carece de uma preparação de qualidade das máquinas.

A matéria-prima corresponde a 11,5 % dos custos de produção e é o terceiro maior recurso utilizado. Portanto, o produto se torna de alto valor agregado não devido ao alto valor da matéria prima e sim devido ao custo de transformação (soma de todos os custos, exceto a matéria-prima).

Os recursos de energia, maquinário e aluguel correspondem a uma pequena fatia do custo, fato inverso ao que acontece nos processos de MA a laser, onde os custos de máquina a laser são elevadíssimos, conforme afirmaram Lindemann *et al.* (2012) e Schröder *et al.* (2017) para o processo L-PBF. Esse fato está certamente ligado à maior maturidade dos equipamentos de soldagem (de onde deriva a MADA) e à necessidade de sistemas de movimentação menos precisos, tornam o maquinário da tecnologia GMA-DED de menor custo.

4.4.5 Precificação baseada nos custos

4.4.5.1 A primeira unidade

Na seção anterior, pelo método de custeio por absorção pleno, foi encontrado um custo unitário de R\$ 6.577,73 numa produção mensal de 7 peças. Entretanto este custo foi definido considerando que cada peça possui sua qualificação (como se as peças fossem ligeiramente diferente e necessitassem uma qualificação para cada uma delas), e deste modo o custo com qualificação de cada peça recai totalmente sobre aquela única unidade.

Finalmente foi feito o cálculo do *markup* para estimar um preço de venda que possa cobrir os custos de produção, pagar comissões, imposto e ter um a margem de lucro. A Tabela 4.25 mostra o cálculo do *markup*, preço de venda ($\text{custo} / (1 - \text{markup})$), lucro líquido, lucro unitário, lucro líquido mensal (considerando a produção de 7 flanges mensais), lucro líquido em 5 anos e retorno sobre investimento (ROI) para a primeira peça.

Com um ROI de ~100 % em cinco anos significa que, se todo o lucro fosse guardado nesses 5 anos seria possível recuperar 119 % do investimento feito. Foi estimado um preço de venda de 10 vezes mais caro que o convencional na atual maturidade tecnológica.

Tabela 4.25 – Tabela de precificação do flange baseada nos custo de uma única peça

Comissões	3,00%
Impostos	18,00%
Margem de Lucro	25,00%
Markup (soma)	46,00%
Custo de produção	R\$ 6.577,73
Preço de venda Via MADA	R\$ 12.180,99
lucro líquido unitário	R\$ 3.045,25
Produção mensal	7
lucro liquido mensal	R\$ 21.316,73
Lucro liquido em 5 anos	R\$ 1.279.003,82
Investimento	R\$ 1.071.500,00
ROI (5 anos)	119,37%
Flange convencional	R\$ 1.207,32

¹ - Preço de venda = $(\text{Custo de produção} / (1 - \text{Markup}))$

² - ROI (5 anos) = $(\text{Lucro líquido em 5 anos} / \text{Investimento})$

³ - Preço baseado no portal transparência da Petrobras para um flange de pescoço, F22, 10", classe 300, valor unitário é de R\$ 6.0036,59, dividindo por 5 para estimar o custo do 2", tem-se R\$ 1.207,32. <https://transparencia.petrobras.com.br/despesas/aquisicao-de-bens> (domínio público).

⁴ - Relatos da Petrobras. A aquisição de determinados itens, devido a especificidade do material e da geometria, podem levar vários meses.

4.4.5.2 A segunda unidade ou pequenos lotes

A partir da segunda unidade, os custos com qualificação da primeira peça podem ser rateados em função das demais unidades fabricadas. A Figura 4.48 mostra a queda dos custos de produção em função das unidades produzidas devido ao rateio dos custos com qualificação (R\$ 2.844,23), e a partir da 10ª unidade o custo é de R\$ 3.463,44 (redução de 47 % em comparação com a primeira peça).

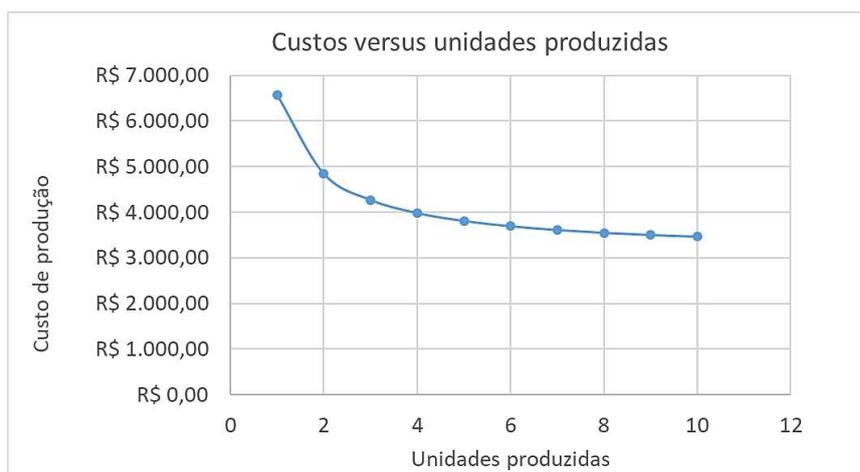


Figura 4.48 – Custo versus unidades produzidas

A Tabela 4.26 mostra o cálculo do *markup* e do preço de venda ($\text{custo}/(1-\text{markup})$). Neste caso, foi estimado um preço de venda de 5 vezes mais caro que o convencional, considerando uma maturidade tecnológica mais avançada, isto é, com uma peça já qualificada.

Baumers *et al.* (2006) propõe a utilização máxima da placa de construção para reduzir o efeito dos custos indiretos sobre o número de peças (amortização). Entretanto essa abordagem é típica da produção por lotes ou contínua. Para peças muito específicas, aonde a probabilidade de vender duas ou mais unidades iguais são remotas, deve-se considerar que todo o custo com qualificação recairá sempre sobre uma única unidade.

Tabela 4.26 - Tabela de precificação do flange baseada nos custos da 10ª peça

Comissões	3,00%
Impostos	18,00%
Margem de Lucro	25,00%
Markup (soma)	46,00%
Custo de produção	R\$ 3.463,44
Preço de venda Via MADA	R\$ 6.413,77
Flange convencional	R\$ 1.207,32

Conforme citado por Correia (2003), na grande maioria dos casos, a qualidade é uma composição de várias propriedades baseadas em normas, frequentemente interrelacionadas e quase sempre medidas em diferentes unidades. Para este trabalho, a qualidade do flange foi atestada quando se atingiu os requisitos exigidos pelas normas de fabricação para o setor de O&G, e para isto foi necessária uma determinada quantidade de recursos (tempo, dinheiro, metro, kg etc.). O mesmo flange poderia ter sua qualidade atestada com mais ou menos recursos para setores mais ou menos exigentes.

Sabendo que o flange de pescoço é uma peça de prateleira, haverá neste caso uma concorrência entre a peça fabricada via *GMA-DED* e a convencional forjada. Num cenário de emergência, sabendo que ambas as peças possuem qualidade próximas, a decisão de qual peça a ser adquirida será uma função do preço, prazo de entrega e lucro cessante.

Já num cenário de reposição de peça de baixa movimentação, tradicionalmente existem três situações prováveis de acontecer. A primeira situação é quando o flange solicitado existe no estoque e é rapidamente colocado em operação sem problemas. A segunda situação é quando o flange solicitado não existe em estoque, podendo causar prejuízos à operação e demandar longos prazos de entrega. A terceira situação é quando não existe demanda por aquele flange e existe o flange em estoque, causando desperdício de material e de gestão.

