

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS AURÉLIO STELZINER FISCHER

PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM) APLICADO NA FABRICAÇÃO
DE “PEÇA MODELO” UTILIZADA NA VALIDAÇÃO DE GABARITOS DE CONTROLE
E DISPOSITIVOS DE PRODUÇÃO

CURITIBA

2021

LUCAS AURÉLIO STELZINER FISCHER

PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM) APLICADO NA FABRICAÇÃO
DE “PEÇA MODELO” UTILIZADA NA VALIDAÇÃO DE GABARITOS DE CONTROLE
E DISPOSITIVOS DE PRODUÇÃO

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Manufatura, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Sérgio Fernando Lajarin

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F529p Fischer, Lucas Aurélio Stelziner
Projeto para manufatura aditiva (DFAM) aplicado na fabricação de “peça modelo” utilizada na validação de gabaritos de controle e dispositivos de produção [recurso eletrônico] / Lucas Aurélio Stelziner Fischer – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Sérgio Fernando Lajarin

1. Automóveis – peças. 2. Peças automotivas (gabarito). I. Universidade Federal do Paraná. II. Lajarin, Sérgio Fernando. III. Título.

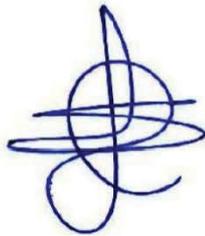
CDD: 629.252

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCAS AURÉLIO STELZINER FISCHER

Dissertação aprovada como requisito para obter o título de mestre em Engenharia de Manufatura do curso de Pós Graduação em Engenharia de Manufatura (PPGEM) da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Lajarin
Universidade Federal do Paraná, UFPR



Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR



Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan
Universidade Federal do Paraná, UFPR

DAVID KNOPFHOLZ Assinado de forma digital por DAVID
BECHER:53633008934 KNOPFHOLZ.BECHER:53633008934
Dados: 2021.06.21 09:28:01 -03'00'

Msc. David K. Becher
Grupo Volvo no Brasil

Curitiba, 16 de junho de 2021.

RESUMO

O setor automotivo é muito representativo na produção industrial brasileira e é extremamente importante para outros setores como fornecedores de peças e serviços. Para que as empresas de auto peças possam fornecer seus produtos para o setor automotivo, elas devem atender os dezoito requerimentos exigidos dentro do Processo de Aprovação de Peça de Produção (PPAP, do inglês *Production Part Approval Process*). Uma das maiores dificuldades para obter a aprovação do PPAP está relacionada a confecção da "Peça Modelo", a qual tem como objetivo em ser utilizada como referência para calibrar e validar dispositivos, treinar operadores, etc. As metodologias convencionais de desenvolvimento de peças automotivas não acompanharam a velocidade e a tecnologia que esse mercado exige, além disto o tempo e os custos para a fabricação de Peças Modelo são altos e podem se tornar um gargalo no ciclo de desenvolvimento de peças automotivas. Portanto, uma modernização da atual metodologia pode trazer benefícios na aprovação dos PPAP das peças automotivas. Com esse objetivo, este trabalho apresenta um procedimento de Projeto para Manufatura Aditiva (DFAM, do inglês *Design for Additive Manufacture*) que analisa a viabilidade e sistematiza a fabricação de Peça Modelo por meio da Manufatura Aditiva (AM, do inglês, *Additive Manufacturing*). O procedimento foi aplicado na fabricação de duas Peças Modelo com características geométricas e funcionais diferentes e os resultados comprovaram que o procedimento de DFAM proposto apresenta benefícios consideráveis ao processo de desenvolvimento de peças automotivas e pode ser facilmente implementado por montadoras e fornecedores para obtenção das Peças Modelo.

Palavras-chave: Peça Modelo, Manufatura Aditiva. DFAM. PPAP. Gabarito de Controle.

ABSTRACT

The automotive sector is awfully representative of Brazilian industrial production and extremely important for other sectors, such as parts and services suppliers. In order for auto parts companies to supply their products to the automotive sector, it is necessary to fulfill the eighteen requirements requested within the Production Part Approval Process (PPAP). The greatest difficulties to obtaining the PPAP approval is correlated to the manufacture of "Master Sample". which has a purpose to be used as a reference for calibrating and validating devices, training operators, etc. The development methodologies of automotive parts are becoming outdated due to the usage of old methods. Therefore, the current methodology modernization can provide benefits to the PPAP approval for automotive parts. Thereby, this paper aims to present a Design for Additive Manufacture (DFAM) procedure that analyzes the feasibility and systematizes the Master Sample manufacture through Additive Manufacturing (AM). Finally, the results demonstrated in this paper prove that the proposed DFAM procedure reveals considerable benefits to the development process of automotive parts and can be easily implemented by vehicle manufacturers and suppliers to obtain the Master Samples.

Keywords: Master Samples, Additive Manufacturing, DFAM, PPAP, Jigs and Fixtures.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Exemplos de aplicações dos dispositivos de Controle dimensional	7
FIGURA 2: : Dispositivo confeccionado por meio da AM, utilizado para o escaneamento da capa plástica de uma furadeira	8
FIGURA 3: (A) dispositivo produzido 100% em alumínio, (B) dispositivo híbrido, com componentes produzidos por meio de AM	9
FIGURA 4: Dispositivo auxiliar confeccionado por meio da AM para uso em máquinas de medição por coordenada	10
FIGURA 5: Dispositivo de controle manufaturado por meio da AM	10
FIGURA 6: Visão geral do fluxo de fabricação por meio da AM	11
FIGURA 7: Máquina de extrusão de material e composição de componentes	12
FIGURA 8: Dispositivo de montagem utilizado no processo de fabricação da BMW	15
FIGURA 9: Dispositivo Auxiliar utilizado para Usinagem de peças metálicas	15
FIGURA 10: Dispositivo híbrido utilizado para montagem de peças plásticas	16
FIGURA 11: Principais Materiais utilizados em AM para Extrusão de Material	17
FIGURA 12: Propriedades dos materiais ABS e PLA	18
FIGURA 13: Etapas e Planejamento de processo para AM	19
FIGURA 14: Fluxograma ilustrativo das possíveis formas de aquisição do Modelo 3D	20
FIGURA 15: Diagrama ilustrativo demonstrando a influência da quantidade de triângulos e tamanho do arquivo STL, em função da resolução do modelo 3D	21
FIGURA 16: Comparação do sentido vetorial da força em função da linha de camada depositada	22
FIGURA 17: (a) Modelo CAD do componente sem adição de suporte, (b) Modelo orientado do sentido vertical com adição de suporte, (c) Modelo orientado no sentido horizontal (XY) com adição de suporte	23
FIGURA 18: Percentual de preenchimento, 20% (esquerda), 50% (centro) e 75% (direita) ...	24
FIGURA 19: Exemplo de peça com e sem Pós-Processamento. Peça da esquerda sem pós-processamento e da direita pós-processada com vapor de acetona 100%	25
FIGURA 20: Planilha DFAM para auxiliar os usuários na tomada de decisão	29
FIGURA 21: Número de publicações em Biomimética e AM entre 2005–2018	30

FIGURA 22: Solado de tênis com geometria de treliças obtido por meio da AM.....	31
FIGURA 23: Fluxograma de DFAM para AM por extrusão de material	32
FIGURA 24: Otimização topológica por meio de análises FEM	32
FIGURA 25: Evolução da otimização topológica de <i>Design</i> do Suporte C	34
FIGURA 26: Evolução da otimização topológica de <i>Design</i> do Suporte U	34
FIGURA 27: Otimização topologia em sistemas de distribuição de fluido, sendo (a) Projeto convencional com mangueiras (110 g), (b) Projeto monolítico fresado (200 g), (c) <i>Design</i> otimizado para MA (100 g).....	35
FIGURA 28: Otimização topológica em suporte de aeronave, sendo (a) Peça original confeccionada em titânio pesando aproximadamente 1.8 Kg, (b) Projeto ganhador também confeccionado em titânio pesando 360g.....	36
FIGURA 29: Otimização topológica em suporte de dobradiça de aeronaves, sendo (a) Peça Original; (b) Em processo de otimização topológica; (c) Peça final.....	36
FIGURA 30: Otimização topológica realizada em uma peça de um robô humanóide, sendo (a) Peça original com 4 subcomponentes; (b) Peça topologicamente otimizada.....	37
FIGURA 31: Otimização topológica com objetivo em redução de subcomponentes e peso de uma peça.....	37
FIGURA 32: Fluxo de Fabricação de Peças Modelo por meio da Manufatura Aditiva.....	40
FIGURA 33: Matriz de recomendação para tomada de decisão na adequação do <i>design</i> para AM.....	46
FIGURA 34: Suporte Metálico denominado “Algema” fabricado convencionalmente por processos de estampagem.....	50
FIGURA 35: Tubo metálico denominado “Tubo de Resfriamento” fabricado com auxílio de dobradeiras CNC e Processo de solda	51
FIGURA 36: Representação técnica do desenho 2D do componente Algema, sendo indicado por meio das setas as características importantes do produto.....	52
FIGURA 37: Representação técnica do desenho 2D do componente Tubo de Resfriamento”, sendo indicado por meio das setas as características dimensionais importantes do produto	53
FIGURA 38: Representação técnica do desenho 2D do Tubo de Resfriamento, sendo indicado por meio das demarcações legendadas as características importantes do produto	54
FIGURA 39: Representação virtual da montagem da peça Algema, tendo como propósito indicar as regiões crítica em relação aos outros componentes	56

FIGURA 40: Representação virtual da montagem do tubo de resfriamento, tendo como propósito indicar as regiões críticas em relação aos outros componentes	57
FIGURA 41: Impressora SethiS2 utilizada para conduzir o presente trabalho	58
FIGURA 42: Tubo de resfriamento posicionado na plataforma de fabricação, com ênfase nas condições dimensionais excedentes em relação a capacidade volumétrica de produção	61
FIGURA 43: Metodologia de Booth aplicada para avaliar o <i>Design</i> da peça Algema.....	62
FIGURA 44: Metodologia de Booth aplicada para avaliar o <i>Design</i> da peça tubo de resfriamento.....	63
FIGURA 45: Tudo de Resfriamento dividido em dez partes para atender a readequação de <i>design</i> exigida.....	65
FIGURA 46: Tubo principal preenchido com material de forma que se torne um sólido de único diâmetro	65
FIGURA 47: Conexões em forma de polígonos projetadas para interligar às partes do tubo principal	66
FIGURA 48: Peça Algema orientada no sentido horizontal (XY) e as estruturas de suporte aplicadas	67
FIGURA 49: Partes do Tubo de resfriamento orientadas na plataforma de fabricação	67
FIGURA 50: Suportes soldados e tubo de menor diâmetro orientados na plataforma de fabricação, sendo as peças representadas pela cor laranja claro e as estruturas de suporte laranja escuro	68
FIGURA 51: Peça Modelo do componente Algema ao final da fabricação, posicionada na plataforma	71
FIGURA 52: Peça Modelo do componente Algema como removida da impressora 3D, apresentando estruturas de suporte e pequenas rebarbas e marcas do processo	72
FIGURA 53: Peça Modelo do componente Algema concluída e pronta para avaliação dimensional	72
FIGURA 54: Tubo de Resfriamento na plataforma da máquina AM após conclusão da manufatura	73
FIGURA 55: Componentes periféricos do Tubo de Resfriamento disponibilizados na plataforma da máquina AM após conclusão da fabricação	74

FIGURA 56: Partes do Tubo de Resfriamento removidas da máquina AM, tendo como ênfase o material de suporte e rebarbas que foram removidas na etapa de pós-processamento	74
FIGURA 57: Ilustração do encaixe montado e utilizado para interligar às sete partes do tubo principal	75
FIGURA 58: Componentes periféricos fixados no tubo principal por meio de parafusos.....	75
FIGURA 59: Peça Modelo do Tubo de Resfriamento concluída e pronta para ser submetida aos ensaios dimensionais.....	76
FIGURA 60: Componente Algema posicionado de forma representativa na máquina de medição.....	77
FIGURA 61: Tubo de Resfriamento posicionado de forma representativa na máquina de medição.....	78
FIGURA 62: Relatório Dimensional do componente Algema produzido por meio da AM.....	79
FIGURA 63: Relatório dimensional do Tubo de Resfriamento produzido por meio da AM.....	80
FIGURA 64: Componente Algema aplicado no dispositivo de controle utilizado para verificar o raio de 20,25mm e a dimensão de 3,1mm	83
FIGURA 65: Algema aplicada no dispositivo de controle para verificação das dimensões de 32mm e 7,2mm.....	83
FIGURA 66: Componente Algema aplicado no dispositivo de controle utilizado para verificar as posições de 24,5mm e 21,8mm	84
FIGURA 67: Peça Modelo do Tubo de Resfriamento aplicada no Dispositivo de Controle que tem como finalidade em verificar as coordenadas das dobras do Tubo Principal	85
FIGURA 68: Tubo de Resfriamento aplicado no Dispositivo que verificar a posição dos componentes periféricos.....	86
FIGURA 69: Tubo de Resfriamento aplicado no Dispositivo de Controle que verifica a posição dos componentes periféricos. Dando ênfase no desvio do pino que afere a posição do tubo de menor diâmetro.....	86
FIGURA 70: Ferramenta de estampagem progressiva utilizada para manufaturar o componente Algema.....	88
FIGURA 71: Ferramentas utilizadas para fabricar os suportes periféricos do Tubo de Resfriamento	90

FIGURA 72: Dispositivo de fixação para executar a furação para o tubo periférico de menor diâmetro	90
FIGURA 73: Dispositivo de Soldagem utilizado para soldar os componentes periféricos	

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Exemplos máquinas que utilizam o princípio de extrusão de material	13
QUADRO 2: Preenchimentos mais usuais para AM de Extrusão de Material	24
QUADRO 3: Parâmetros de processo essenciais para fabricação de Peças Modelo	44
QUADRO 4: Orientação e tomada de decisão em relação à fabricação do componente por meio da AM	45
QUADRO 5: Parâmetros de processo utilizados na manufatura das Peças Modelo	60
QUADRO 6: Tempo gasto nas etapas de desenvolvimento da Peça Modelo por processos convencionais.....	88
QUADRO 7: Análise Comparativa do tempo de aquisição da Peça Modelo do componente Algema	89
QUADRO 8: Detalhamento das etapas de desenvolvimento para obter a Peça Modelo do Tubo de Resfriamento por meio dos processos convencionais.....	91
QUADRO 9: Análise Comparativa do tempo de aquisição da Peça Modelo do Tubo de Resfriamento	92

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
APQP	<i>Advanced Product Quality Planning</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DFAM	<i>Design for Additive Manufacture</i>
DFMA	<i>Design for Manufacture and Assembly</i>
DFMEA	<i>Design Failure Mode and Effects Analysis</i>
DMDR	<i>Direct Manufacturing Design Rule</i>
FEM	<i>Finite Element Methods</i>
FDM	<i>Fusion Deposition Modeling</i>
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerance</i>
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
LAM	Laser Additive Manufacturing
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effects Analysis</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PLA	Ácido poliláctico
PPAP	<i>Production Part Approval Process</i>
PR	Prototipagem Rápida
PVA	Álcool polivinílico
RPS	<i>Reference Point System</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>STereoLithography</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Formulação do Problema	1
1.3. Justificativa	2
1.4. Hipóteses	3
1.5. Objetivo	4
1.5.1. Objetivos geral.....	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Peças Modelo e Dispositivos de Controle Dimensional	5
2.1.1. Peças Modelo.....	5
2.1.2. Dispositivo de Controle Dimensional	6
2.1.3. Aplicações dos Dispositivos de Controle Dimensional.....	6
2.1.3.1. <i>Exemplo de dispositivos auxiliares de escaneamento</i>	7
2.1.3.2. <i>Dispositivos de Controle Dimensional Híbridos</i>	8
2.1.3.3. <i>Dispositivos auxiliares para máquinas de medição por coordenadas</i>	9
2.1.3.4. <i>Dispositivos de controle dimensional confeccionado por AM</i>	9
2.2. Manufatura Aditiva	10
2.2.1. Princípio de Extrusão de Material	12
2.2.2. Exemplos de Aplicações da AM por Extrusão de Material	14
2.2.3. Materiais utilizados pelo princípio de extrusão de material	16
2.3. Planejamento De Processo para AM	18
2.3.1. Aquisição da representação geométrica 3D	19
2.3.1.1. <i>Arquivo STL</i>	20
2.3.2. Planejamento de Processo para AM	21
2.3.2.1. <i>Orientação para fabricação</i>	21
2.3.2.2. <i>Fator de Escala</i>	22
2.3.2.3. <i>Base e Estruturas de Suporte</i>	23
2.3.2.4. <i>Trajectoria de Contorno e Preenchimento</i>	23
2.3.2.5. <i>Pós-Processamento</i>	25
2.4. Projeto Para Manufatura Aditiva (DFAM)	26
2.4.1. Abordagens e metodologias de DFAM	28
2.4.2. Exemplos de aplicações de DFAM em componentes mecânicos	33
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	38