Com a possibilidade de fabricar rapidamente o flange via *GMA-DED*, na ocorrência da segunda situação, podemos tomar a decisão de arcar com o prejuízo operacional e esperar o flange convencional mais barato ou pagar mais caro pelo flange *GMA-DED* em menor tempo e reduzir o prejuízo operacional. Além disso na ocorrência da terceira situação, os flanges desperdiçados podem se tornar virtuais, evitando assim um novo desperdício.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

No que diz respeito às normas:

- ✓ No melhor cenário, qualquer peça fabricada por *GMA-DED* seguindo os requisitos da *AWS D20.1:2019* necessitará ao menos de uma qualificação de procedimento e inspeção final. Essas desvantagens, além de serem um requisito, são inerentes à produção sob encomenda, haja vista que nas produções em lotes, por meios da estatística e amostragem é possível atestar qualidade do lote de maneira bem menos onerosa.
- ✓ O trabalho propôs uma metodologia específica para a fabricação de flanges de pescoço, entretanto dentro do escopo da *ASME B16.5* existem mais de 1.400 dimensões diferentes para os flanges de pescoço soldável que variam entre 500 g e 650 kg. Diante disso, essa metodologia pode ser útil para a impressão de diversos tamanhos, vislumbrando uma redução dos gastos com PD&I.
- ✓ Perante a *ASTM 182*, a única condição neste trabalho que ficou fora do requisito foi o silício na composição química.

No que diz respeito à metodologia de fabricação:

- ✓ Embora o processo *GMA-DED* permita fabricar peças com as mais variadas geometrias, o conhecimento necessário acerca de normas, materiais, trajetórias e requisitos de qualidade restringe o fabricante a atender um determinado setor da indústria. Por exemplo, foi necessário muito tempo de pesquisa para desenvolver um procedimento padrão de deposição de flanges de pescoço que atenda todos os requisitos do setor de O&G, e isso acarreta numa base de conhecimento (*Know-how*) voltado para o setor de O&G.

- ✓ O planejamento da trajetória é uma etapa complexa e que requer conhecimentos prévios de MA;
- ✓ O RAQI é uma técnica de gerenciamento térmico que auxilia a fabricação, e neste trabalho teve o foco na redução do tempo de fabricação, e ficou comprovado que é possível obter reduções significativas no tempo de fabricação.
- ✓ Embora não foram realizadas todas as inspeções exigidas para o componente, foi possível fabricar rapidamente um flange de pescoço, com um tempo de deposição de 3 h e 23 min, o que demonstra o potencial de se substituir os estoques físicos dos sobressalentes de baixa demanda e peças emergenciais por peças virtuais;
- ✓ Nas diversas condições testadas (2 processos, 2 sistemas de movimentação, com e sem RAQI e 3 trajetórias) foi possível depositar com sucesso uma pré-forma muito próxima de um flange de pescoço. Entretanto destaca-se a possibilidade melhorar a relação entre o peso de material depositado e o peso útil da peça.

No que diz respeito ao material depositado:

- ✓ Foi constatada a anisotropia microestrutural e de microdureza do material depositado;
- ✓ Somente com tratamento térmico de revenimento não foi possível alcançar as propriedades mecânicas exigidas pelas normas aplicáveis, embora bons resultados tenham sido obtidos;
- ✓ Seguindo os procedimentos adotados nesse trabalho, até o momento as propriedades mecânicas do flange são alcançáveis quando se faz o tratamento térmico de normalização seguido de revenimento, no caso com os mesmos parâmetros exigidos pela norma utilizada para flanges forjados;
- ✓ Os flanges fabricados por *GMA-DED* obtiveram boa resposta ao tratamento térmico de normalização e revenimento, isto é, atingiu-se o objetivo de qualidade da peça sem distorções e trincas;
- ✓ Não foi constatada a anisotropia microestrutural e de microdureza do material após o tratamento térmico de normalização seguido de revenimento;
- ✓ A composição química do componente pode estar dentro das faixas exigidas se houver um ajuste fino na composição química do arame, e isso torna-se possível à medida que arames mais adequados para tal finalidade sejam desenvolvidos;

No que diz respeito aos custos e à qualidade:

- ✓ O flange depositado via *GMA-DED*, provavelmente não possui as mesmas propriedades que um flange forjado, mas possui qualidade suficiente para ser utilizado em serviço. O preço estimado pela fabricação via *GMA-DED* ficou entre 5 e 10 vezes mais caro que um feito de forma convencional, entretanto, a depender do cenário, a reposição deste componente pode ser 50 vezes mais rápida pela rota da MA;
- ✓ O maior custo de fabricação por MADA está no departamento de “qualificação de procedimento” (43,2 %), seguido do departamento de “deposição via *GMA-DED*” (15,3 %). Os três maiores recursos utilizados, foram a MDO direta (37,5 %), inspeção (31,8 %), matéria prima (11,5 %) administração (9,4 %). Esses resultados caracterizam um caso típico de produção sob encomenda.

TRABALHOS FUTUROS

- Existe uma relação da tensão e corrente com a geometria final da peça, neste sentido a aquisição da tensão e corrente, e de outros parâmetros como velocidade de alimentação, vazão de gás, diâmetro do eletrodo etc., pode auxiliar no mapeamento das possíveis discontinuidades e defeitos, facilitando a inspeção pontual, um assunto promissor ainda pouco abordado.
- O RAQI, além de reduzir o tempo de fabricação, tem potencial para modificar características metalúrgicas e acabamento superficial. Para isso, são necessários novos estudos que visam esses objetivos. Um potencial risco do RAQI, ainda pouco explorado, são os vapores do fluido refrigerante que circulam em torno do arco elétrico.
- Mapear a anisotropia das propriedades mecânicas ao longo da secção do flange através de ensaio por indentação instrumentada;
- Detalhar os custos dos pós processamentos, como usinagem e métodos híbridos como, MA com manufatura subtrativa;
- Avaliar arames especiais para fins de MADA com a finalidade de reduzir o silício, formação de escória e melhorar a estabilidade do arco;
- Avaliar a adição de oxigênio ao gás de proteção para a redução do silício no metal depositado;
- Determinar a resistência ou vida das pré-formas feitas via MADA quanto à fadiga, especialmente para comparar com desempenho de peças forjadas;
- Avaliar a soldabilidade das pré-formas feitas via MADA visando etapas de união posterior como rota alternativa e combinada para obtenção de peças.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A HOSSEINI, Vahid; HÖGSTRÖM, Mats; HURTIG, Kjell; VALIENTE BERMEJO, Maria Asuncion; STRIDH, Lars Erik; KARLSSON, Leif. Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: thermal cycle analysis and microstructure characterization. *Welding in the World*, [S. l.], v. 63, n. 4, p. 975–987, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00735-y>
- ACHARYA, S.; ZHANG, Y.; YANG, J. Design and process optimization for additive manufacturing in oil and gas industry. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2020. <https://doi.org/10.4043/30679-MS>
- AKBARI, Meysam; KOVACEVIC, Radovan. An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system. *Additive Manufacturing*, [S. l.], v. 23, n. July, p. 487–497, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.031>
- ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J. da; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura Aditiva: O Papel da Soldagem nesta Janela de Oportunidade. *Soldagem e Inspeção*. São Paulo, v.19, n.2, p.190-198, jun. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>
- ALI, Y.; HENCKELL, P.; HILDEBRAND, J.; REIMANN, J.; BERGMANN, J. P. Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process. *Journal of Materials Processing Tech.*, [S. l.], v. 269, n. July 2018, p. 109–116, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API 20S: Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries*. Massachusetts, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A182: Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service*. USA, 2020.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. USA, 2019.
- AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS. *ASME B15.6: Pipe Flanges and Flanged Fittings - NPS 1/2 Through NPS 24 Metric/Inch Standard*. USA, 2017.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. *AWS D20.1/D20.1M: Specification for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing*. Miami: AWS, 2019.
- AMPOWER, 2019. Technology overview metal Additive Manufacturing. Disponível em: <https://ampower.de/en/insights/metal-additive-manufacturing/>. Acessado em 14/08/2020;
- APICS Dictionary. Fifteenth ed. Chicago: APICS, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura Aditiva - Princípios Gerais - Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BACCHETTI, Andrea; SACCANI, Nicola. Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, [S. l.], v. 40, n. 6, p. 722–737, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.06.008>
- BAMBACH, Markus; SIZOVA, Irina; SILZE, Frank; SCHNICK, Michael. Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder, hot and cold wire. *Procedia CIRP*, [S. l.], v. 74, p. 206–209, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.06.008>
- BARNES, J. B.; CAMISA, J. A. Additive manufacturing for oil and gas – Potential of topology optimization for offshore applications. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE 2019, Anais [...]. : International Society of Offshore and Polar Engineers, 2019. p. 4135–4141.
- BERTI, Anélio. *Contabilidade e Análise de Custos*. 1.a Edição ed. Curitiba: Juruá, 2006.
- BHIMANI, Alnoor; HORNGREN, Charles T.; DATAR, Srikant M.; RAJAN, Madhav V. *Management & Cost Accounting*. Seventh Ed ed. New York: Person, 2018.
- BURNS, M.; WANGENHEIM, C. Metal 3D printing applications in the oil & gas industry. In: SPE MIDDLE EAST OIL AND GAS SHOW AND CONFERENCE, MEOS, PROCEEDINGS 2019, Anais [...]. : Society of Petroleum Engineers (SPE), 2019. DOI: [10.2118/194787-ms](https://doi.org/10.2118/194787-ms).
- CAMISA, J. A.; VERMA, V.; MARLER, D. O.; MADLINGER, A. Additive manufacturing and 3D printing for oil and gas - Transformative potential and technology constraints. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE 2014, Anais [...]. : International Society of Offshore and Polar Engineers, 2014. p. 299–306.

- CARDOZO, Eloisa Pereira; RÍOS, Sergio; GANGULY, Supriyo; D'OLIVEIRA, Ana Sofia C. M. Correction to: Assessment of the effect of different forms of Inconel 625 alloy feedstock in Plasma Transferred Arc (PTA) additive manufacturing (The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2018), 98, 5-8, (1695-1705), 10.1007/s00170-. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S. l.], v. 98, n. 5–8, p. 1707, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2394-y>
- CHANDRASEKARAN, S.; HARI, S.; AMIRTHALINGAM, M. Wire arc additive manufacturing of functionally graded material for marine risers. Materials Science and Engineering A, [S. l.], v. 792, 2020. [DOI: 10.1016/j.msea.2020.139530](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530).
- CHEW, Y. X.; ANG, J. H.; SASTRY, K. Y.; XU, D. Q.; KUIK, S.; BI, G. J. Feasibility study on fabrication of large-scale offshore structural steel component using laam technology. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING - OMAE 2020, Anais [...]. : American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2020. [DOI: 10.1115/OMAE2020-18266](https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18266).
- COLPAERT, Hubertus. Metallography of steels: interpretation of structure and the effects of processing. 1a edição ed. [s.l.] : A S M International, 2018. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.msisep.9781627082594>
- CONG, B.; DING, J.; WILLIAMS, S.W. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 76, 1593–1606. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6346-x>
- CONG, B.; QI, Z.; QI, B.; SUN, H.; ZHAO, G.; DING, J. A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. Appl Sci 2017; 7: 275. <https://doi.org/10.3390/app7030275>
- CUNNINGHAM, C. R.; FLYNN, J. M.; SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. Additive Manufacturing, [S. l.], v. 22, n. June, p. 672–686, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- CUNNINGHAM, C. R.; WIKSHÅLAND, S.; XU, F.; KEMAKOLAM, N.; SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Cost Modelling and Sensitivity Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing. Procedia Manufacturing, [S. l.], v. 11, n. June 2017, p. 650–657, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.163>
- DAHAT, Shubham; HURTIG, Kjell; ANDERSSON, Joel; SCOTTI, Americo. A Methodology to Parameterize Wire + Arc Additive Manufacturing: A Case Study for Wall Quality Analysis.

- Journal of Manufacturing and Materials Processing, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>
- DALAEI, Mohammad Taghi; GLOOR, Lars; LEINENBACH, Christian; WEGENER, Konrad. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD). Surface and Coatings Technology, [S. l.], v. 384, n. November 2019, p. 125275, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>
- DASS, Adrita; MORIDI, Atieh. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. Coatings, [S. l.], v. 9, n. 7, p. 1–26, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>
- DAVI SAMPAIO CORREIA. Seleção de Processo de Soldagem Utilizando uma Metodologia Baseada nos Custos da Não Qualidade. 2003. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- DE BERNARDI, C. Additive manufacturing in the oil & gas industry overview. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING - OMAE 2020, Anais [...]. : American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2020. <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-19271>
- DEBROY, T. *et al.* Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Progress in Materials Science, [S. l.], v. 92, p. 112–224, 2018. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010014>
- DEJA, M.; SIEMIATKOWSKI, M. S.; ZIELINSKI, D. Multi-criteria comparative analysis of the use of subtractive and additive technologies in the manufacturing of offshore machinery components. Polish Maritime Research, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 71–81, 2020. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0048>
- DENG, G.; KENDALL, A.; WAKEFIELD, J. The ultra-expansion completion packer integrated with additive manufacturing technology. In: PROCEEDINGS - SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION 2018, Anais [...]. : Society of Petroleum Engineers (SPE), 2018. <https://doi.org/10.2118/191734-MS>
- DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. A tool-path generation strategy for WAAM_Wollongong_2014. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S. l.], v. 73, p. 173–183, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5>

- DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], v. 81, n. 1–4, p. 465–481, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- FONTOURA, Fernando Batista Bandeira Da. *Gestão De Custos: Uma Visão Integradora E Prática Dos Métodos De Custeio*. 1a edição ed. São Paulo: Atlas, 2013.
- FRANCO, Hilário. *Contabilidade Geral*. 23a edição ed. São Paulo: Atlas, 1997.
- GARCIA, Douglas Neves. *Comportamentos Mecânico E Metalúrgico De Junta Soldada Em Aço Astm a182 F22 Aplicado Na Indústria Offshore De Junta Soldada Em Aço Astm a182 F22*. 2018. Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2018.
- GHAFFARI, Mahya; VAHEDI NEMANI, Alireza; RAFIEAZAD, Mehran; NASIRI, Ali. Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive-Manufactured Low-Carbon Low-Alloy Steel Part. *Jom*, [S. l.], v. 71, n. 11, p. 4215–4224, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5>
- GLADKIKH, M.; MINHAS, N.; FOLKS, G.; ALADAWY, A. Additive manufacturing for aftermarket business-utilizing process speed to meet demand with minimal inventory levels. In: *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020, Anais [...]*. : Offshore Technology Conference, 2020. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:218918954>
- GUAJARDO, Mario; RÖNNQVIST, Mikael; HALVORSEN, Ann Mari; KALLEVIK, Svein Inge. Inventory management of spare parts in an energy company. *Journal of the Operational Research Society*, [S. l.], v. 66, n. 2, p. 331–341, 2015. <https://doi.org/10.1057/jors.2014.8>
- HAIBIN GENG, JINGLONG LI, JIANGTAO XIONG, XIN LIN, DAN HUANG, Fusheng Zhang. Formation and improvement of surface waviness for additive manufacturing 5A06 aluminium alloy component with GTAW system. *Rapid Prototyping Journal*, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 342–350, 2018. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0064>
- HENCKELL, P.; GÜNTHER, K.; ALI, Y.; BERGMANN, J.P.; SCHOLZ, J.; FORÊT, P. The influence of gas cooling in context of wire arc additive manufacturing - a novel strategy of affecting grain structure and size. *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51493-2_15;
- HÖNNIGE, Jan Roman; WILLIAMS, Stewart; ROY, Matthew J. Residual Stress Characterization and Control in the Additive Manufacture of Large Scale Metal Structures. *Residual Stresses 2016*, [S. l.], v. 2, n. July, p. 455–460, 2017. <https://doi.org/10.1057/jors.2014.8>

- HOPKINSON, N.; DICKENS, P. Analysis of rapid manufacturing - Using layer manufacturing processes for production. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, [S. l.], v. 217, n. 1, p. 31–40, 2003. <https://doi.org/10.1243/095440603762554596>
- HORNGREN, Charles T.; FOSTER, George; DATAR, Srikant M. Contabilidade de Custos. 9a edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES, 2020. Disponível em: <http://www.hybridmanutech.com/resources.html>. Acessado em 05/09/2021;
- IUDÍCIBUS, SÉRGIO DE; MARION, JOSÉ CARLOS. CURSO DE CONTABILIDADE PARA NÃO CONTADORES. 5. ed. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- IVÁNTABERNEIRO; PASKUAL, Amagoia; ÁLVAREZ, Pedro; SUÁREZ, Alfredo. Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing. Procedia CIRP, [S. l.], v. 68, n. April, p. 358–362, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.095>
- JING, W.; WANG, J.; TAN, X.; LIU, E.; TOR, S. Mechanical properties and fracture analysis of additively manufactured EH 36 steel parts by laser engineered net shaping process. In: (Tan M. J. Liu E. Tor S. B. Chua C.K. Yeong W.Y., Org.)PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROGRESS IN ADDITIVE MANUFACTURING 2018, Anais [...]. : Pro-AM, 2018. p. 498–504. <https://doi.org/10.25341/D4DK58>
- JUHASZ, M.; TIEDEMANN, R.; DUMSTORFF, G.; CONNER, B.; LANG, W.; MACDONALD, E. Hybrid directed energy deposition for fabricating metal structures with embedded sensors for the oil and gas industry. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2020.
- KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. Int J Adv Manuf Technol, 67:655–674, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5>
- KANDUKURI, S. Y.; GALLO, B. L. Certification pathway for 3d printed parts-unlocking the barriers to accelerate the adoption of additive manufacturing in offshore industry. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2020. <https://doi.org/10.4043/30671-MS>
- KANNAN, A. R.; SHANMUGAM, N. S.; RAMKUMAR, K. D.; RAJKUMAR, V. Studies on Super Duplex Stainless Steel Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing.

- Transactions of the Indian Institute of Metals, [S. l.], v. 74, n. 7, p. 1673–1681, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02257-y>
- KARUNAKARAN, K. P.; BERNARD, Alain; SURYAKUMAR, S.; DEMBINSKI, Lucas; TAILLANDIER, Georges. Rapid manufacturing of metallic objects. Rapid Prototyping Journal, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 264–280, 2012. <https://doi.org/10.1108/13552541211231644>
- KELLY, Anthony. Maintenance Systems and Documentation. First Edit ed. Burlington: Elsevier Ltd, 2006.
- KNEZOVIC, N.; TOPIC, A.; GARAŠIĆ, I.; JURIC, I. Application of wire and arc additive manufacturing for fabrication of duplex stainless steel product. In: (Katalinic B., Org.)ANNALS OF DAAAM AND PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM 2019, Anais [...]. : Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2019. p. 599–604. [10.2507/30th.daaam.proceedings.081](https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.081)
- KOU, Sindo. Welding Metallurgy. 2nd. ed. New Jersey: Wiley, 2002. <https://doi.org/10.1002/0471434027>
- KOVACS W., I. I. I.; MOHR, B.; BURKARDT, N.; CAO, L.; BERG, Z. Rapid screening of additive manufactured specimens for sour testing: Orientation and surface effects. NACE - International Corrosion Conference Series, [S. l.], v. 2018- April, 2018.
- LEI, Y.; XIONG, J.; LI, R. Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1699-1>;
- LERVÅG, M. *et al.* Additive manufacturing with superduplex stainless steel wire by cmt process. Metals, [S. l.], v. 10, n. 2, 2020. <https://doi.org/10.3390/met10020272>
- LI, B.; ZHENG, H.; HAN, C.; ZHOU, K. Nanotwins-containing microstructure and superior mechanical strength of a Cu–9Al–5Fe–5Ni alloy additively manufactured by laser metal deposition. Additive Manufacturing, [S. l.], v. 39, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101825>
- LI, Zixiang *et al.* Characterization of microstructure and mechanical properties of stellite 6 part fabricated by wire arc additive manufacturing. Metals, [S. l.], v. 9, n. 4, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9040474>
- MARTINA, F.; MEHNEN, J.; WILLIAMS, S. W.; COLEGROVE, P.; WANG, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. Journal

- of Materials Processing Technology, [S. l.], v. 212, n. 6, p. 1377–1386, 2012. <https://doi.org/10.3390/met9040474>
- MARTINA, Filomeno. A comparison framework to support the selection of the best additive manufacturing process for specific aerospace applications manufacturing process for specific aerospace applications. [S. l.], n. March 2019, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2020.10019230>
- MARTINA, Filomeno; DING, Jialuo; WILLIAMS, Stewart; CABALLERO, Armando; PARDAL, Gonçalo; QUINTINO, Luisa. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. Additive Manufacturing, [S. l.], v. 25, n. July 2018, p. 545–550, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>
- MARTINS, Eliseu. Contabilidade de custos. 11a edição ed. São Paulo: Atlas S.A, 2018.
- MARTINS, Eliseu. Contabilidade de Custos. 9a edição ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- MARTINS, Eliseu; ROCHA, Welington. MÉTODOS DE CUSTEIO COMPARADOS. 2a Edição ed. São Paulo: Atlas S.A, 2015.
- MELI, E.; RINDI, A.; RIDOLFI, A.; FURFERI, R.; BUONAMICI, F.; IURISCI, G.; CORBÒ, S.; CANGIOLI, F. Design and production of innovative turbomachinery components via topology optimization and additive manufacturing. International Journal of Rotating Machinery, [S. l.], v. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9546831>
- MERCADO ROJAS, J. G.; WOLFE, T.; FLECK, B. A.; QURESHI, Ahmed Jawad. Plasma transferred arc additive manufacturing of Nickel metal matrix composites. Manufacturing Letters, [S. l.], v. 18, p. 31–34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.10.001>
- MISLICK, Gregory K.; NUSSBAUM, Daniel A. Costa Estimation: Methods and tools. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.10.001>
- MOORE, P.; ADDISON, A.; NOWAK-COVENTRY, M. Mechanical properties of wire plus arc additive manufactured steel and stainless steel structures. Welding in the World, [S. l.], p. 1521–1530, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00775-4>
- NIAZI, Adnan; DAI, Jian S.; BALABANI, Stavroula; SENEVIRATNE, Lakmal. Product cost estimation: Technique classification and methodology review. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, [S. l.], v. 128, n. 2, p. 563–575, 2006. <https://doi.org/10.1115/1.2137750>
- OLIVEIRA, George Luiz Gomes De. Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas. 2013. Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2013.