3.1. Procedimento de DFAM para fabricar Peças Modelo.....	38
3.1.1. Definição dos requisitos de produto.....	41
3.1.2. Limitações de Processo.....	42
3.1.2.1. Equipamento de AM.....	42
3.1.2.2. Material.....	42
3.1.2.3. Parâmetros de Processo.....	43
3.1.3. Avaliação de <i>Design</i> para AM.....	45
3.1.4. Adequação de <i>Design</i> para AM.....	45
3.1.5. Planejamento de Processo.....	47
3.1.5.1. Orientação do componente.....	47
3.1.5.2. Estruturas de Suporte.....	48
3.1.5.3. Parametrização do Software de Planejamento do Processo.....	48
3.1.5.4. Simulação.....	48
3.1.6. Fabricação e Pós-Processamento.....	49
3.1.7. Análise Dimensional.....	49
4. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO.....	50
4.1. Definição dos Requisitos dos Produtos.....	51
4.1.1. Análise do desenho técnico 2D.....	52
4.1.2. Análise da aplicabilidade do produto.....	55
4.1.2.1. Análise da aplicabilidade da peça Algema.....	55
4.1.2.2. Análise da aplicabilidade do Tubo de Resfriamento.....	55
4.2. Análise de Limitações de Equipamento, Material e Processo.....	57
4.2.1. Equipamento de AM.....	58
4.2.2. Material.....	58
4.2.3. Processo.....	59
4.3. Avaliação de <i>Design</i> para AM.....	61
4.4. Adequação de <i>Design</i> para AM.....	64
4.5. Planejamento de Processo.....	66
4.5.1. Orientação do componente e Estruturas de Suporte.....	66
4.5.2. Parametrização do Software e Simulação.....	68
4.6. Fabricação e Pós-Processamento.....	68
4.7. Análise Dimensional.....	69
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5.1. Procedimento de DFAM.....	70
5.2. Manufatura das Peças Modelo.....	71
5.2.1. Manufatura da peça Algema por AM.....	71

5.2.2. Manufatura do Tubo de Resfriamento por AM.....	73
5.3. Avaliação Dimensional.....	77
5.3.1. Avaliação Dimensional da Algema	78
5.3.2. Avaliação Dimensional Tubo de Resfriamento	79
5.4. Validando os Dispositivos de Controle Dimensionais.....	82
5.4.1. Validação dos Dispositivos de Controle do Componente Algema	82
5.4.2. Validando os Dispositivos de Controle do Tubo de Resfriamento	84
5.5. Fabricação pelo Processo Convencional versus AM.....	87
5.5.1. Análise Comparativa Componente Algema	87
5.5.2. Análise Comparativa do Tubo de Resfriamento	89
5.6. Análise e Discussão dos Resultados	92
6. CONCLUSÕES	94
6.1. Sugestões de Trabalhos Futuros	95
REFERÊNCIAS	96
Anexo 1	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

O setor automotivo contribui significativamente para o PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro, representando cerca de 22% do PIB industrial e afeta diretamente o desempenho de outros setores industriais. Um exemplo são as fábricas de autopeças, que são responsáveis em fornecer os componentes usados pelas montadoras de veículos, e esses componentes podem ser forjados, fundidos, estampados, trefilados, plásticos, artefatos de borracha, produtos não metálicos entre outros (MDIC, 2020).

Para que as empresas de auto peças possam fornecer seus produtos para o setor automotivo, elas devem atender às características técnicas exigidas por cada montadora. Diante dessa necessidade, no final de 1980 uma comissão de especialistas de fabricantes automotivos dos Estados Unidos desenvolveu um processo denominado Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP, do inglês, *Advanced Product Quality Planning*). Este processo visa estruturar o desenvolvimento e atendimento dos níveis de qualidade dos produtos fornecidos às empresas automobilísticas (MANUAL PPAP, 2020).

Uma das principais atividades integradas dentro do APQP, é o Processo de Aprovação de Peça de Produção (PPAP, do inglês *Production Part Approval Process*) e esta atividade tem como propósito assegurar que o processo de fabricação do fornecedor é capaz de produzir peças de forma seriada de acordo com as exigências técnicas estabelecidas pelo cliente (MANUAL PPAP, 2020).

Somente após a aprovação do PPAP pelo cliente, a empresa está habilitada a fornecer o produto em forma seriada.

1.2. Formulação do Problema

Para que o PPAP possa ser aprovado, o fornecedor deve apresentar comprovação do atendimento dos requerimentos técnicos exigidos. No total são 18 requerimentos, sendo eles: (1) Histórico do desenho, (2) Documento de mudança de engenharia, (3) Aprovação de engenharia, (4) Modo de falha de *design* e análise de efeitos (DFMEA, do inglês, *Design Failure Mode and Effects Analysis*), (5) Diagrama de fluxo de processo, (6) Modo de falha de processo e análise de efeitos (PFMEA, do

inglês, *Process Failure Mode and Effects Analysis*), (7) Plano de controle, (8) Estudos de análise do sistema de medição, (9) Resultados dimensionais, (10) Registro de material e teste de performance, (11) Estudo do processo inicial, (12) Documentação dos laboratórios, (13) Relatório de aprovação de aparência, (14) "Peça Modelo", (15) Verificação adicionais, (16) Exigências específicas do cliente e (17) Certificado de submissão de peça.

Uma das maiores dificuldades para obter a aprovação completa do PPAP, que está relacionada a validação dos dispositivos de produção, é a confecção da "Peça Modelo", a qual tem como objetivo ser utilizada como referência para calibrar dispositivos, treinar operadores, validar os gabaritos de controle dimensionais, etc. Essa dificuldade está vinculada à falta da conclusão do desenvolvimento dos dispositivos de produção, pois somente após o término da confecção física dos dispositivos será possível fabricar uma amostra padrão. Além disto é necessário despende tempo significativo em análises dimensionais para validar a peça confeccionada, e então nomeá-la como uma Peça Modelo. Proporcionando assim um acréscimo no custo e tempo de desenvolvimento da peça a ser entregue para o cliente.

1.3. Justificativa

As metodologias de desenvolvimento de peças do ramo automotivo estão se tornando defasadas devido ao uso de métodos antigos, complexos e muito teóricos. Em um mercado tão competitivo onde o *time-to-marketing*¹ se torna cada vez menor e as exigências por qualidade, segurança e redução de custo cada vez maior, novidades no desenvolvimento e na fabricação são urgentes.

Diante disso, uma modernização da atual metodologia poderá trazer benefícios significativos na aprovação dos PPAP das peças automotivas, tais como, redução no tempo de validação dos gabaritos, maior assertividade no desenvolvimento, produtos de melhor qualidade e agilidade na implementação das peças. Por consequência, oportunizando reduções de custo no desenvolvimento das peças a serem fornecidas para as montadoras automotivas.

¹ Expressão usada para identificar o tempo gasto no processo de desenvolvimento de um produto, desde sua concepção até a chegada ao mercado.

1.4. Hipóteses

Atualmente, muito se fala nas tecnologias da indústria 4.0 e metodologias ágeis, que têm como propósito tornar os processos de desenvolvimento mais práticos e fáceis de serem conduzidos. As ferramentas da indústria 4.0 aplicadas na confecção da Peça Modelo, podem trazer benefícios para as empresas de autopeças nas aprovações dos dispositivos de controle e processo de fabricação, além de tornar os desenvolvimentos mais robustos e eficientes, pois podem proporcionar um maior percentual de acerto durante os processos de desenvolvimento e validações dos meios de produção.

A Manufatura Aditiva (AM, do inglês, *Additive Manufacturing*) é a maior novidade na área da manufatura nas últimas três décadas (THOMPSON *et al.*, 2016, SOSSOU *et al.*, 2018). Ela tem como diferencial o método de fabricar por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente (VOLPATO, 2017). A AM oferece muitas vantagens sobre os processos de fabricação tradicional, que incluem a capacidade de fabricar objetos com geometrias complexas, fabricar com economia, lotes pequenos de produtos personalizados, menor desperdício de material e pouco espaço requerido (BERMAN, 2012). Devido ao enorme potencial e capacidades únicas, a AM vem gradativamente sendo aplicada em diversos setores, tais como: saúde, joias, decoração, arquitetura, aeroespacial, automotivo, entre outros.

Além disso, por meio desse processo torna-se possível desenvolver modelos físicos com geometrias complexas em um curto período de tempo sem a necessidade de vários equipamentos de alto custo (NOVAKOVA; KURIC, 2012). Ahmed *et al.* (2015) verificaram a viabilidade da aplicação da AM para planejar treinamentos e validações de montagem de componentes mecânicos. O estudo demonstrou que o uso da prototipagem rápida, para tal planejamento e validação, proporciona ganhos significativos em redução de tempo de montagem, horas de treinamento e menor possibilidade de erros humanos no processo de montagem.

Com a AM, surgiu o conceito de Projeto para Manufatura Aditiva (DFAM, do inglês *Design for Additive Manufacture*). Segundo Gibson *et al.* (2016) e Pereira (2001) o DFAM tem como propósito principal simplificar a estrutura topológica do produto, gerar redução de peso e proporcionar condições geométricas acessíveis para serem fabricadas por meio da AM. De acordo Chu *et al.* (2008) para obter sucesso no DFAM é necessário ter criatividade e pensar de forma inovadora. Plessis (2019), usando os

conceitos de DFAM, mostrou ser possível combinar oito componentes em apenas uma geometria, eliminando a montagem, reduzindo o peso em 40% e reduzindo significativamente o custo de fabricação da peça.

1.5. Objetivo

1.5.1. Objetivos geral

Desenvolver e validar um procedimento de DFAM que permita analisar a viabilidade e sistematizar o projeto de Peças Modelo para fabricação por meio AM.

1.5.2. Objetivos específicos

- Selecionar peças automotivas fabricadas convencionalmente por processos de fabricação distintos, e submetê-las ao procedimento de DFAM proposto;
- Analisar a viabilidade da fabricação por AM dentro dos requisitos e limitações levantadas.
- Realizar o planejamento de processo para fabricar as Peças Modelo por meio da AM
- Fazer avaliação metrológica das peças para validar a aplicabilidade do procedimento de DFAM e;
- Validar o procedimento comparando com peças fabricadas por processos convencionais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura de assuntos que dão suporte ao desenvolvimento do trabalho, tais como: Conceito de Peças Modelo e Dispositivo de controle dimensional, conceito e características do processo de AM com foco no princípio de extrusão de material, e por fim, abordagens e aplicações de DFAM.

2.1. Peças Modelo e Dispositivos de Controle Dimensional

2.1.1. Peças Modelo

As Peças Modelo são aquelas que atendem todos os critérios solicitados pelo cliente, tais como tolerâncias dimensionais e geométricas, material, aparência, entre outros. A confecção de uma Peça Modelo faz parte de um dos elementos exigidos para que se possa aprovar o PPAP de forma completa. De acordo com o manual (PPAP, 2020) a empresa deve reter uma Peça Modelo durante todo o período de fornecimento ou até que o produto seja substituído. Shrotri e Dandekar (2012) mencionam que as Peças Modelo são de suma importância para o processo de aprovação e garantia de qualidade do produto durante seu fornecimento, pois por meio da mesma é possível verificar de forma rápida e eficaz as condições dimensionais dos dispositivos de produção, podendo ser utilizada também como peça de referência para os operadores durante o processo de fabricação e liberação de setup de máquinas.

Ahmad *et al.* (2015) apresentam um exemplo de aplicação de Peça Modelo no planejamento de treinamentos e validações de montagem de componentes mecânicos. Peças Modelo foram confeccionadas por meio de AM e usadas, para elaborar a sequência de montagem de um conjunto de peças, e em seguida verificar os possíveis erros que podem ser cometidos pelos operadores durante o processo de montagem, erros que não são passíveis de serem identificados por meio dos Modelos Digitais em sistemas CAD (do inglês, *Computer Aided Design*). Os autores observaram que o uso de Peças Modelo, para tal planejamento e validação, proporcionou ganhos significativos em redução de tempo de montagem, horas de treinamento e menor possibilidade de erros humanos. Tendo como principal vantagem a interação dos operadores com o componente físico antes mesmo de ser introduzido de forma definitiva na linha de produção.

2.1.2. Dispositivo de Controle Dimensional

Pham e Lazaro (1990) mencionam que os dispositivos de controle dimensionais, tem como propósito inspecionar o dimensional das peças de forma rápida, conforme as especificações determinadas pelo departamento de Engenharia. Os dispositivos são concebidos, projetados e construídos seguindo as especificações de tolerâncias geométricas (GD&T, do inglês *Geometric Dimensioning and Tolerance*).

Os dispositivos podem ser feitos em resina, alumínio, aço, usinados em CNC (Comando Numérico Computadorizado) por cavidade total ou por torres de controle, dependendo da aplicação. Podem conter apenas elementos mecânicos de controle, ou utilizar sensores, relógios comparadores e sistemas integrados com softwares para geração e coleta de dados.

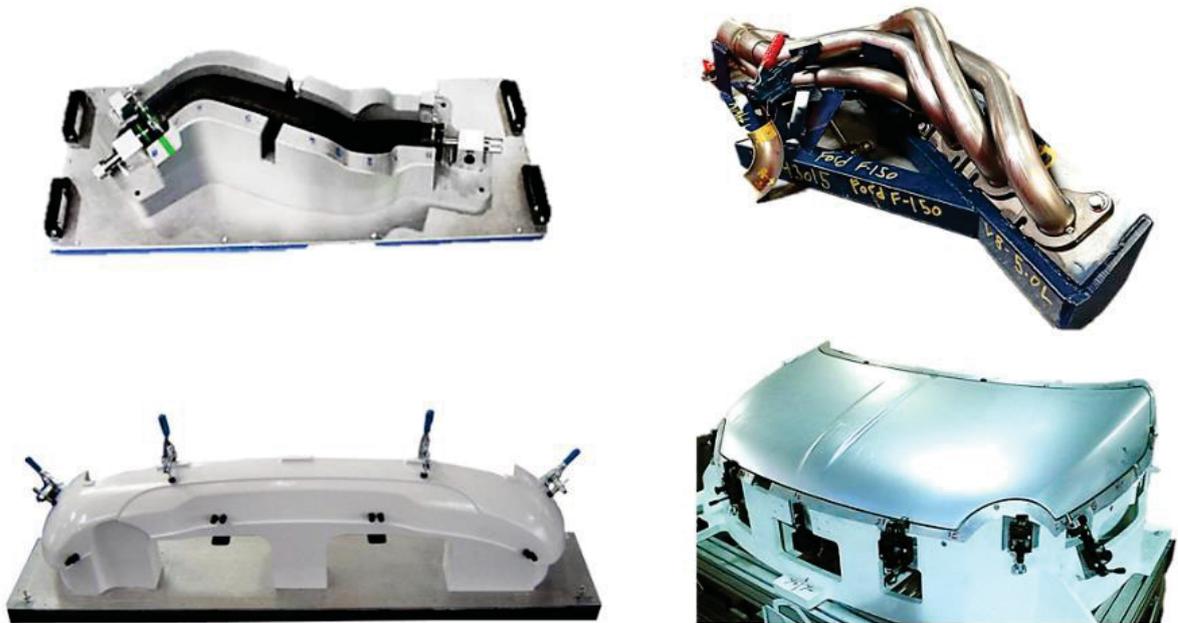
2.1.3. Aplicações dos Dispositivos de Controle Dimensional

Os dispositivos de controle dimensionais se aplicam tanto para peças plásticas, metálicas ou mesmo emborrachadas, ou seja, praticamente todos os setores da indústria utilizam.

As grandes montadoras exigem de seus fornecedores dispositivos de controle com o intuito de garantir que as peças sejam fornecidas dentro dos dimensionais exigidos, evitando assim não conformidades durante o processo de montagem e, conseqüentemente, possíveis paradas de linha. A FIGURA 1 ilustra alguns exemplos de aplicações, tais como dispositivos para controlar mangueiras de borracha, tubos metálicos, para-choques plásticos ou mesmo capô metálicos.

Um dos maiores desafios na confecção dos dispositivos de controle dimensionais está na redução de custo e tempo de manufatura. Isso acontece porque geralmente a fabricação de tais dispositivos exige o uso de equipamentos de usinagem CNC, máquinas de solda, mão de obra especializada, análises e validações em salas de medidas, entre outros processos. Com o objetivo de reduzir os custos e tempo de fabricação, algumas empresas já trabalham na integração da manufatura aditiva para confeccionar tais dispositivos. Alguns exemplos dessa aplicação serão apresentados na sequência.