- PANFILI, G.; BALESTRINO, C. Leveraging additive manufacturing am technology to enhance the performance and reliability of gas turbines for offshore oil and gas applications. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2020. <https://doi.org/10.4043/30651-MS>
- PORRAS, Eric; DEKKER, Rommert. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. *European Journal of Operational Research*, [S. l.], v. 184, n. 1, p. 101–132, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.008>
- RAJEEV, G. P.; RAHUL, M. R.; KAMARAJ, M.; BAKSHI, Srinivasa R. Microstructure and High Temperature Mechanical Properties of Wire Arc Additively Deposited Stellite 6 Alloy. *SSRN Electronic Journal*, [S. l.], p. 400, 2020. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3531316>
- RODRIGUES, T.A.; DUARTE, V.; AVILA, J.A.; SANTOS, T.G.; MIRANDA, R.M.; OLIVEIRA, J.P. Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties, *Addit. Manuf.* 27, 440–450, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.029>
- RODRIGUEZ, N.; VÁZQUEZ, L.; HUARTE, I.; ARRUTI, E.; TABERNERO, I.; ALVAREZ, P. Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel. *Welding in the World*, [S. l.], v. 62, n. 5, p. 1083–1096, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0606-6>
- SAINT JOHN, D. B.; JOSHI, S. B.; SIMPSON, T. W.; QU, M.; ROWATT, J. D.; LOU, Y. Morphology and Grain Texture in As-Deposited and Heat Treated Inconel 718 Structures Produced using Laser-Based Powder Bed Fusion. *SOLID FREEFORM FABRICATION 2016: PROCEEDINGS OF THE 27TH ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM - AN ADDITIVE MANUFACTURING CONFERENCE, SFF 2016*, Anais [...]. : The University of Texas at Austin, 2016. p. 530–541.
- SANTOS, Maria Ruth Neponucena Dos. *Caracterização De Pré-Formas De Aços Aditiva Por Deposição a Arco Com E Sem Resfriamento Ativo Por Quase-Imersão*. 2022. Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2022.
- SCOTTI, F.M.; TEIXEIRA, F.R.; SILVA, L.J.; ARAÚJO, D.B., REIS, R.P.; SCOTTI, A. Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 57, 23-35, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>;

- SELVI, S.; VISHVAKSENAN, A.; RAJASEKAR, E. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, *Defence Technology*, Volume 14, Issue 1, Pages 28-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>
- SHENOY, Dinesh; ROSAS, Roberto. Problems and solutions in inventory management. first edit ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.007>
- SILVA, L. J. Near-immersion active cooling for wire + arc additive manufacturing: from concept to application, Universidade Federal de Uberlândia, Tese de doutorado, 2019. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27393>;
- SILVA, R.H.G.; ROCHA, P.C.J.; RODRIGUES, M.B.; PEREIRA, M.; GALEAZZI, D. Analysis of interlayer idle time as a temperature control technique in additive manufacturing of thick walls by means of CMT and CMT pulse welding processes. *Soldagem & Inspeção*, 25:e2501, 2020. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.01>;
- SKHABOVSKIY, I.; BATISTA, N.L., DAMATO, C.A.; REIS, R.P.; BOTELHO, E.C.; SCOTTI, A. Appraisal of fiber-metal laminate panels reinforced with metal pins deposited by CMT welding, *Composite Structures*, Volume 180, 263-275, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.043>
- SOUL, F.; HAMDY, N. Numerical simulation of residual stress and strain behavior after temperature modification. *Welding Processes*, 2012. <https://dx.doi.org/10.5772/47745>;
- SURYAKUMAR, S.; KARUNAKARAN, K.P.; CHANDRASEKHAR, U.; SOMASHEKARA, M.A. A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013. <https://doi.org/10.1177/0954405413482122>;
- SUTTON, B.; HERDERICK, E.; THODLA, R.; AHLFORS, M.; RAMIREZ, A. Heat Treatment of Alloy 718 Made by Additive Manufacturing for Oil and Gas Applications. *JOM*, [S. l.], v. 71, n. 3, p. 1134–1143, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-03321-7>
- SYNTETOS, A. A.; BABAI, M. Z.; ALTAY, N. On the demand distributions of spare parts. *International Journal of Production Research*, [S. l.], v. 50, n. 8, p. 2101–2117, 2012. DOI: 10.1080/00207543.2011.562561. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-03321-7>
- TATHGAR, H. S.; MOE, O. B. E.; MAILLON, B. Qualification of am-parts for the offshore industry. In: *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020*, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2020. <https://doi.org/10.4043/30664-MS>

- THOMAS-SEALE, L. E. J.; KIRKMAN-BROWN, J. C.; ATTALLAH, M. M.; ESPINO, D. M.; SHEPHERD, D. E. T. The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry. *International Journal of Production Economics*, [S. l.], v. 198, n. February 2017, p. 104–118, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>
- TREUTLER, Kai; WESLING, Volker. The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review. *Applied Sciences (Switzerland)MDPI*, , 2021. DOI: 10.3390/app11188619. <https://doi.org/10.3390/app11188619>
- VALDIVIESO, C., Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions, Published on January 15, 2019.
- VENDRA, L.; ACHANTA, A. Metal additive manufacturing in the oil and gas industry. In: *SOLID FREEFORM FABRICATION 2018: PROCEEDINGS OF THE 29TH ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM - AN ADDITIVE MANUFACTURING CONFERENCE*, SFF 2018 2020, Anais [...]. : The University of Texas at Austin, 2020. p. 454–460.
- VENDRA, L.; MALKAWI, A.; AVAGLIANO, A. Standardization of additive manufacturing for oil and gas applications. In: *PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2020*, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2020. <https://doi.org/10.4043/30533-MS>
- VERDI, D.; VARADARAJU, N.; TAN ZHI'EN, E.; PATRAN, A. Effect of Manufacturing Strategy on the Toughness Behavior of Inconel 625 Laser Metal Deposited Parts. *Advanced Engineering Materials*, [S. l.], v. 23, n. 7, 2021. <https://doi.org/10.1002/adem.202001506>
- VILARINHO, L. O. "Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG. 2000, <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27324>
- WANG, J.F.; SUN, Q.J.; WANG, H.; LIU, J.P.; FENG, J.C. Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding. *Materials Science and Engineering: A*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.015>
- WANG, Z.; PALMER, T.A.; BEESE. AM Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing. *Acta Materialia*, v. 110, p. 226–235, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.019>;