FIGURA 1: Exemplos de aplicações dos dispositivos de Controle dimensional

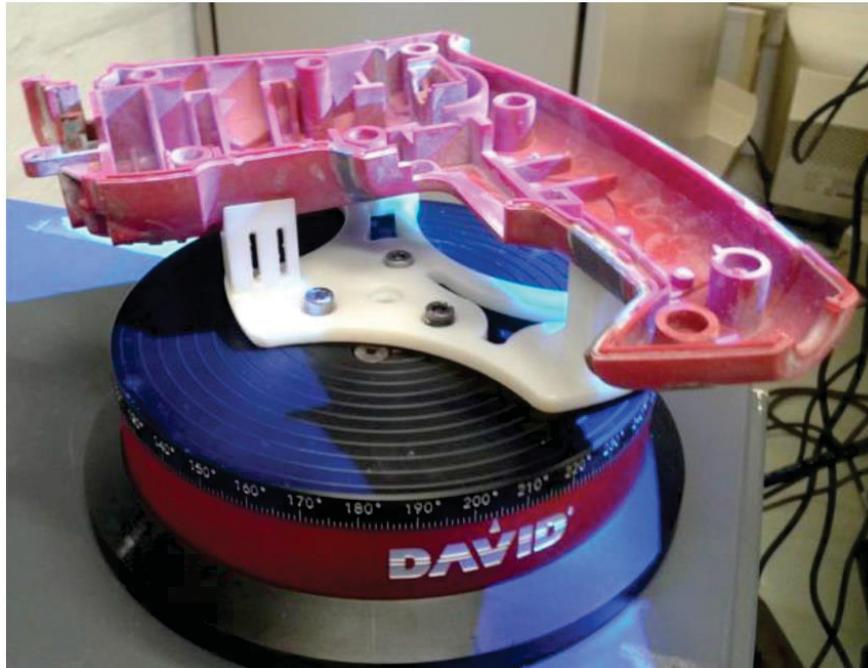


FONTE: O Autor (2020)

2.1.3.1. Exemplo de dispositivos auxiliares de escaneamento

De acordo com Zhou (2011) a engenharia reversa é uma das tecnologias que está sendo utilizada para remodelar produtos complexos. Em alguns casos é empregado o escaneamento 3D com o intuito de obter a geometria pré-definida, e em seguida realizar o remodelamento utilizando algum *software* CAD. Porém, para uma melhor precisão dimensional na obtenção dos pontos de escaneamento é recomendado o uso de dispositivos fixadores para manter a peça estática e livre de deformações. Krznar *et al.* (2016) propõem como solução o uso da AM para confeccionar tais dispositivos, visando obter agilidade e redução de custo na fabricação. Os autores descrevem um caso de fabricação de dispositivo utilizado para auxiliar no escaneamento de um corpo de furadeira, que pode ser visto na FIGURA 2 e concluíram que o procedimento melhorou a repetibilidade na coleta da nuvem de pontos.

FIGURA 2: : Dispositivo confeccionado por meio da AM, utilizado para o escaneamento da capa plástica de uma furadeira



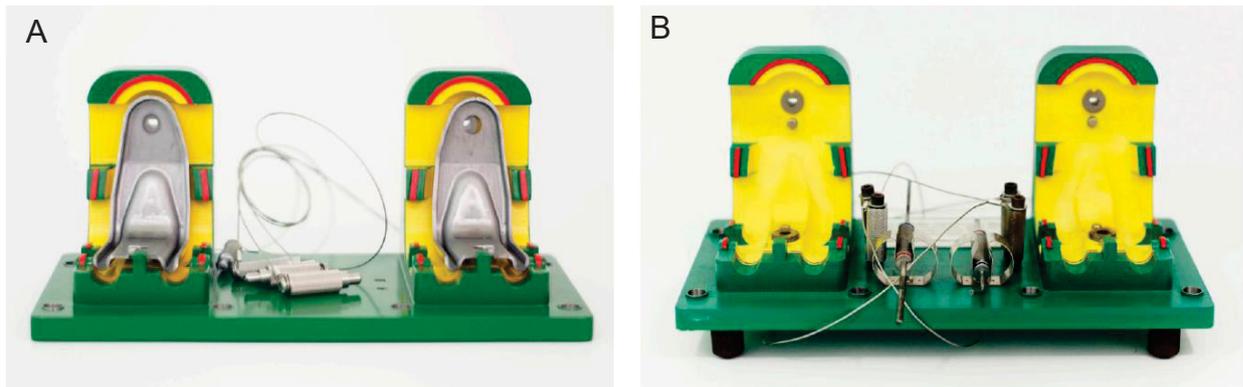
FONTE: KRZJAR, *et al.* (2016)

2.1.3.2. *Dispositivos de Controle Dimensional Híbridos*

Conforme mencionado anteriormente os dispositivos de controle dimensionais são amplamente utilizados nas fábricas de autopeças para certificar de forma rápida que o produto manufaturado está de acordo com o especificado em desenho. Muitos desses dispositivos são confeccionados em alumínio, e armazenados em prateleiras próximos à estação de uso, para que o operador possa ter rápido acesso para transportar até um local adequado. Porém, o tamanho e a geometria do dispositivo, pode gerar negativos impactos ergonômicos durante o transporte. Diante disso, a empresa japonesa TS Tech, fornecedora de componentes estampados para bancos automotivos, decidiu confeccionar um dispositivo de controle híbrido composto de componentes metálicos e componentes poliméricos confeccionados por meio da AM. Como resultado da fabricação desses dispositivos a empresa obteve um resultado além do esperado, sendo que houve uma redução significativa de 31% no custo final do dispositivo, redução de peso facilitando assim o transporte e por fim uma redução de seis para duas semanas para a confecção do dispositivo (TS TECH, 2018). Conforme

ilustrado na FIGURA 3 o *design* do dispositivo de controle em ambas condições é basicamente o mesmo, demonstrando assim a eficácia da AM aplicada para este setor.

FIGURA 3: (A) dispositivo produzido 100% em alumínio, (B) dispositivo híbrido, com componentes produzidos por meio de AM



FONTE: TS TECH (2018)

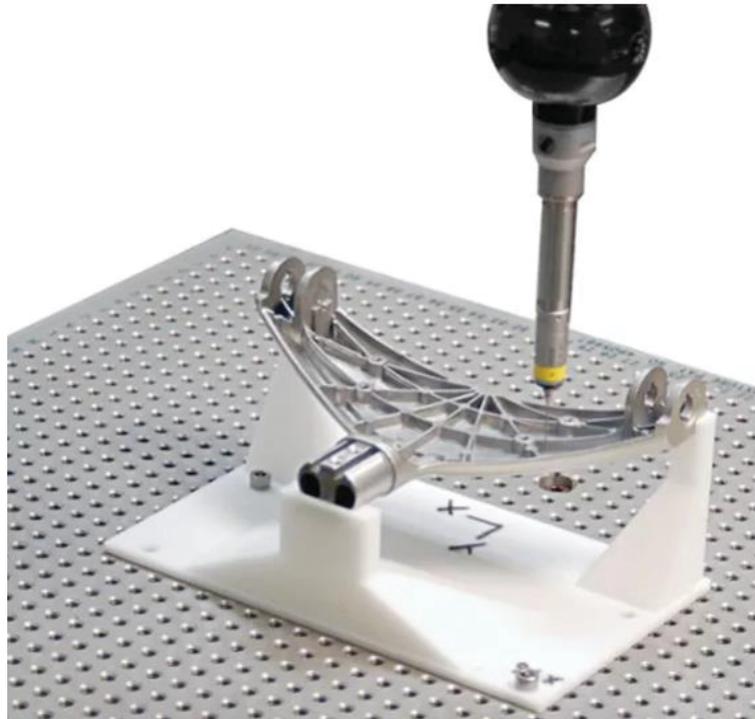
2.1.3.3. *Dispositivos auxiliares para máquinas de medição por coordenadas*

A máquina de medição por coordenadas é utilizada para verificar as condições geométricas e dimensionais das peças de forma rápida e precisa. É comum elaborar programação CNC para automatizar as medições, sempre respeitando o alinhamento determinado em desenho. Para que esta programação se torne eficiente se faz necessário o uso de dispositivo para imobilizar a peça. A empresa ORECK, fabricante de aspirador de pó, decidiu inovar na confecção destes dispositivos. Com a ajuda da AM confeccionou um dispositivo (FIGURA 4) que proporcionou uma redução de custo de 78%, sem comprometer a confiabilidade da medição da máquina (STRATASYS, 2018).

2.1.3.4. *Dispositivos de controle dimensional confeccionado por AM*

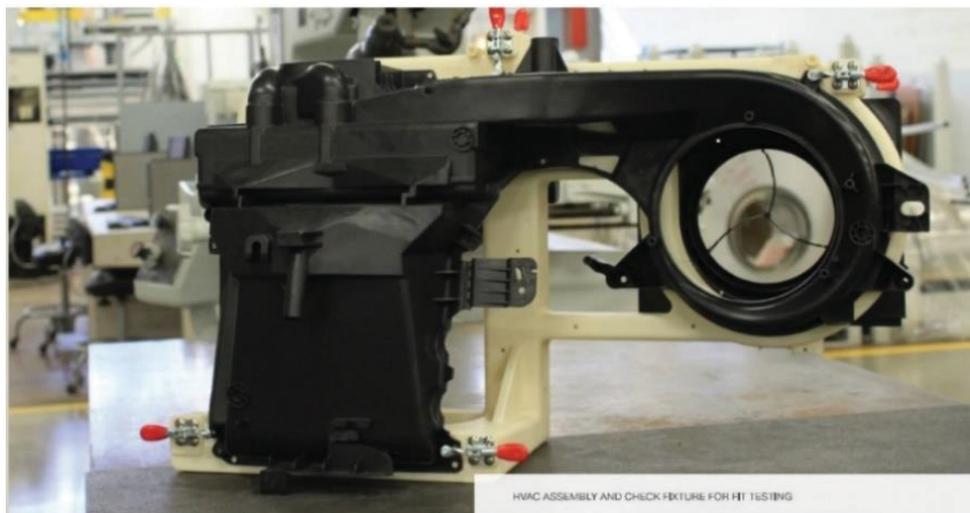
Mahle (2018) comenta sobre a redução de tempo na confecção dos dispositivos complexos por meio da AM, pois durante uma necessidade especial eles foram capazes de produzir um dispositivo de controle (FIGURA 5) com geometrias complexas em menos de uma semana, sendo que por meio dos métodos convencionais levaria entre quatro e cinco semanas.

FIGURA 4: Dispositivo auxiliar confeccionado por meio da AM para uso em máquinas de medição por coordenada



FONTE: Stratasys (2018)

FIGURA 5: Dispositivo de controle manufaturado por meio da AM



FONTE: Mahle (2018)

2.2. Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva é definida como um método de fabricação de adição de camadas de materiais de forma sucessiva e planas, a tecnologia permite fabricar diversos objetos físicos em três dimensões (VOLPATO, 2017).

Conforme exemplificado na FIGURA 6, de uma forma geral, o processo se inicia com o fatiamento de um modelo 3D em camadas, em seguida estabelecendo a trajetória da manufatura do objeto e seus respectivos parâmetros (velocidade, qualidade, temperatura, etc.). Por fim a construção do modelo a partir do empilhamento dessas camadas até a finalização do objeto (VOLPATO, 2017; GIBSON *et al.*, 2016).

FIGURA 6: Visão geral do fluxo de fabricação por meio da AM



FONTE: Volpato (2017)

O termo Manufatura Aditiva é mais recente, até por volta de 2015 o termo amplamente utilizado era Prototipagem Rápida (PR) pois desde o seu surgimento era essa a principal aplicação do processo. Entretanto, devido ao surgimento de novas tecnologias e variedade de novos materiais houve ampliação nas áreas de aplicação, principalmente em produtos para uso final. Diante disso, um comitê técnico da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) adotou o termo Manufatura Aditiva como o novo termo para esse processo de fabricação (GIBSON *et al.*, 2016).

Conforme descreve a norma ISO/ASTM 52900:2015 (2015), o processo de AM é dividido em sete grupos, sendo: (a) Extrusão de Material, (b) Foto polimerização em Cuba, (c) Jateamento de material, (d) Adição de laminas de folhas, (e) Fusão de Leito de pó, (f) Jateamento de Aglutinante, (g) Deposição com Energia Direcionada. Os sete grupos são diferenciados pelo princípio de processamento do material. Neste trabalho o princípio de extrusão de material será empregado no procedimento experimental. Portanto, as seções seguintes são focadas nesse princípio.

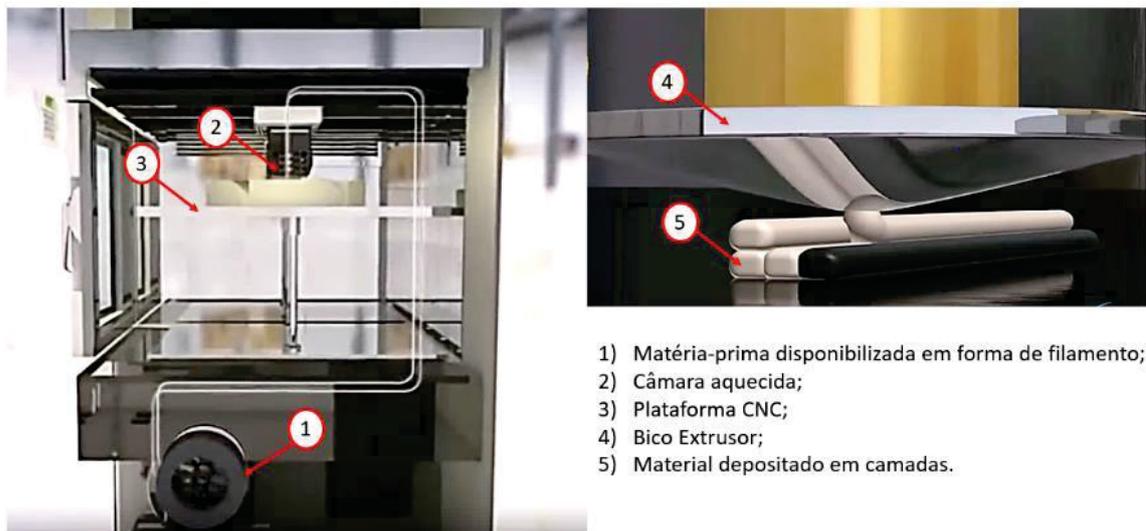
2.2.1. Princípio de Extrusão de Material

A manufatura pelo princípio de extrusão de material é a tecnologia de AM mais comum e popular do mercado. Inspirada na tecnologia patenteada como Modelagem por Fusão e Deposição (FDM, do inglês *Fusion Deposition Modeling*) pela empresa Stratasys em 1992, a qual tem como fundador o Scott Crump (VOLPATO, 2007; GIBSON *et al.*, 2016).

Na FIGURA 7 pode ser visto o princípio de extrusão de material onde o objeto é fabricado por meio da deposição sucessiva de material termoplástico na forma de filamento. Este material é empurrado sobre pressão para dentro de uma câmara quente e em seguida acontece a extrusão pelo interior de um bico de alta precisão. Após a deposição da primeira camada, uma nova camada é sobreposta a anterior, e então este processo é repetido inúmeras vezes até a conclusão do objeto (VOLPATO, 2007).

O princípio de extrusão de material necessita de estrutura de suporte para fabricar objetos que possuem regiões suspensas ou desconectadas momentaneamente da peça. As máquinas que possuem apenas um extrusor confeccionam suportes com o mesmo material de base, porém quebradiços e de menor densidade, para facilitar a remoção durante o pós processamento. Agora quando a máquina apresenta mais de um extrusor é possível utilizar materiais solúveis tais como HIPS (Poliestireno de Alto Impacto) e PVA (álcool polivinílico) (VOLPATO, 2017).

FIGURA 7: Máquina de extrusão de material e composição de componentes



- 1) Matéria-prima disponibilizada em forma de filamento;
- 2) Câmara aquecida;
- 3) Plataforma CNC;
- 4) Bico Extrusor;
- 5) Material depositado em camadas.

FONTE: O Autor (2020)

Esta tecnologia não usa laser e não depende de processos posteriores de pós-cura, tornando assim o processo de fabricação mais barato, pois consome menos energia elétrica e materiais de pós-cura (MALVAR, 2008).

O princípio de extrusão de material está em expansão, atualmente existe máquinas que podem ser utilizadas no ambiente industrial ou residencial conforme apresentado no QUADRO 1, sendo diferenciadas pelos seus respectivos tamanhos, precisões, tecnologia embarcada, entre outros fatores que influenciam diretamente no custo.

QUADRO 1: Exemplos máquinas que utilizam o princípio de extrusão de material

Máquinas de Desktop		
3D Cube Pro+	Makerbot Mini	Ender-3
		
Máquinas Indústrias		
Fortus 380/450mc	Stratasys F900	Dimension Elite
		

FONTE: O Autor (2020)

A Manufatura Aditiva está sendo empregada atualmente em diversas áreas, tais como Medicina, Desenvolvimento de Produto, Engenharia, Linhas de Produção, *Design*, etc. Pois, com o auxílio desta tecnologia torna-se possível desenvolver modelos físicos com geometrias complexas em um curto período de tempo sem a necessidade de uma diversidade de equipamentos caros (NOVAKOVA e KURIC, 2012), trazendo assim benefícios financeiros e agilidade nos estudos e desenvolvimentos de novos projetos, cirurgias, entre outros.

2.2.2. Exemplos de Aplicações da AM por Extrusão de Material

Em *Rapid Prototyping Report* (2015) é apresentado um exemplo de aplicação industrial da AM. Os Engenheiros da Volkswagen (VW) durante o desenvolvimento da caixa de câmbio da linha Golf enfrentaram dificuldade para visualizar o modelo CAD devido à extrema complexidade. Portanto, resolveram realizar um estudo de validação do produto por meio da fabricação de um protótipo. Porém, o custo e o tempo para fabricação do protótipo por métodos convencionais seriam inviáveis. Como alternativa, resolveram utilizar o processo de AM para confeccionar o protótipo. A fabricação levou em torno de 10 dias, foi utilizado para validar o *Design* e em seguida para desenvolver o molde de fundição, para fabricar o protótipo metálico. Como resultado, houve uma redução de tempo de desenvolvimento do protótipo de oito semanas para duas semanas.

A empresa Stratasys (2018) relata um estudo de caso da montadora de veículos da BMW que possuía em seu processo de montagem diversas etapas que utilizam dispositivos auxiliares para realizar alinhamento das peças a serem montadas. Para realizar a montagem do pára-choque a montadora utiliza um dispositivo confeccionado em alumínio e não adequado ergonomicamente para os operadores devido ao *design* e peso excessivo. Com o propósito de melhorar as condições de trabalho, a montadora decidiu redesenhar o dispositivo e confeccioná-lo por meio da AM conforme representado na FIGURA 8. Após conclusão, o novo dispositivo mostrou ser 72% mais leve quando comparado ao anterior, 58% mais barato e o tempo para produzir o dispositivo reduziu em 92%, pois houve uma redução de produção de dezoito dias para um dia e meio.

A empresa 3D systems (2019) traz exemplos de aplicações da AM na confecção de dispositivos, um dos exemplos destacados é da confecção de dispositivos modulares para auxiliar na usinagem de superfícies de peças que exigem contatos precisos durante a montagem. Para assegurar a correta usinagem usualmente são utilizados dispositivos fixadores para posicionar a peça dentro do centro de usinagem CNC. Os dispositivos atuais não permitem geometrias complexas e são confeccionados por meio de materiais metálicos, tornando assim custosos. Portanto, com o propósito de obter redução de tempo e custo, foi desenvolvido um dispositivo modular por meio da AM conforme ilustrado na FIGURA 9. Os resultados reportados foram promissores, pois proporcionaram em torno de 40% de redução de

custo e maior agilidade na implementação do dispositivo na linha de produção. Dvibyz (2020) traz um conceito de dispositivo híbrido para auxiliar na montagem de peças plásticas com geometrias não convencionais. Os dispositivos basicamente são compostos por uma base metálica para proporcionar uma melhor rigidez utilizando torres de apoio fabricadas por meio da AM, conforme destacado na FIGURA 10. As superfícies de apoio são moldadas conforme a superfície da peça plástica, proporcionando assim um melhor assentamento da peça e evitando possíveis movimentações. Para concluir, a empresa reporta que por meio deste conceito de dispositivo é possível reduzir em 60% os custos de mão-de-obra e matéria-prima quando comparado aos dispositivos manufaturados por processos convencionais.

FIGURA 8: Dispositivo de montagem utilizado no processo de fabricação da BMW



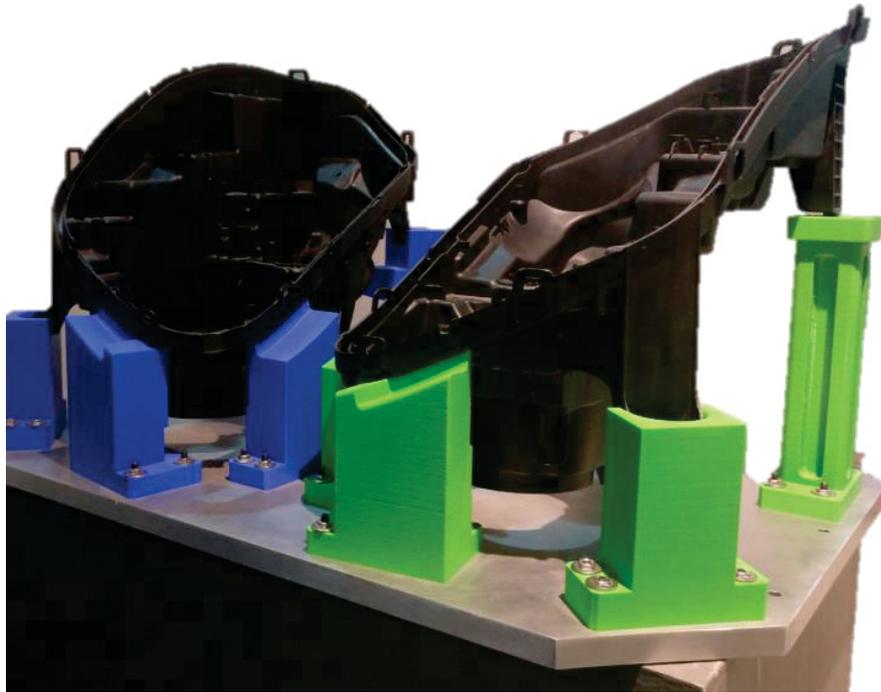
FONTE: Stratasys (2018)

FIGURA 9: Dispositivo Auxiliar utilizado para Usinagem de peças metálicas



FONTE: 3Dsystems (2019)

FIGURA 10: Dispositivo híbrido utilizado para montagem de peças plásticas



FONTE: DVIBYZ(2020)

2.2.3. Materiais utilizados pelo princípio de extrusão de material

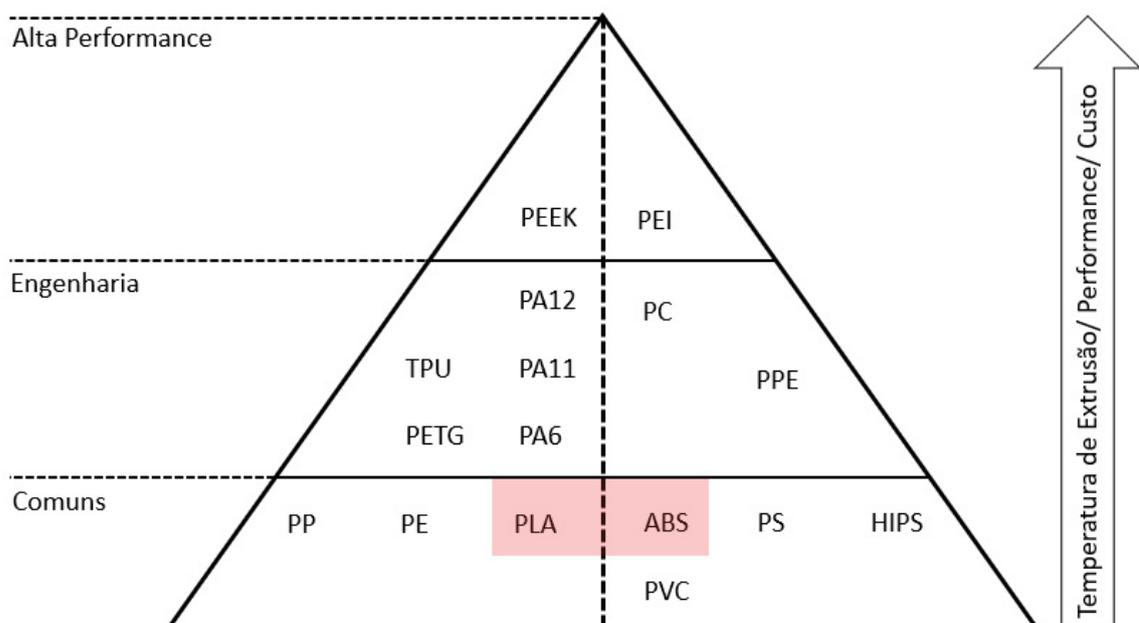
Diversos polímeros termoplásticos podem ser processados por meio da tecnologia de extrusão de material. Entretanto, conforme ilustrado na FIGURA 11, os polímeros mais usuais são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e Ácido poliláctico (PLA). De acordo com Wang (2017) tais materiais são comumente utilizados, pois possuem baixa temperatura de fusão. Um dos principais benefícios dos materiais termoplásticos no processo de extrusão de material, é o baixo custo de beneficiamento e venda, desta forma proporcionando uma maior acessibilidade da aquisição do material ao público.

O ABS possui excelentes propriedades térmicas, porém durante a fabricação de peças tende a gerar um odor desagradável. Para eliminar esta variável recomenda-se utilizar máquinas fechadas, além disto faz-se necessário que o equipamento possua uma plataforma aquecida, a fim de garantir a ancoragem da peça durante o processo de fabricação. Diversos estudos mostram que a adição de compósitos na matriz

polimérica do ABS proporciona ganhos significativos para os produtos tais como: Melhora na condutividade térmica, redução do coeficiente de expansão, melhor condutividade elétrica, maior resistência mecânica, entre outras (DUL *et al.*, 2016; PARANDOUSH; LIN, 2017).

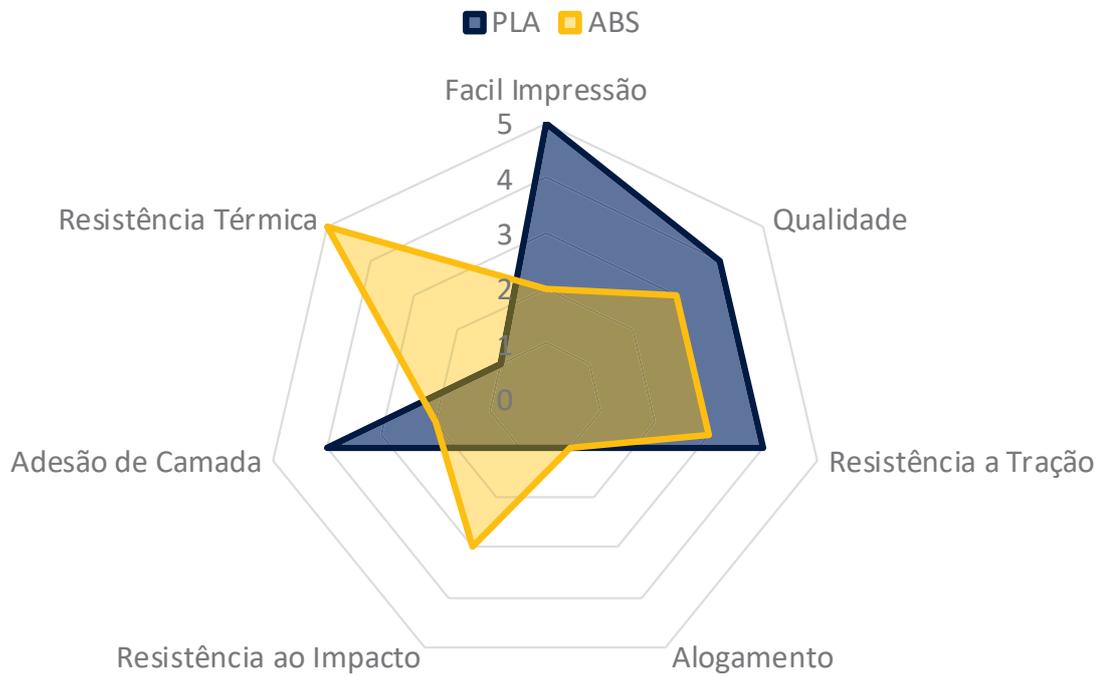
Conforme Kim (2017) o PLA é um polímero termoplástico e biodegradável, produzido através de ácido polilático, derivado a partir de recursos naturais renováveis por fermentação de polissacarídeos ou açúcar extraído de vegetais. Este polímero possui boas propriedades mecânicas quando comparado a outros polímeros tais como: PS, PP, PE, etc. Porém conforme ilustrado na FIGURA 12, infelizmente o PLA apresenta um comportamento mecânico frágil, devido possuir baixa capacidade em se deformar. Limitando assim seu uso em aplicações que necessita deformações plásticas (KIM, 2017). Segundo Daver (2018) o PLA se tornou um forte candidato para substituir os polímeros derivados de petróleo. E para que isso se torne viável diversas pesquisas referentes a combinações de compósitos biodegradáveis já foram feitas, tais como adição de celulose, fibra de coco, fibra de bambu, etc. Todas as pesquisas demonstraram melhoras significativas nas propriedades mecânicas, térmicas, entre outros.

FIGURA 11: Principais Materiais utilizados em AM para Extrusão de Material



FONTE: Adaptado de 3DHubs (2020)

FIGURA 12: Propriedades dos materiais ABS e PLA

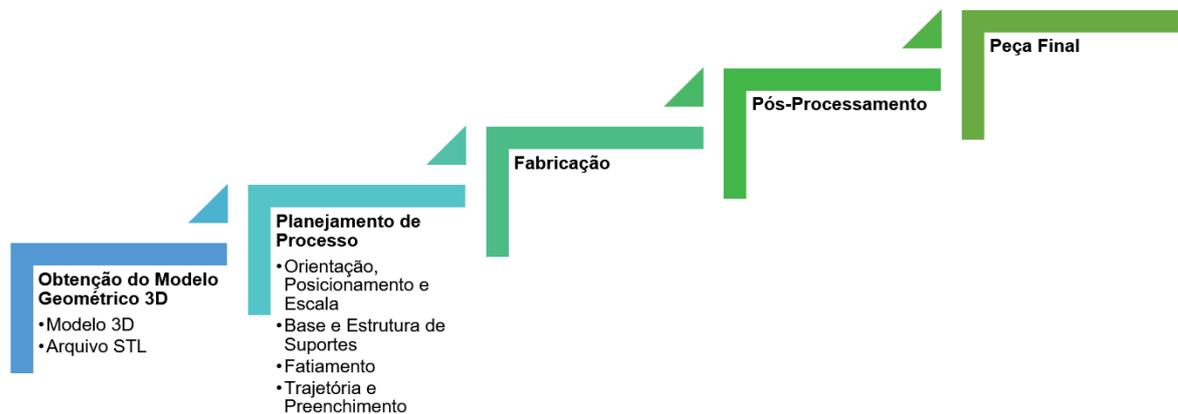


FONTE: Adaptado de 3DHbus (2020)

2.3. Planejamento De Processo para AM

Conforme ilustrado na FIGURA 13, a fabricação de produtos por meio da AM, tem como processo inicial a aquisição do modelo CAD 3D (CAD, do inglês, *Computer Aided Design*), este modelo pode ser obtido por meio de sistemas de modelagem, tais como: SolidWorks, Catia, Creo parametric entre outros. Ao concluir o modelo, inicia-se a etapa de Planejamento de Processo, nesta etapa são definidos os parâmetros do fatiamento, orientação da peça, qualidade superficial, velocidade, entre outros. Em seguida o objeto é fabricado por meio de um equipamento de AM e por fim submetido a pós-processamento como limpeza, pós-cura e acabamento superficial (VOLPATO, 2017).

FIGURA 13: Etapas e Planejamento de processo para AM



FONTE: Adaptado de Volpato (2017)

2.3.1. Aquisição da representação geométrica 3D

Conforme reportado na FIGURA 14, atualmente existem três formas de obter o Modelos 3D para posteriormente serem convertidos em arquivo STL (*STereoLithography*). Sendo por meio dos *Softwares* CAD, Scanners Industriais e Scanners Médicos com a tomografia computadorizada.

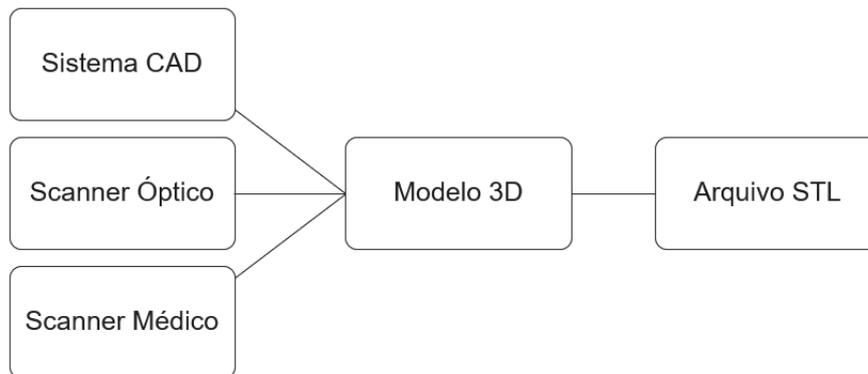
Sistemas CAD disponibiliza modelos geométricos sólidos ou de superfície. Quando a modelagem é realizada através das operações de modelos sólidos geralmente o modelo possui uma uniformidade geométrica, desta forma não sendo necessário cuidados especiais. Porém, quando o modelo é projetado por operação de superfície é necessário sempre assegurar o fechamento total da superfície. Para tornar isso possível, é importante garantir interseções bem definidas nas superfícies de formação do modelo e evitar falhas nas conexões das superfícies (VOLPATO, 2017).