- WEGLOWSKI, Marek; BŁACHA, Sylwester; PILARCZYK, Jan; DUTKIEWICZ, Jan; ROGAL, Lukasz. Electron beam additive manufacturing with wire - Analysis of the process. AIP Conference Proceedings, [S. l.], v. 1960, n. May 2018, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5035007>
- WILLIAMS, S. W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology, [S. l.], v. 32, n. 7, p. 641–647, 2016. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- WU, Bintao; DING, Donghong; PAN, Zengxi; CUIURI, Dominic; LI, Huijun; HAN, Jian; FEI, Zhenyu. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. Journal of Materials Processing Technology, [S. l.], v. 250, n. December 2016, p. 304–312, 2017. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>
- WU, Bintao; PAN, Zengxi; DING, Donghong; CUIURI, Dominic; LI, Huijun; XU, Jing; NORRISH, John. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. Journal of Manufacturing Processes, [S. l.], v. 35, n. February, p. 127–139, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
- WU, W.; TOR, S. B.; CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; MERCHANT, A. Investigation on processing of ASTM A131 Eh36 high tensile strength steel using selective laser melting. Virtual and Physical Prototyping, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 187–193, 2015. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1106091>
- XING, X.; DUAN, X.; JIANG, T.; WANG, J.; JIANG, F. Ultrasonic peening treatment used to improve stress corrosion resistance of AlSi10Mg components fabricated using selective laser melting. Metals, [S. l.], v. 9, n. 1, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9010103>
- XIONG, Jun; ZHANG, Guangjun; GAO, Hongming; WU, Lin. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 417–423, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.09.011>
- XIONG, Jun; ZHANG, Guangjun; ZHANG, Weihua. Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S. l.], v. 80, n. 9–12, p. 1767–1776, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7112-4>
- XU, Xiangfang; DING, Jialuo; GANGULY, Supriyo; DIAO, Chenglei; WILLIAMS, Stewart. Oxide accumulation effects on wire + arc layer-by-layer additive manufacture process.

- Journal of Materials Processing Technology, [S. l.], v. 252, n. July 2017, p. 739–750, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.030>
- XU, Xinglu; RODGERS, Mark D.; GUO, Weihong (Grace). Hybrid simulation models for spare parts supply chain considering 3D printing capabilities. Journal of Manufacturing Systems, [S. l.], v. 59, n. February, p. 272–282, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.018>
- YANG, D.; WANG, G.; ZHANG, G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. J. Mater. Process. Technol, 244: 215–224, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>
- YANGFAN, Wang; XIZHANG, Chen; CHUANCHU, Su. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing. Surface and Coatings Technology, [S. l.], v. 374, n. May, p. 116–123, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.05.079>
- YEHOROV, Yuri; DA SILVA, Leandro João; SCOTTI, Américo. Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall. Journal of Manufacturing and Materials Processing, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 32, 2019. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020032>
- ZHANG, B.; WANG, C.; WANG, Z.; ZHANG, L.; GAO, Q. Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer. J Mater Process Technol. 267: 167–176, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.011>
- ZHAO, H.; ZHANG, G.; YIN, Z.; WU, L. A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. J. Mater. Process. Technol. 211: 488–495, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.002>
- ZHIHAO LI, GUOCAI MA, GANG ZHAO, MIN YANG, Wenlei Xiao. Weave Bead Welding Based Wire and Arc Additive Manufacturing Technology. [s.l.] : Springer Singapore, 2018. v. 923. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2396-6_38
- ZHONG, A.; ORNELAZ, R.; KRISHNAN, K. Exploration of applications of metallic additive manufacturing for the oil and gas industry. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE 2017, Anais [...]. : Offshore Technology Conference, 2017. p. 604–617. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2396-6_38
- ZHONG, Chongliang; PIRCH, Norbert; GASSER, Andres; POPRAWE, Reinhart; SCHLEIFENBAUM, Johannes Henrich. The influence of the powder stream on high-deposition-rate laser metal deposition with inconel 718. Metals, [S. l.], v. 7, n. 10, 2017. <https://doi.org/10.3390/met7100443>

APÊNDICE A

Mesa de coordenadas Laprosolda (LPS65) com RAQI

Para este trabalho foi realizado um *retrofit* em um equipamento de coordenadas bidimensional (XZ) existente no Laprosolda (Figura 0.1). Esse equipamento foi originalmente desenvolvido dentro de um projeto de tese para a impressão de pré-formas planas com 400 mm de largura por 300 mm de altura.

O *retrofit* consistiu nas seguintes modificações:

- ✓ Maximizar o volume útil de deposição;
- ✓ Implementar o 3° eixo (Y) de movimentação;
- ✓ Adicionar um sistema de refrigeração d'água dentro da cuba;
- ✓ Substituir o sistema pressurizado de injeção de água por um sistema com bomba d'água recirculante atmosférico;
- ✓ Modernizar o controle de nível de água através de 4° eixo (W) independente (programável); e
- ✓ Atualização de software.

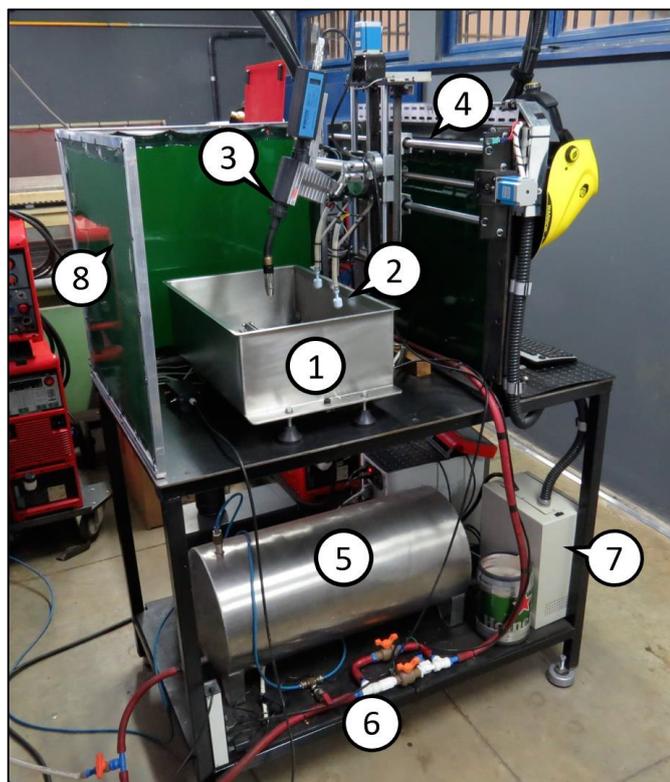


Figura 0.1 - Visão geral do protótipo original do sistema MADA com NIAC: (1) tanque de trabalho; (2) interruptor de flutuação (3) tocha CMT; (4) sistema de movimentação; (5) tanque

de água pressurizada; (6) sistema hidráulico e pneumático; (7) controlador *CNC*; e (8) cortina de proteção (Silva, 2019)

Para maximizar o volume útil de deposição e implementar o 3º eixo de movimentação foi necessário elaborar um projeto do conjunto no *CAD 3D* (Figura 0.2), obtendo um melhor dimensionamento e alinhamento correto das partes no momento da montagem. Realizou-se a maximização do volume útil de deposição de modo que toda a área da base da mesa fosse utilizada para a cuba. Desta forma a cuba ficou com 815 x 600 mm de base, sendo que a altura da cuba foi de acordo com comprimento útil do eixo Z (300 mm) já existente no equipamento mais 100 mm que corresponde a distância entre o fundo da cuba e a plataforma de fixação. Sendo assim a cuba tem 815 x 600 x 400 mm, totalizando ~200 litros.