Os Scanners Industriais são uma excelente ferramenta para obter os modelos 3D, pois por meio deste equipamento é possível fazer uma leitura de um objeto físico e transformar estes dados em nuvens de pontos que serão posteriormente filtrados e então convertidos em superfícies para originar o modelo virtual (VOLPATO, 2017; MALVAR, 2008).

De acordo com Bagaria (2011) o terceiro método são os Scanners Médicos como a tomográfica computadorizada ou ressonância magnética. Estes procedimentos dão origem as imagens segmentadas do corpo humano, sendo que os segmentos

podem ser tratados com auxílio de *softwares* específicos e então remodelados para que se tornem um modelo CAD.

FIGURA 14: Fluxograma ilustrativo das possíveis formas de aquisição do Modelo 3D



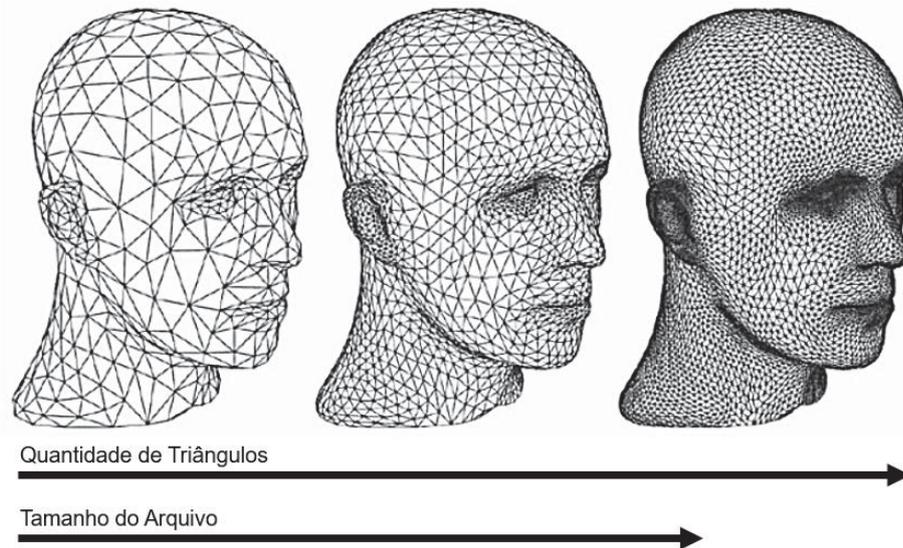
FONTE: Adaptado de Volpato (2017)

2.3.1.1. Arquivo STL

Muitos são os formatos de arquivo utilizados em sistemas de Manufatura Aditiva, mas o STL padrão é amplamente utilizado. A sigla STL é derivada do *STereoLithograh*y, que foi a primeira tecnologia de AM comercializada na história, isso em 1987 pela empresa 3D Systems. Considerado um padrão de fato, o STL é uma maneira simples de descrever um modelo CAD em termos de sua geometria. Basicamente, é um formato que não mantém informações hierárquicas e dos recursos de modelagem da peça, e descreve apenas a superfície do modelo na forma de uma malha de triângulos não ordenados e irregulares. O tamanho e quantidade desses triângulos podem ser definidos no sistema CAD, sendo que o objetivo é garantir uma superfície com facetas não visíveis de modo a não comprometer a qualidade superficial da peça impressa. O formato STL tem como função armazenar as informações geométricas das malhas triangulares. Essas informações podem ser descritas na codificação ASCII ou binária. As codificações visam salvar os componentes dos vetores e definir as coordenadas dos vértices. As faces dos triângulos originados são descritas em três pontos que representam as interseções. Além disto o STL fornece as coordenadas dos três vértices de cada triângulo da malha e o vetor normal da face do triângulo. Para modelos simples as superfícies podem ser representadas com poucos

triângulos, e para modelos com maior resolução serão necessários maior quantidade de triângulos, conforme exemplificado na FIGURA 15.

FIGURA 15: Diagrama ilustrativo demonstrando a influência da quantidade de triângulos e tamanho do arquivo STL, em função da resolução do modelo 3D



FONTE: Adaptado de 3Dlab (2020)

2.3.2. Planejamento de Processo para AM

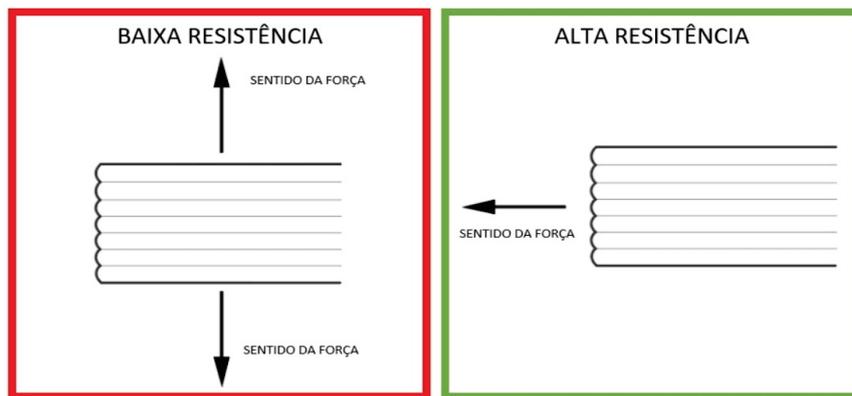
Esta etapa é uma das etapas de maior importância para a fabricação das peças por meio de AM, pois as decisões tomadas nesta etapa determinam o resultado final em termos de custo, tempo de fabricação, propriedades mecânicas, precisão dimensional e acabamento superficial. O planejamento de processo para AM é dividido entre as seguintes tarefas: Orientação da peça na plataforma de manufatura, fator de escala, definição de estrutura de suporte, tipo e percentual de preenchimento, trajetória de preenchimento, fatiamento computacional do objeto e por fim o envio dos dados ao equipamento de AM (VOLPATO, 2017).

2.3.2.1. Orientação para fabricação

Na primeira etapa do planejamento é determinada a orientação da peça em relação a plataforma a de fabricação. Por meio desta orientação é determinado quais regiões da peça irão apresentar melhor acabamento superficial, resistência mecânica

e precisão dimensional. Todas as peças tendem a apresentar desvios dimensionais na direção Z, estes desvios são inerentes à espessura das camadas. Em geral as precisões dimensionais serão melhores nos eixos XY, portanto os detalhes importantes das peças devem estar orientados nestes eixos. As propriedades mecânicas das peças manufaturadas estão amplamente relacionadas a anisotropia dos materiais, ou seja, propriedades de dureza e resistência mecânica podem apresentar valores diferentes em função da direção de medição. Portanto, peças orientadas nas direções XY irão apresentar melhor resistência quando comparado a direção Z (VOLPATO, 2007). Geralmente o eixo Z de uma peça fabricada por manufatura aditiva possui maior fragilidade quando a força é aplicada no sentido de tração, tendo como explicação a possibilidade de separação das camadas conforme ilustrado na FIGURA 16.

FIGURA 16: Comparação do sentido vetorial da força em função da linha de camada depositada



FONTE: Adaptado 3DHubs (2020)

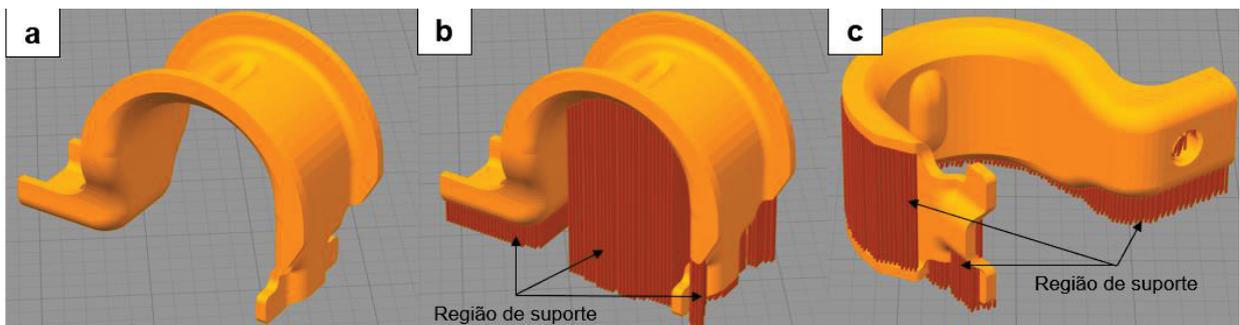
2.3.2.2. Fator de Escala

Os materiais utilizados para os processos de AM, principalmente os poliméricos, apresentam taxa de contração, devido ao gradiente de resfriamento posterior à fabricação. Esta contração pode trazer variações dimensionais à peça. Portanto, para evitar tal efeito faz-se necessário aplicar por meio do fator de escala a correção do modelo 3D, com o objetivo de alcançar as dimensões nominais estabelecidas em projeto. A definição do fator de escala é geralmente obtida por meio de testes empíricos, pois os valores dependem muito do tipo de material, temperatura, calibração da máquina entre outros. Desta forma, deve-se obter um fator médio para cada eixo, determinando assim o desvio padrão de menor erro para que se possa ter um controle dimensional em todas as faixas de tamanho (VOLPATO, 2017).

2.3.2.3. Base e Estruturas de Suporte

Conforme já comentado anteriormente as regiões de suporte não são desejáveis para o processo, pois provocam o uso de maior quantidade de material e conseqüentemente implica em um acréscimo de tempo e custo para a fabricação dos objetos (VOLPATO, 2017). Para enfatizar os comentários acima a FIGURA 17 ilustra um exemplo de aplicação de suporte em função da orientação da peça. Sendo que para confeccionar a peça com orientação no sentido vertical (b) da plataforma seria necessário o uso de 12 metros de filamento e uma hora e vinte minutos de fabricação. Porém caso a orientação venha a ser feita no sentido horizontal (c) da plataforma, seria necessário o uso de 9 metros de filamento e uma hora de fabricação. Portanto com uma simples mudança de orientação ocasionaria uma redução de 3 metros de material e vinte minutos em tempo de fabricação. Esta redução significativa tem como justificativa a quantidade de material de suporte gerado em ambas as orientações, sendo que na orientação horizontal (c) a quantidade é menor quando comparado a orientação (b).

FIGURA 17: (a) Modelo CAD do componente sem adição de suporte, (b) Modelo orientado do sentido vertical com adição de suporte, (c) Modelo orientado no sentido horizontal (XY) com adição de suporte



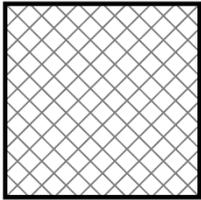
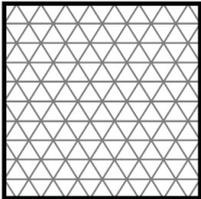
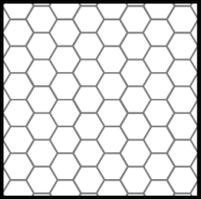
FONTE: O Autor (2020)

2.3.2.4. Trajetória de Contorno e Preenchimento

As trajetórias de preenchimento têm como finalidade definir e processar a região de deposição do material dentro dos limites de contorno. Será nesta etapa que as configurações de camadas serão estabelecidas. No caso do princípio de extrusão de material são definidas as trajetórias de contorno e preenchimento da peça. Dependendo das condições físicas e aplicabilidade da peça, o preenchimento pode ser

feito de forma percentual. Este recurso possibilita criar peças com vazios internos com diferentes geometrias conforme demonstrado na FIGURA 18 e QUADRO 2. Este recurso tem como objetivo reduzir custo de fabricação, peso e alterar a resistência mecânica.

QUADRO 2: Preenchimentos mais usuais para AM de Extrusão de Material

Padrão	Descrição
	<p>Retangular - Possui resistência em todas as direções e é razoavelmente rápido para imprimir. Requer que a impressora faça a menor quantidade possível de ponte através do padrão de preenchimento.</p>
	<p>Triangular ou diagonal - Usado quando a força é necessária na direção das paredes. Os triângulos demoram um pouco mais para serem impressos.</p>
	<p>Wiggle - Permite que o modelo seja macio, torça ou comprima. Pode ser uma boa escolha, principalmente com um material de borracha</p>
	<p>Colméia - Como o nome indica, esse padrão produz uma estrutura em favo de mel. Este padrão de preenchimento é bom para impressões que requerem resistência mecânica moderada.</p>

FONTE: Adaptado de 3DHubs (2020)

FIGURA 18: Percentual de preenchimento, 20% (esquerda), 50% (centro) e 75% (direita)



FONTE: Adaptado de 3DHubs (2020)

2.3.2.5. Pós-Processamento

O pós-processamento é uma etapa adicional necessária para determinadas tecnologias de AM e esta etapa visa realizar os últimos ajustes na peça para atender os requisitos da aplicação desejada. Podendo exigir trabalhos manuais, processamentos químicos, usinagem, tratamento superficial, entre outros (VOLPATO, 2017). Com o intuito em dar ênfase na tecnologia aplicada neste trabalho, serão mencionados apenas os pós-processamentos inerentes ao processo de extrusão de material, sendo: a) Limpeza da peça; b) Retirada dos materiais de estrutura de suportes; c) Técnicas de tratamento para acabamento superficial (FIGURA 19); (d) Lixamento; e) Pintura, texturização, revestimento, etc.

Portanto, em resumo as peças podem ser utilizadas da forma que são extraídas da máquina ou podem passar por pós-processamento, dependendo da exigência do cliente e aplicabilidade.

FIGURA 19: Exemplo de peça com e sem Pós-Processamento. Peça da esquerda sem pós-processamento e da direita pós-processada com vapor de acetona 100%.



FONTE: AII3DP (2020)

2.4. Projeto Para Manufatura Aditiva (DFAM)

O Projeto para Manufatura Aditiva (DFAM, do inglês *Design for Additive Manufacture*) deriva-se da metodologia de Projeto para Manufatura e Montagem (DFMA, do inglês *Design for Manufacture and Assembly*). Ambas as metodologias ou junção delas visam facilitar a fabricação das peças, otimizar as características físicas tais como peso, resistência mecânica, maximizar o desempenho do produto, redução de custo e tempo de fabricação. Sendo que a principal diretriz do DFAM é a simplificação da estrutura do produto e redução de custo (GIBSON *et al.*, 2016; BOOTHROYD, 2011 e PEREIRA, 2001).

Um projeto alemão chamado “Regra de projeto para manufatura direta” (DMDR, do inglês *Direct Manufacturing Design Rule*) estabeleceu regras de projeto (focadas na geometria) para manufatura por Sinterização Seletiva a Laser (SLS, do inglês *Selective Laser Sintering*), Fusão Seletiva a Laser (SLM, do inglês *Selective Laser Melting*) e processos de extrusão de material. Teve como objetivo desenvolver regras de projeto para AM de forma a torná-los independentes de função, facilmente transferíveis em projetos e que fossem referência para outras tecnologias de AM. Esse projeto levou ao desenvolvimento de uma base de regras de projeto. Ele define três elementos geométricos padrão (e seus atributos geométricos) cuja combinação pode levar a quase qualquer forma. Adam e Zimmer (2014) aplicaram essas regras em um estudo experimental com três equipamentos de AM (com configurações específicas) e analisaram a influência da aplicação dessas regras na melhoria da qualidade do projeto. De maneira semelhante, Thomas (2009) desenvolveu regras de projeto voltadas para a tecnologia SLM. Kranz, Herzog e Emmelmann (2015), usando entidades geométricas básicas e um conjunto de experimentos práticos, produziram um banco de dados estruturado de diretrizes básicas de projeto focadas na fabricação aditiva a laser (LAM, do inglês, *Laser Additive Manufacturing*) com liga de TiAl6V4. Eles estudaram a influência da orientação das peças na precisão dimensional e qualidade superficial.

Diferentes abordagens de DFAM com objetivo central distintos tem sido propostas. Tang e Zhao (2016) fazem uma revisão abrangente de métodos de DFAM e os classifica em dois grupos principais: métodos DFAM para desempenho funcional e métodos gerais. O primeiro grupo se concentra principalmente no objetivo específico que é o desempenho funcional, seja térmico, ou estático, dinâmico, de atuadores e

sensores, ou então para aplicações biomédicas. O segundo grupo de métodos de DFAM gerais, foram formulados recentemente e levam em consideração tanto a funcionalidade quanto outros objetivos do ciclo de vida do produto, como custo e capacidade de fabricação, tais como os de Rosen (2007), Chu *et al.* (2008), Ponche *et al.* (2012) e Boyard *et al.*, (2014).

Booth *et al.* (2016) classificam as metodologias de DFAM em três grupos com focos diferentes, são eles: (1) no método de projeto, (2) na tecnologia de AM e (3) nas diretrizes de DFAM. O primeiro grupo propõe métodos de projeto específicos que utilizam manufatura aditiva ou descrevem como o DFAM deve fazer parte de todo o processo de projeto. No entanto, nem todos fornecem detalhes específicos sobre os métodos propostos, em vez disso, defendem mais pesquisas, (PONCHE *ET AL.*, 2012, GIBSON *ET AL.*, 2016, VAYRE *ET AL.* 2012, ROSEN *ET AL.* 2007, YANG E ZHAO, 2015). O segundo grupo, pesquisa diferentes abordagens para superar as limitações da AM, tais como manufaturar detalhes pequenos ou reduzir a necessidade de estruturas de apoio. Aplicações específicas, que agora são possíveis com AM frequentemente requerem um processo sob medida. Isso pode ter um impacto significativo no resultado dos produtos. Um exemplo é a capacidade de emular sistemas biológicos naturais, que só agora é possível devido às liberdades da AM, (ADAM; ZIMMER, 2014, GIBSON *et al.* 2016, PONCHE *et al.*, 2012, PLESSIS *et al.* 2019). O terceiro grupo se concentra nas diretrizes gerais do DFAM que destacam os desafios exclusivos da AM. Estas diretrizes são geralmente destinadas a serem usadas em qualquer momento durante o projeto, (ADAM; ZIMMER, 2014, ROSEN *et al.* 2007, YANG; ZHAO, 2015).

Kumke *et al.* (2016) propuseram uma nova classificação para DFAM que distingue entre "DFAM no sentido estrito" e "DFAM no sentido amplo". O primeiro inclui abordagens relativas ao processo atual de projeto, por exemplo, diretrizes e metodologias que apoiam os engenheiros de projeto em suas principais tarefas de criação de produtos utilizando as potencialidades da AM. O segundo, contém abordagens adicionais ao processo de projeto central, com atividades anteriores e posteriores ao DFAM e também atividades genéricas relacionadas a DFAM realizadas no desenvolvimento de novos produtos. Os autores notaram que as contribuições existentes no campo do DFAM influenciam diferentes estágios do projeto do produto e, como tal, apenas a otimização local é alcançada. Para uma melhor integração, eles propuseram uma metodologia de DFAM que combina o procedimento geral de projeto

sistemático com todos os tipos existentes de métodos e ferramentas de DFAM. A estrutura desenvolvida guia o projetista para uma solução de problemas de projeto.

Independente da forma como as abordagens de DFAM são agrupadas, na próxima seção serão apresentadas com mais detalhes e aplicações, aquelas mais relevantes.

2.4.1. Abordagens e metodologias de DFAM

Booth *et al.* (2017) apresenta uma abordagem de um procedimento DFAM planilhado o qual tem como função principal orientar os usuários em relação às possíveis decisões a serem tomadas antes de iniciar a manufatura do objeto por meio da AM. Conforme ilustrado na FIGURA 20 a planilha é composta por oito principais parâmetros o quais devem ser preenchidos e pontuados pelo usuário conforme as características físicas da peça a ser manufaturadas. Ao terminar o preenchimento será concedida uma nota final para auxiliar o usuário na tomada de decisão em relação à fabricação do componente por meio da AM.

Sendo que, nota superior a 33 pontos indica que o *design* da peça deve ser modificado, notas entre 24-32 pontos sugere uma revisão no *design* da peça, notas entre 16-23 pontos mostra uma probabilidade moderada de obter sucesso na fabricação da peça e por fim notas entre 8-15 sinaliza uma maior probabilidade de sucesso de fabricação da peça por meio da AM. É importante ressaltar que caso os parâmetros grifados na primeira e segunda coluna (FIGURA 20) venham a ser preenchidos, o usuário é instruído a procurar métodos convencionais para manufaturar as peças, devido os métodos de AM não serem viáveis para tal aplicabilidade.

De acordo com os autores, após implementação da planilha de DFAM foi possível observar uma melhora significativa nos resultados de manufatura das peças por meio da AM, visto que o número de falhas foi reduzido em 81%.

FIGURA 20: Planilha DFAM para auxiliar os usuários na tomada de decisão

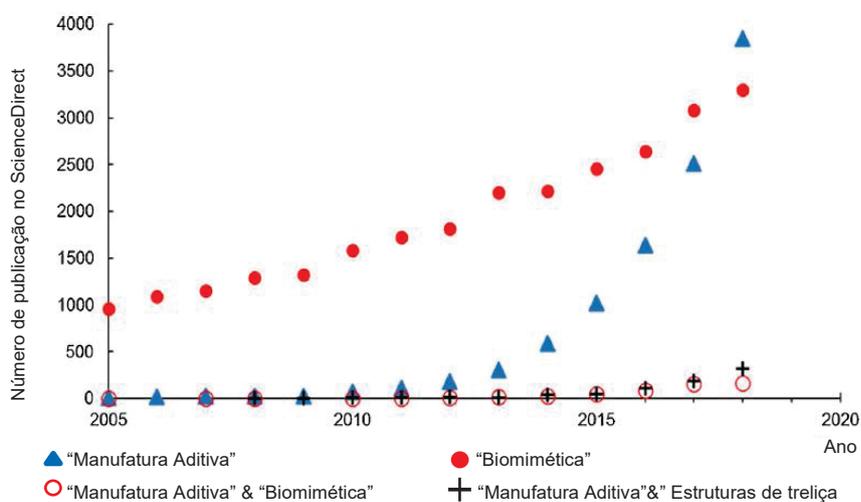
Projeto para Manufatura Aditiva (DFMA)		Um método rápido para reduzir o número de falhas de impressão e prototipagem, por Joran Booth . Instrução: Selecione um opção para cada categoria da peça que planeja imprimir. E por fim calcule a pontuação final							
Selecione uma Opção	Complexidade	Selecione uma Opção	Funcionalidade	Selecione uma Opção	Remoção de Material	Selecione uma Opção	Recursos não suportados	Soma Entre Linhas	Total
<input type="radio"/>	A forma da peça é a mesma de materiais comuns de estoque ou é completamente 2D 	<input type="radio"/>	As superfícies de contato são superfícies de apoio, ou espera-se que durem mais de 1000 ciclos 	<input type="radio"/>	A peça é menor ou do mesmo tamanho que a estrutura de suporte necessária 	<input type="radio"/>	Existem recursos longos e sem suporte 	x5	
<input type="radio"/>	A peça é praticamente 2d e pode ser feita em uma fresadora ou torno sem reposicionamento 	<input type="radio"/>	A superfície de contato se move significativamente, sofre grandes forças ou deve suportar 100-1000 ciclos 	<input type="radio"/>	Existem pequenas lacunas que exigirão estrutura de suporte 	<input type="radio"/>	Existem pequenos recursos não suportados 	x4	
<input type="radio"/>	A peça pode ser feita em uma fresadora ou torno, mas somente após o reposicionamento na pinça pelo menos uma vez 	<input type="radio"/>	A superfície de contato se move um pouco, sofre forças moderadas ou espera-se que dure 100-1000 ciclos 	<input type="radio"/>	Cavidades ou canais internos não têm abertura para remoção de material 	<input type="radio"/>	Os recursos com presença de saliência apresentam suporte inclinado 	x3	
<input type="radio"/>	A curvatura da peça é complexa para uma operação de usinagem, como fresadora ou torno 	<input type="radio"/>	A superfície de acoplamento se moverá minimamente, sofrerá baixas forças ou será projetada para suportar 2-10 ciclos 	<input type="radio"/>	O material pode ser facilmente removido de cavidades internas, canais ou furos 	<input type="radio"/>	Os recursos de saliência têm um suporte mínimo de 45°deg 	x2	
<input type="radio"/>	Existem recursos internos ou a curvatura da superfície é muito complexa para ser usinada 	<input type="radio"/>	A superfície é puramente não funcional ou praticamente não apresenta ciclos 	<input type="radio"/>	Não há canais internos, cavidades ou furos 	<input type="radio"/>	A peça esta orientada para não ter regiões salientes 	x1	
Selecione uma Opção	Recursos Finos	Selecione uma Opção	Concentração de Estresse	Selecione uma Opção	Tolerância	Selecione uma Opção	Exatidão Geométrica	+	
<input type="radio"/>	Algumas paredes têm menos de 1,5 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos internos não possuem chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro e comprimento são nominais 	<input type="radio"/>	A peça tem grande superfície plana ou tem uma forma que é importante ser exata 	x5	
<input type="radio"/>	Paredes com valores entre 1,5 - 3,0 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos possuem chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro ou comprimento são ajustados para contração ou encaixe 	<input type="radio"/>	A peça tem superfícies planas de tamanho médio ou formas que devem ser quase exatas 	x3	
<input type="radio"/>	Paredes com valores maiores que 3,0 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos possuem recursos significativos de chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro e comprimento não são importantes 	<input type="radio"/>	A peça tem pequenas superfícies ou nenhuma superfície plana ou formas que precisam ser exatas 	x1	
Pré Avaliação * Considere um processo de fabricação diferente † Considere fortemente um processo de fabricação diferente				Pontuação Total 33-40 Precisa Redesenhar 24-32 Considere Redesenhar 16-23 Probabilidade moderada de sucesso 8-15 Maior probabilidade de sucesso		Total Geral <input type="text"/>		=	

FONTE: Adaptado de Booth *et al.* (2017)

Pressis *et al.* (2019) mencionam que o *Design* Biomimética é uma das abordagens em crescimento exponencial. Conforme reportado na FIGURA 21 a quantidade de artigos publicados neste tema cresceu significativamente entre 2005 – 2018. Porém o número de artigos publicados inerente a este assunto quando aplicado a Manufatura Aditiva é pequena, mostrando assim uma lacuna a ser estudada e desenvolvida. Em definições gerais a Biomimética é uma área de estudo que visa estudar as formas biológicas da natureza com o intuito em serem aplicadas para solução de problemas

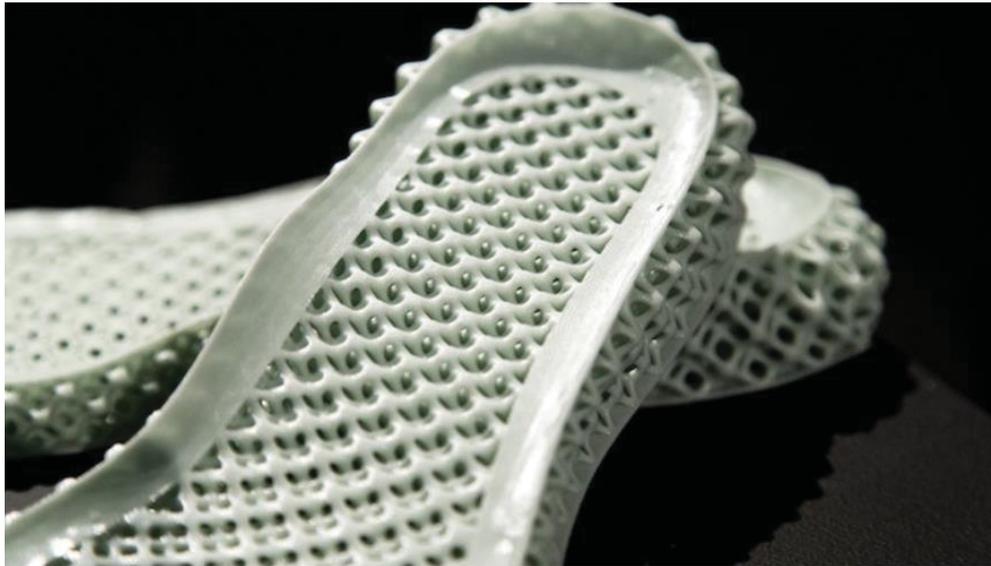
Pressis *et al.* (2019) traz aplicações de diversos autores referentes ao *Design* Biomimética aplicados a AM, conforme reportado esta é uma das principais áreas que proporcionam a otimização topológicas das geometrias das peças, tendo como foco o redesenho da peça por meio de formas biológicas e naturais, tais como formas celulares, treliças, geometrias de colmeias, etc. Os principais benefícios proporcionados por esta abordagem estão relacionados a redução significativa de peso dos componentes redesenhados sem afetar a integridade mecânica da peça, proporcionando também geometrias complexas que não são capazes de serem reproduzidas por meio dos conceitos de manufatura tradicionais. Podendo dar como exemplo o *design* inovador de um solado de um tênis esportivo FIGURA 22, sendo ele projetado em forma de treliças e obtidos por meio da Manufatura Aditiva, geometria a qual não seria possível de se obter com os processos convencionais de injeção polimérica.

FIGURA 21: Número de publicações em Biomimética e AM entre 2005–2018



FONTE: Adaptado de Pressis *et al.* (2019)

FIGURA 22: Solado de tênis com geometria de treliças obtido por meio da AM



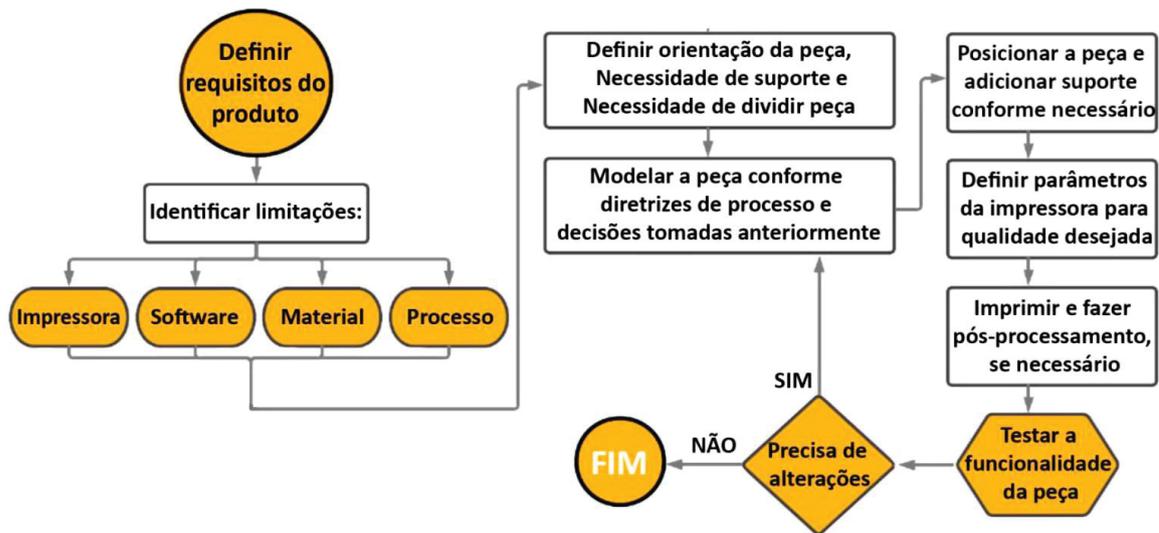
FONTE: Adaptado de Carbon3D (2020)

As máquinas de manufatura por extrusão de material possuem algumas limitações que devem ser consideradas antes de iniciar o processo de fabricação (Ex: dimensão da plataforma, temperatura máxima de extrusão, velocidade, etc). Portanto com o intuito em obter êxito na manufatura da peça, Dieter *et al.* (2019) propõem um fluxo de projeto, conforme FIGURA 23 a ser seguido, este fluxo visa identificar e contornar tais limitações. Para comprovar a eficácia, este procedimento foi aplicado na fabricação de uma capa de celular através de impressora 3D de baixo custo.

Em Klahn, *et al.* (2015) são mencionadas duas possíveis estratégias, sendo a primeira, uma estratégia de *Design* voltado à fabricação e a segunda sendo a estratégia de *Design* orientada a função do componente. Um exemplo de aplicação da primeira estratégia está conectado a redução dos riscos na implementação de novos produtos poliméricos, pois ao invés da empresa confeccionar o molde final de aço para então fabricar a peça, a mesma pode primeiramente manufaturar uma certa quantidade de peças por meio da AM, e então lançar este produto no mercado. Tendo como objetivo obter antecipadamente o *feedback* dos clientes em relação ao produto para que o *Design* possa ser reajustado. Desta forma, a produção em massa pode ser lançada com os ferramentais finais para o *Design* conforme exigência e *feedbacks* dos clientes. Já a estratégia de *design* orientada a função tende a explorar as características da AM para melhorar as funções finais de um produto.

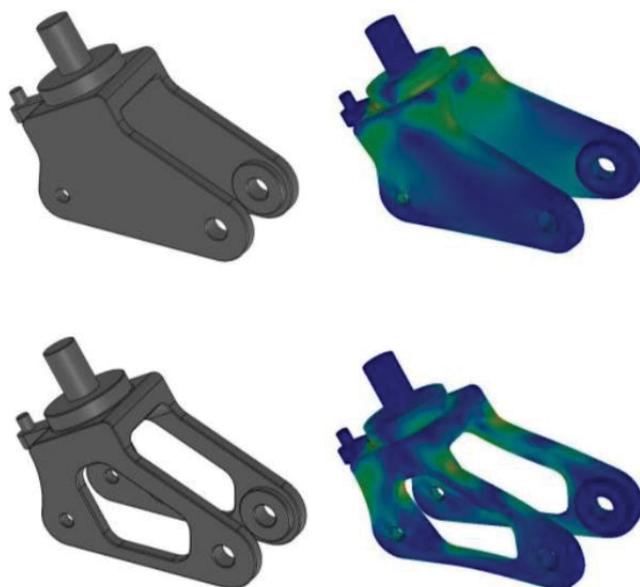
Os métodos de elementos finitos (FEM, do inglês *Finite Element Methods*) quando aplicado em conjunto com os conceitos de DFAM pode auxiliar na otimização topológica da geometria dos componentes, pois, por meio do FEM é possível realizar análises de escoamento de fluidos, carregamento de força, entre outros. Conforme ilustrado na FIGURA 24 por meio de ambos os conceitos foi possível encontrar uma geometria não comum que proporcione benefícios na redução de massa, sem comprometer a integridade mecânica da peça (HIETIKKO 2014).