Sobre o fundo da cuba foi soldado com 4 pinos de aço com buchas de *tecnil* com função de isolar eletricamente a plataforma do restante da mesa. Sobre os pinos isolados foi encaixado uma plataforma rígida onde serão fixados os substratos. A plataforma tem 540x400 mm de base, que corresponde verdadeiramente a área útil de deposição, e a altura do volume útil é o mesmo que o comprimento útil eixo Z (300 mm). Sendo assim o volume útil de deposição tem 540 x 400 x 300 mm, totalizando 64,8 litros.

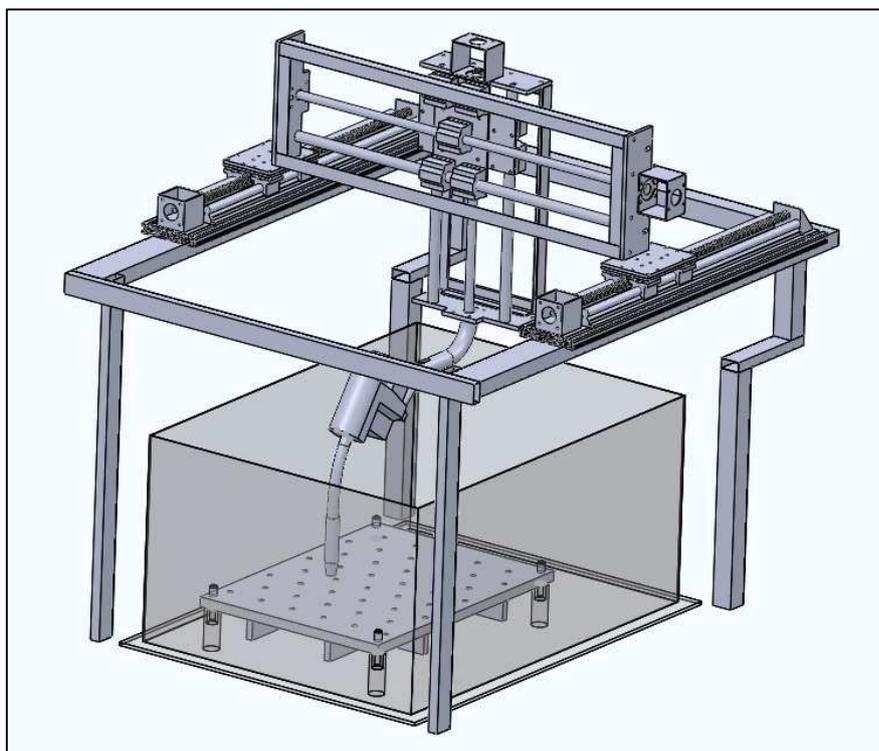


Figura 0.2 - Perspectiva do desenho do sistema de deposição e movimentação para *retrofit*

Ainda dentro da cuba foi reservado um espaço para fixar um trocador de calor com a função de refrigerar a água no interior da cuba. Esse trocador foi conectado a um circuito de água gelada fechado com uma unidade de refrigeração.

O projeto do pórtico foi feito sobre a estrutura de duas barras de metalon já existente no equipamento para que a tocha possa varrer toda a área plana da plataforma. Nesse caso, fez-se necessário um recuo na parte superior do pórtico para o apoio dos atuadores, e sobre esse pórtico inseriu dois atuadores de esferas recirculantes que corresponde o 3° eixo de movimentação.

A Figura 3.6 mostra um desenho do esquema de recirculação de água atmosférico por bomba d'água. Com a válvula 4 fechada e a 5 aberta, a bomba impulsiona a água em direção a cuba pela tubulação de recalque, e o fluxo de água entra na cuba pelos pontos A e B. O ponto A tem a função de agitar a água dentro da cuba e/ou direcionar o fluxo por meio de um ducto flexível em algum ponto específico da peça. Já o ponto B direciona o fluxo contra um trocador de calor que está conectado em um circuito fechado com uma unidade de refrigeração de água, e nesta unidade é possível ajustar a vazão e a temperatura da água.

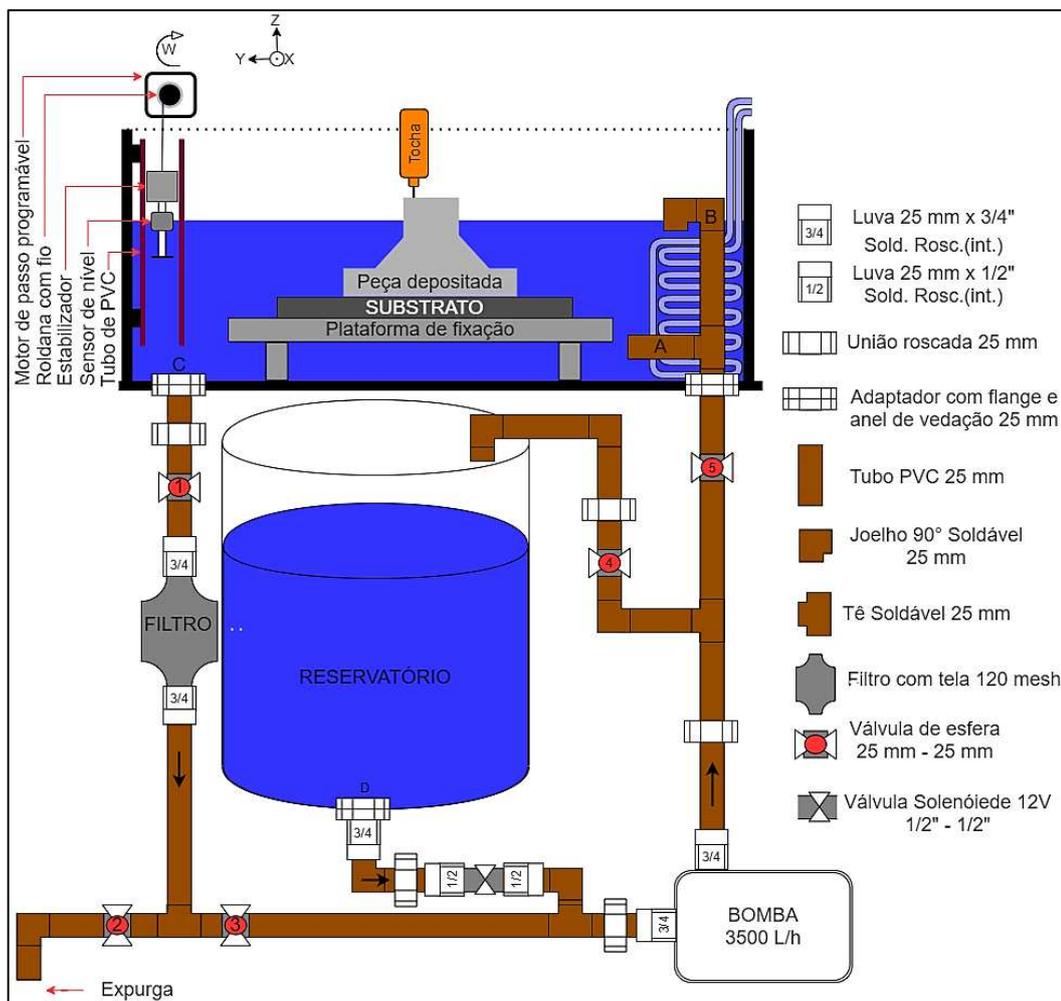


Figura 0.3 – Montagem esquemática da técnica RAQI utilizada em conjunto à mesa CNC

Com as válvulas 1 e 3 abertas e 2 fechada a água dentro da cuba é sugada pelo ponto C, onde passa por um filtro de 120 mesh para captar resíduos que possam danificar a bomba. Depois do filtro o fluxo segue pela tubulação de sucção, e enquanto a bomba estiver ligada a água estará recirculando e filtrando.