FIGURA 23: Fluxograma de DFAM para AM por extrusão de material



FONTE: Dieter *et al.* (2019)

FIGURA 24: Otimização topológica por meio de análises FEM



FONTE: Hietikko (2014)

2.4.2. Exemplos de aplicações de DFAM em componentes mecânicos

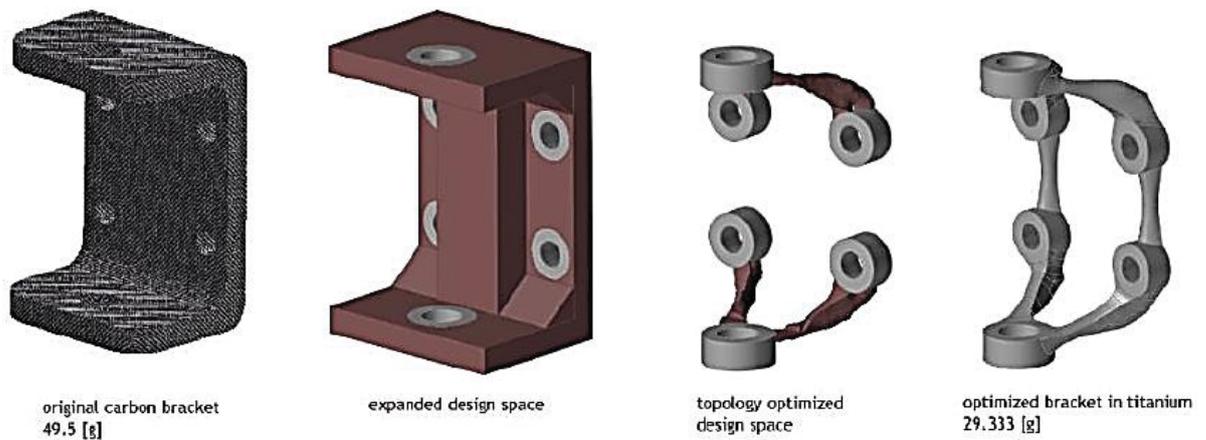
A Shell Eco-Marathon (SEM) é um evento global, tendo como principal objetivo estimular os conceitos de engenharia e inovação nos estudantes, sendo que o vencedor da competição será a equipe que alcançar a maior distância possível com um veículo utilizando apenas 1 litro de combustível comum. Um dos pontos-chaves para obter sucesso está vinculado diretamente às estratégias globais de engenharia, tais como redução de peso nos componentes, economia de combustível, *design* inovadores, etc.

Partindo deste princípio, em Dunn *et al.* (2011) a equipe NMU Eco-Car a qual é vencedora dos eventos de 2016 e 2017, apresentou dois estudos de casos voltados a redução de peso de componentes utilizando as metodologias de DFAM. Sendo o primeiro estudo voltado a otimização topológica do suporte responsável em realizar união do eixo direcional. Conforme demonstrado na FIGURA 25 por meio do redesenho e simulações realizadas no componente, foi possível obter uma geometria que virtualmente demonstrou uma redução de peso em 41%, quando comparado a geometria original do componente. Porém ao realizar a fabricação física do componente o resultado apresentou uma ligeira melhora, proporcionando 45% de redução de peso. O segundo caso também se trata de redução de peso por otimização topológica, porém neste exemplo os fundamentos de *design* de biomimética foram amplamente aplicados tendo como geometria final um componente com uma geometria em forma de treliças (FIGURA 26), nesta ocasião a redução de peso alcançada foi na ordem de 14%.

Estudos de otimizações topológicas também estão sendo aplicados em sistemas de distribuição de fluidos, sendo que geralmente os sistemas são compostos por diversos componentes, tais como mangueiras, peças plásticas, conexões metálicas entre outros.

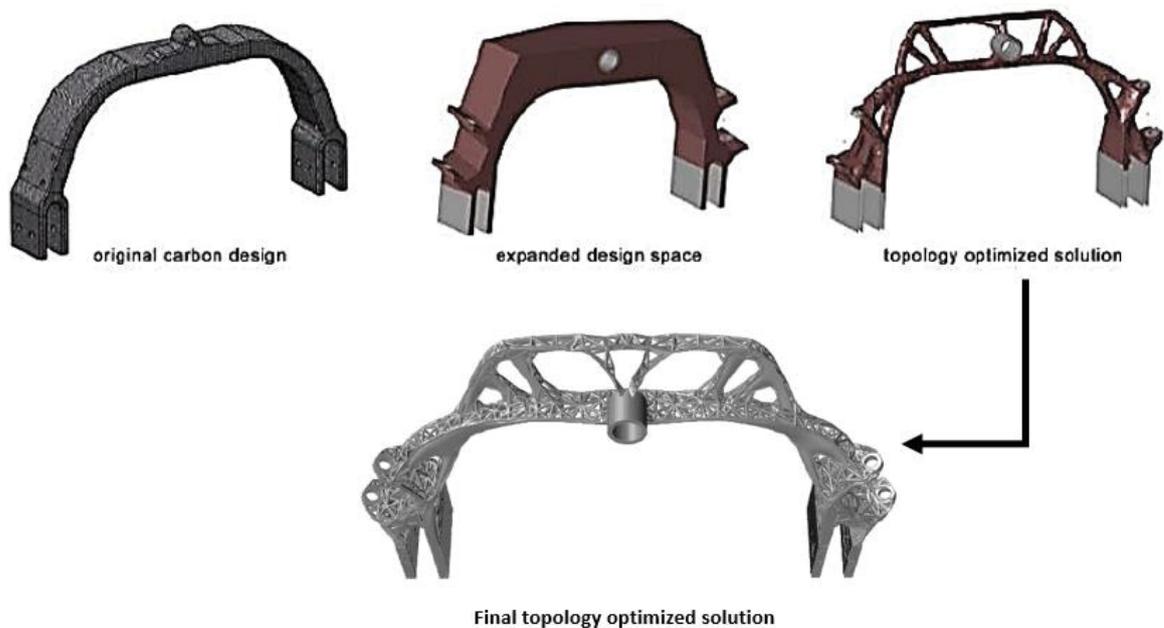
De acordo com Kathryn *et al.* (2016) a empresa ASLM apresentou dois *designs* alternativos de Coletor de Ar, com o propósito de avaliar os benefícios proporcionados entre os diferentes projetos. Sendo o primeiro projeto com fresamento monolítico que substituiu as mangueiras por canais sólidos e então vedados por uma tampa soldada (b), e o segundo projeto com um *design* que foi otimizado por meio dos conceitos de DFAM para produção por AM (c) (FIGURA 27).

FIGURA 25: Evolução da otimização topológica de *Design* do Suporte C



FONTE: Dunn *et al.* (2011)

FIGURA 26: Evolução da otimização topológica de *Design* do Suporte U



FONTE: Dunn *et al.* (2011)

De uma forma geral, o projeto de Coletor de Ar para AM apresentou uma redução de peso em 10% quando comparado ao projeto original, além disso eliminou todas as etapas de processos, tais como montagem e soldagem. No entanto, o projeto apresentado pela AM apresentou um custo mais elevado de fabricação, devendo assim buscar alternativas de redução de custo para manter a margem de lucro na venda do sistema de Coletor de Ar.

FIGURA 27: Otimização topologia em sistemas de distribuição de fluido, sendo (a) Projeto convencional com mangueiras (110 g), (b) Projeto monolítico fresado (200 g), (c) *Design* otimizado para MA (100 g)



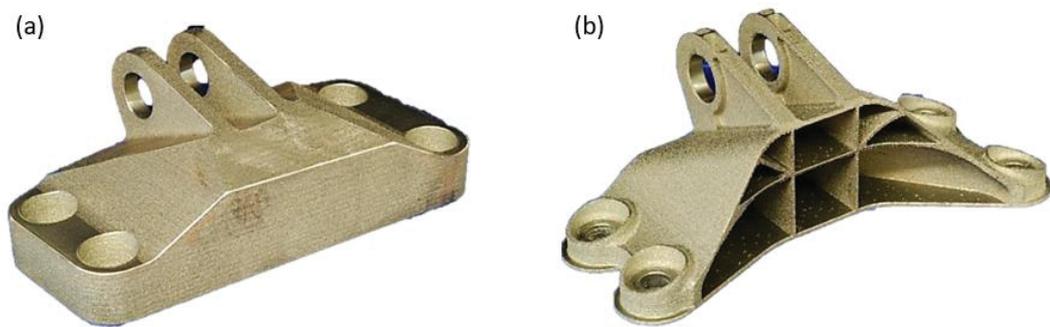
FONTE: Kathryn *et al.* (2016)

Conforme mencionado em Carter *et al.* (2014) a redução de peso de componentes sempre foi uma das principais premissas das companhias aéreas, devido estar fortemente atrelado aos indicadores econômicos. Portanto, para melhorar a performance das aeronaves, a empresa GE Aviation lançou um concurso para obter redução de peso em um dos suportes do motor por meio da otimização topológica. No total foram 700 equipes inscritas, sendo que as 10 melhores colocadas foram recompensadas financeiramente

O projeto vencedor (FIGURA 28) reduziu em torno de 80% do peso do suporte sem comprometer a capacidade de suportar cargas de esforço. O uso deste componente em todas as aeronaves do mundo, proporciona uma redução anualizada de 12 a 22 milhões de galões de combustível, sendo uma redução monetária anual de US \$37 milhões - US \$71 milhões (CARTER *et al.* 2014).

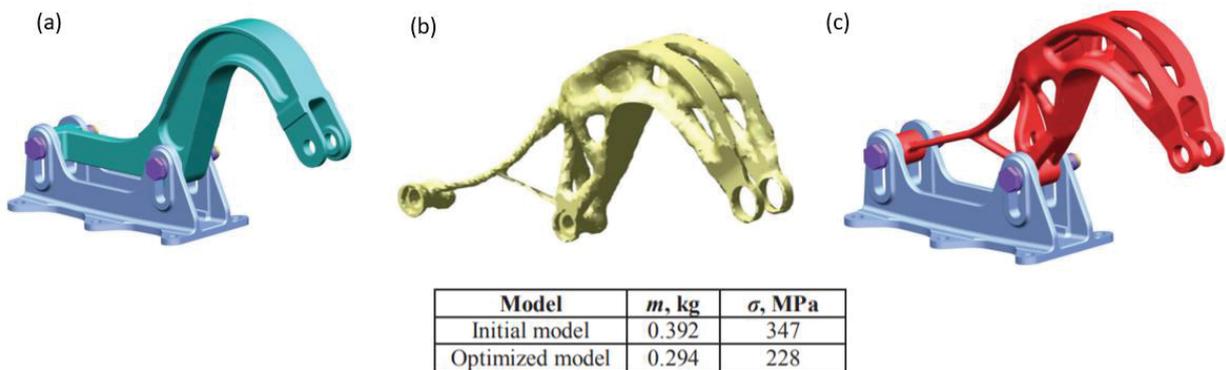
Em Junk *et al.* (2019) é comentado que uma empresa Russa de aviação UEC-Aviadvigatel JSC, também traz estudo de caso voltado a otimização topológica em suporte de dobradiça utilizada nos motores das aeronaves domésticas. Este componente no total pesa em torno de 392g, sendo que em uma aeronave são utilizados 8 suportes. Para realizar este estudo de otimização topológica, foi utilizado um software especializado que permite parametrizar as particularidades estruturais da peça que devem ser respeitadas. Conforme reportado na análise virtual (FIGURA 29), a peça otimizada pesa em torno de 294g, ou seja, o peso da peça foi reduzido em 98g quando comparado ao peso inicial. Referentes às propriedades mecânicas, houve uma redução de 35% na capacidade de resistir a esforços. Porém o autor não menciona se esta redução é um fator impeditivo para implementar este novo *Design*.

FIGURA 28: Otimização topológica em suporte de aeronave, sendo (a) Peça original confeccionada em titânio pesando aproximadamente 1.8 Kg, (b) Projeto ganhador também confeccionado em titânio pesando 360g



FONTE: Carter *et al.* (2014)

FIGURA 29: Otimização topológica em suporte de dobradiça de aeronaves, sendo (a) Peça Original; (b) Em processo de otimização topológica; (c) Peça final

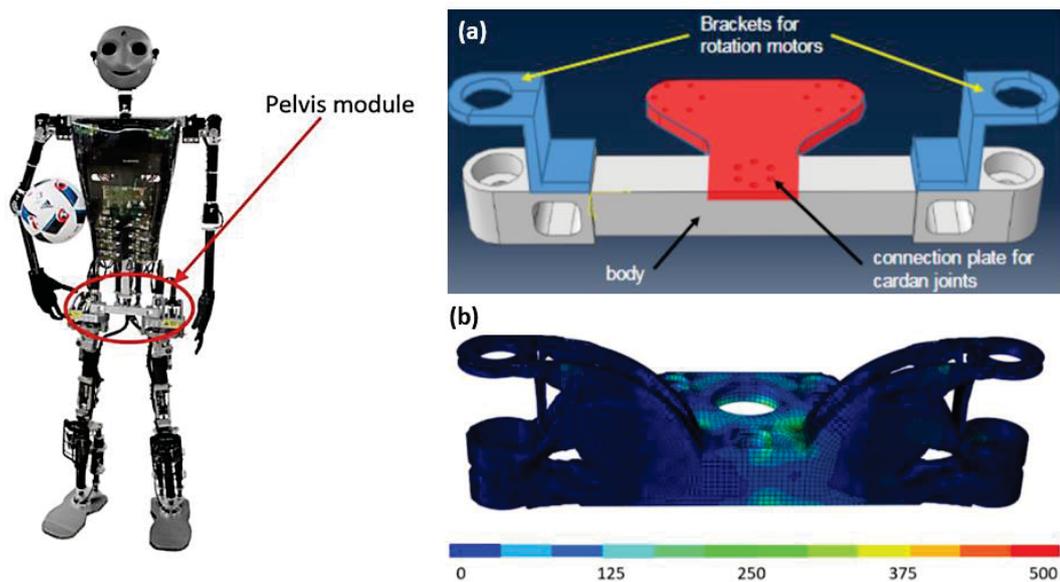


FONTE: Junk, *et al.* (2019)

Outro benefício significativo proporcionado pelo DFAM trata-se da redução da quantidade de subcomponentes utilizada para compor o produto final, pois quanto maior a quantidade de subcomponentes maior será a quantidade de processos de fabricação agregados, e por consequência maior será o tempo de fabricação do produto final. Com base nestes princípios Junk *et al.* (2019) traz um exemplo de otimização topológica de uma peça que é utilizada em um robô humanoide. Tendo como objetivos reduzir a quantidade de subcomponentes, reduzir peso e aumentar a resistência mecânica. Conforme ilustrado na FIGURA 30 a peça original é composta por quatro subcomponentes e ao concluir os ensaios topológicos, foi possível obter um novo formato de peça em um único sólido, sem comprometer a função principal. Obtendo também uma redução de peso de 4,7% e uma melhora na resistência mecânica.

Por fim, Plessis (2019) apresenta um estudo de caso similar onde foram aplicados os conceitos de DFAM para combinar oito componentes em apenas uma geometria. Essa nova geometria, ilustrada na FIGURA 31, proporcionou redução de massa de 40%, reduziu o custo da peça em 20% e aumentou em 20% a resistência mecânica.

FIGURA 30: Otimização topológica realizada em uma peça de um robô humanóide, sendo (a) Peça original com 4 subcomponentes; (b) Peça topologicamente otimizada



FONTE: Adaptado de Junk *et al.* (2019)

FIGURA 31: Otimização topológica com objetivo em redução de subcomponentes e peso de uma peça



FONTE: Adaptado de Plessis *et al.* (2019)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado um procedimento de pesquisa aplicado, exploratório, com abordagem qualitativa do problema, com procedimentos técnicos baseados em trabalhos da literatura. Tudo isso, com o objetivo de implementar um procedimento de DFAM que analise a viabilidade de fabricação de Peça Modelo por AM e sistematize o projeto para atender aos requisitos do projeto.

O capítulo está dividido em duas partes, descreve de forma detalhada o procedimento de DFAM que permite analisar a viabilidade da fabricação de Peças Modelo. Em seguida, é detalhada a aplicação deste procedimento na manufatura da Peça Modelo de um componente estampado e de um tubo metálico curvado.