Com o gerenciamento térmico da peça (RAQI), à medida que a deposição ocorre e a tocha sobe em direção ao eixo Z+, é necessário subir o nível de água, com o eixo W escravo do eixo Z ambos deslocamentos serão mesma medida. Com isso a haste do sensor de nível se desloca para cima, fazendo com que o flutuador do sensor fique na parte inferior da haste, emitindo um sinal de abertura da válvula solenoide situada abaixo do reservatório de água. Com isso a água do reservatório é aspirada pelo tubo de sucção da bomba enchendo a cuba, e esse enchimento ocorre até o flutuador do sensor se deslocar para a parte superior da haste e cessar o sinal de abertura do válvula solenoide.

Como o eixo W é totalmente independente e programável, ele não precisa ser necessariamente escravo do eixo Z. Desse modo pode-se programar diferentes níveis de água durante a deposição, e isso dá uma maior flexibilização no gerenciamento térmico da peça. A válvula 2 é utilizada quando se deseja expurgar a água do sistema e a válvula 4 quando se deseja retornar a água para o reservatório.

Da Figura 0.4 até a Figura 3.5 mostram as imagens de construção do equipamento.



Figura 0.4 – Soldagem da cuba



Figura 0.5 – Montagem do pórtico superior

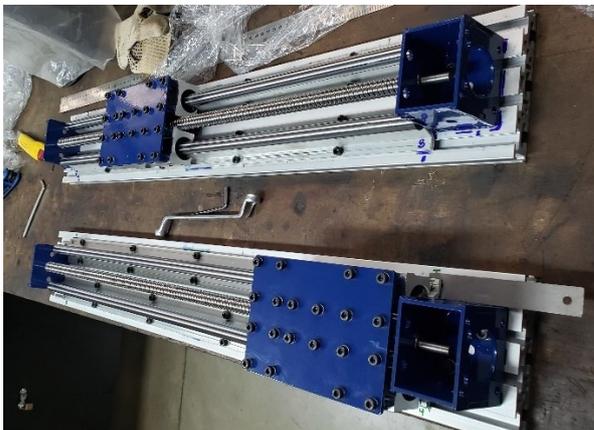


Figura 0.6 – Montagem dos atuadores do Eixo Y



Figura 0.7 – Montagem dos atuadores sobre o pórtico

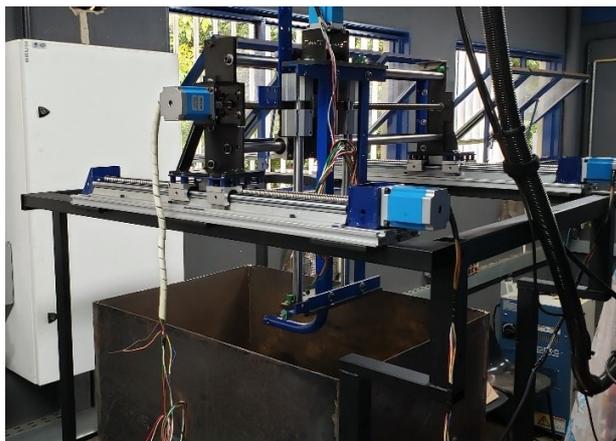


Figura 0.8 – Alinhamento dos eixos



Figura 0.9 – Quadro de drivers e controladora

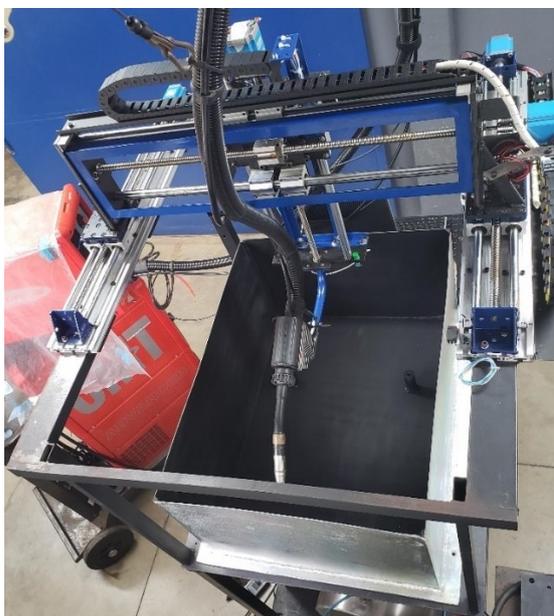


Figura 0.10 – montagem final dos atuadores

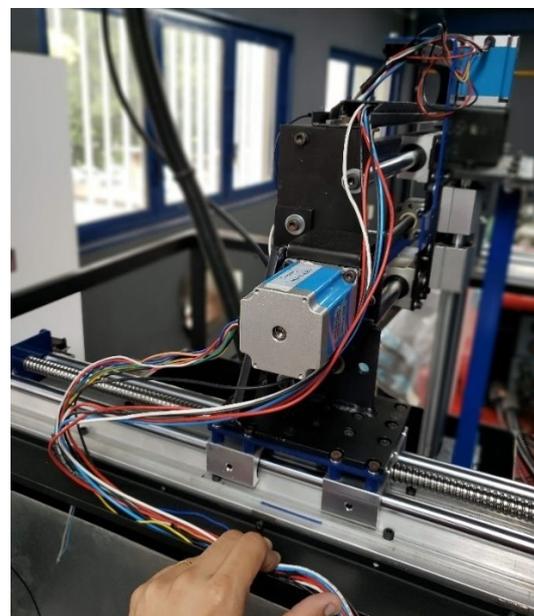


Figura 0.11 - Passagem dos cabos elétricos



Figura 0.12 – Furação da plataforma de construção



Figura 0.13 – Soldagem das travessas da plataforma de construção



Figura 0.14 – Sistema de recirculação de água por bomba



Figura 0.15 – Sistema de controle do nível de água (4º eixo)

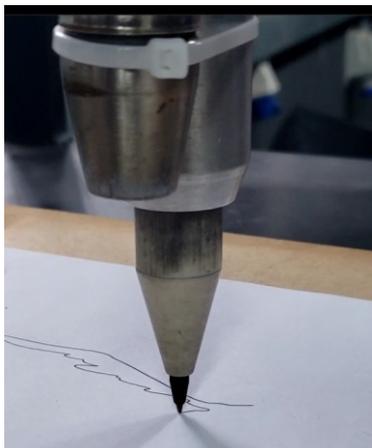


Figura 0.16 – Inserção de uma caneta para calibração



Figura 0.17 - Ilustração da precisão e da qualidade da trajetória



Figura 0.18 – Retrofit do equipamento de manufatura aditiva arco com 3 eixos concluído