3.1. Procedimento de DFAM para fabricar Peças Modelo

O procedimento proposto contém sete etapas principais, sendo que três delas necessitam de uma tomada de decisão para seguir adiante, ver FIGURA 32. A primeira etapa tem como objetivo identificar os requisitos específicos do produto tais como características dimensionais, tolerâncias geométricas, geometrias especiais, pontos de fixação, aplicabilidade, etc. Os requisitos devem ser levantados por meio da interpretação do desenho técnico 2D e por auxílio da análise virtual de montagem. Na sequência, inicia-se a análise das limitações de processo, tais como, volume de fabricação, precisão, materiais processados pela máquina de AM disponível, e também a presença de características específicas de peças fabricadas por AM (estrutura de suporte, efeito degrau de escada, anisotropia, entre outras. Após essa é verificado se as limitações identificadas são contornáveis para assegurar a manufatura da peça que está sendo submetida a análise

Na etapa seguinte é verificado se a geometria da peça é apropriada para ser fabricada por meio da AM. Esta avaliação é feita com auxílio da metodologia proposta por Booth *et al.* (2017) que por meio de uma tabela planilhada, pontua características de complexidade, funcionalidade, material e estruturas de suporte e aponta, entre outras coisas, se a geometria da peça precisa ser reprojetaada antes de seguir para a próxima etapa.

Com um projeto adequado (original ou reprojetaado) inicia-se o planejamento do processo de AM, onde são definidos no *software* os parâmetros de fabricação, tais

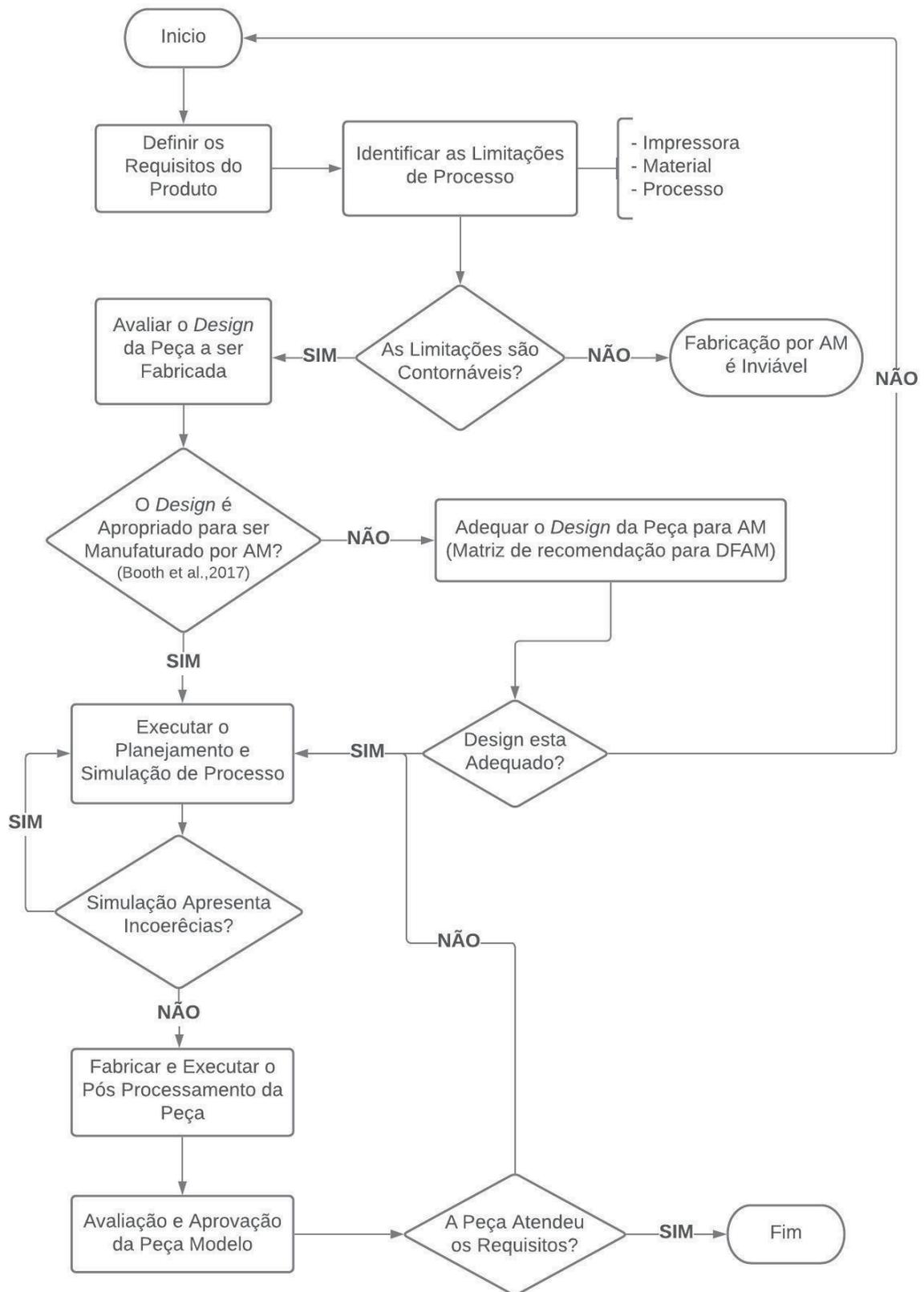
como: velocidade de impressão, altura de camada, orientação da peça na plataforma, fator de escala, temperatura de impressão, etc. Nessa etapa, é possível simular computacionalmente a fabricação e obter os valores estimados de tempo e custo de manufatura.

Com o resultado adequado na simulação, inicia a etapa de fabricação e pós-processamento. Durante a fabricação se faz necessário apenas o monitoramento visual periódico. Ao fim da fabricação a peça é submetida a etapa de pós-processamento que pode incluir descolamento da peça da plataforma, extração de suporte, melhoria no acabamento superficial, etc.

A peça finalizada é encaminhada para um laboratório de metrologia para a validação dimensional. Caso a peça apresente resultados dentro do especificado nos requisitos do projeto a peça está pronta para ser utilizada, caso contrário deve ser revistas novamente as etapas anteriores conforme relatado no fluxo do procedimento.

Nas seções seguintes, cada etapa do procedimento de DFAM proposto é descrita detalhadamente.

FIGURA 32: Fluxo de Fabricação de Peças Modelo por meio da Manufatura Aditiva



FONTE: O Autor (2020)

3.1.1. Definição dos requisitos de produto

Os requisitos do produto quando se trata de Peças Modelo, geralmente estão relacionados às características dimensionais e/ou geométricas que devem ser respeitadas. Portanto, esta etapa tem como propósito identificar as dimensões importantes da peça junto a suas respectivas tolerâncias dimensionais ou geométricas indicadas em desenho. Para identificar os requisitos é importante ter conhecimento de análise e interpretação de desenho técnico e tolerâncias geométricas. Além disso, é importante conhecer a função e aplicabilidade do produto para uma avaliação mais completa de suas características.

Diante disso, a primeira etapa trata-se da análise do desenho 2D da peça a ser manufaturada, iniciando com a identificação dos *datum targets* de alinhamento, que determinam os pontos de partida das dimensões principais. Geralmente os *datum targets* estão referenciados em geometrias conhecidas tais como planos, cilindros, círculos ou até mesmo pontos. Sendo que, o *design* das geometrias não pode ser alterado. Na sequência, é necessário identificar as dimensões críticas do produto, que são aquelas identificadas por símbolos de tolerâncias geométricas ou dimensionais.

A segunda etapa está correlacionada a análise da aplicabilidade do produto, esta análise tem como intuito em assegurar que as dimensões críticas do desenho são realmente importantes ou mesmo garantir que não foi esquecido de inserir as tolerâncias alguma dimensão em desenho. Essa análise pode ser feita analisando o projeto em sistema CAD 3D da montagem onde o produto está inserido. Geralmente as geometrias e superfícies importantes estão em contato com outras peças ou possuem pontos de fixação, encaixe, furos passantes, grandes áreas de contato, etc. Portanto, basta identificar tais superfícies e geometrias para então assegurar que as mesmas estão sendo controladas em desenho, caso não exista este controle é importante acrescentar tais características no requisito do produto.

Por fim, as dimensões e geometrias identificadas como importantes, devem ser listadas como requisito do produto e por consequência não podem sofrer variações que ultrapassem as tolerâncias requisitadas.

3.1.2. Limitações de Processo

Nessa etapa os parâmetros que podem ser limitantes para a fabricação da Peça Modelo por AM são analisados. Essa análise acontece em três aspectos principais, são eles: (1) Equipamento de AM disponível; (2) Material processável por esse equipamento versus requisitos da peça; (3) Características do processo versus requisitos da peça.

Ao final dessa análise é possível verificar se a peça apresenta viabilidade para ser manufaturada por AM. Se durante esta análise forem destacadas limitações não passíveis de serem contornadas, a fabricação da Peça Modelo por meio da AM deve ser descartada, do contrário, o fluxo do procedimento segue para a próxima etapa.

3.1.2.1. *Equipamento de AM*

O primeiro passo está vinculado a identificação das características técnicas da do equipamento AM a ser utilizado, e por consequência suas respectivas limitações de materiais processáveis, precisão, volume de impressão, existência de câmara fechada, propriedades térmicas, velocidades, quantidade de extrusores entre outras. Estas informações são importantes principalmente para verificar se o tamanho da peça está adequado para a máquina e para executar as parametrizações do processo de fabricação.

3.1.2.2. *Material*

A análise do material utilizado leva em consideração a aplicabilidade da peça, temperatura do ambiente, esforço mecânico, armazenagem, custo de fabricação, entre outros. Conforme reportado na seção 2.2.3, os polímeros mais utilizados na impressão por extrusão de material são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o ácido poliláctico (PLA), devido a boa relação entre custo e propriedades mecânicas. No caso do PLA, tem ainda a facilidade de uso.

As Peças Modelo geralmente são utilizadas em ambientes com temperatura controlada, tais como ferramentaria ou salas de medidas. Entretanto, algumas vezes se faz necessário levá-las ao chão de fábrica, para revalidar os dispositivos de controle

de maneira rápida. Esses ambientes geralmente são quentes e propícios a batidas. Com base nisso, é aconselhável o uso de materiais que suportem temperaturas altas e que tenham boas resistências mecânicas. Portanto, nesse caso em especial de Peças Modelo é preferível utilizar o ABS ou material de performance superior ao invés do PLA. Caso o material não atenda as exigências de aplicação, este tópico deve ser revisitado e um novo material deve ser aplicado.

3.1.2.3. *Parâmetros de Processo*

A definição dos parâmetros do processo é uma das etapas do processo de fabricação por AM e geralmente, ela é feita em um sistema CAM (do inglês *Computer-Aided Manufacturing*). A definição dos parâmetros é baseada na qualidade superficial, dimensional e resistência mecânica exigida na peça. Quanto maior a qualidade desejada maior será o tempo de confecção da peça e por consequência o maior custo de fabricação. Dependendo do sistema CAM utilizado, a quantidade de parâmetros disponíveis para configuração pode variar muito, mas alguns são mais importantes e eles podem ser vistos no QUADRO 3. Portanto, para que possa ser possível realizar a fabricação das peças, a máquina escolhida deve suportar os parâmetros determinados.

Alguns dos parâmetros mais importantes e que aparecem no QUADRO 3 são descritos abaixo:

- **Altura de Linhas/Camada:** Determina a altura da camada de fabricação e influencia diretamente a qualidade superficial, robustez da peça e auxilia na adesão da primeira camada na plataforma de impressão.
- **Velocidade de Impressão:** Velocidade com que o cabeçote se desloca e deposita o material. Aliada com a temperatura influencia o fluxo de material depositado e conseqüentemente a qualidade de impressão;
- **Propriedades do Material:** O material a ser utilizado deve possuir as propriedades mecânicas e térmicas adequadas para a aplicação da peça. Portanto, antes de escolher o material é importante conhecer as exigências térmicas e mecânicas requeridas para a peça.
- **Temperatura de impressão:** A temperatura em que o filamento é fundido e forçado a sair pelo bico de impressão influencia a qualidade de adesão entre camadas e conseqüentemente a resistência mecânica.

- **Tipo e percentual de Preenchimento:** Define o padrão e o percentual desse padrão no interior da peça impressa. Essas escolhas influenciam a qualidade superficial e a resistência mecânica da peça.
- **Raft (saia):** É uma espécie de saia ou borda adicional que pode ser unida ou separada da peça. A saia unida ajuda na aderência com a plataforma de impressão e a separada ajuda a regularizar o fluxo no início da impressão e conferir o nivelamento da plataforma.
- **Estruturas de Suporte:** São estruturas auxiliares utilizadas para suportar regiões suspensas e desconectadas momentaneamente da peça e devem ser removidas ao final da impressão.

QUADRO 3: Parâmetros de processo essenciais para fabricação de Peças Modelo

Propriedades	Parâmetro
Linhas/Camadas	Altura da camada
	Altura da primeira camada
	Largura da primeira camada
	Número de colunas sólidas na parede
	Número de camadas sólidas no piso
	Número de camadas sólidas no teto
Velocidade	Velocidade da primeira camada
	Velocidade de extrusão dos contornos
	Velocidade de extrusão do preenchimento
Material	Diâmetro do filamento
	Material
Temperatura	Utilização de ventilador
	Temperatura de impressão
Preenchimento	Padrão de preenchimento
	% de preenchimento
Raft (saia)	Número de camadas
	Offset da peça
	Distância de separação
	% de preenchimento
Estrutura de Suporte	% de preenchimento
	Camadas de suporte densas (contato com peça)
	% de preenchimento das camadas densas
	Resolução do pilar do suporte

FONTE: O Autor (2020)

3.1.3. Avaliação de *Design* para AM

Esta etapa tem como principal objetivo assegurar que o *design* da peça a ser confeccionada é adequado para a fabricação por AM. Para execução desta análise foi utilizado como ferramenta auxiliar o procedimento de DFAM planilhado proposto por Booth *et al.* (2017).

Conforme mencionado no tópico 2.4.1 da revisão bibliográfica e ilustrado na FIGURA 20, a metodologia proposta é composta por oito principais parâmetros que são preenchidos e pontuados conforme as características físicas da peça a ser manufatura. No final do preenchimento é calculada uma pontuação, indicado no QUADRO 04 que recomenda e orienta a tomada de decisão em relação à fabricação do componente por meio da AM.

QUADRO 4: Orientação e tomada de decisão em relação à fabricação do componente por meio da AM

Pontuação	Resultado/Recomendação
33-40	Design da peça deve ser modificado
24-32	Considere alterar o Design da peça
16-23	Probabilidade moderada de obter sucesso na fabricação da peça
8-15	Maior probabilidade de sucesso de fabricação da peça

FONTE: Adaptado de Booth *et al.* (2017)

Caso o *design* se mostre adequado à fabricação por meio da AM, a etapa de planejamento e simulação do processo se inicia. Do contrário, é necessário readequar o *design* da peça. Caso o *design* não possa ser readequado deve-se retornar para as etapas iniciais do fluxograma.

3.1.4. Adequação de *Design* para AM

A etapa de adequação de *design* se faz necessária caso a peça apresente variáveis que torne o processo de fabricação de AM inviável. Tais variáveis são identificadas por meio da nota obtida na metodologia proposta por Booth *et al.* (2017), ou por auxílio de análises técnicas, *softwares* CAD e *software* de planejamento de processo. Portanto, com base na revisão bibliográfica e nas experiências práticas dos

problemas com maior índice de recorrências da indústria automotiva levantadas por cinco engenheiros de qualidade com conhecimento em AM, foi elaborada uma matriz de recomendação, que tem como principal objetivo auxiliar o usuário na tomada de decisão em relação a adequação do *design* para AM.

Conforme ilustrado na FIGURA 33, a matriz é ordenada em dois tópicos, sendo que as linhas da coluna primária apresentam os problemas mais usuais, tais como, desvios dimensionais, dimensão da peça superior a área de fabricação, custo de fabricação elevado, resistência mecânica e térmica inferior as condições de aplicabilidade, etc. E as colunas subsequentes são as soluções recomendadas para tais problemas. A recomendação da solução está dividida em fortemente recomendado (FR), recomendado (R) e não recomendado (NR). Portanto, para obter maior sucesso na readequação do *design*, basta escolher uma solução ou uma combinação de soluções que seja recomendado ou fortemente recomendado para o problema retratado. Por fim, para readequar o *design*, é executado o procedimento de planejamento e simulação do processo. Caso o *design* não possa ser readequado deve-se retornar para as etapas iniciais do procedimento.

FIGURA 33: Matriz de recomendação para tomada de decisão na adequação do *design* para AM

Matriz de recomendação básicas para DFAM

Recomendação	Alterar matéria prima	Reduzir espessura	Reduzir massa por meio da extração de geometrias conhecidas	Dividir a peça em partes	Alterar escala do produto	Otimizar topologicamente o design utilizando design biomimética	Otimizar topologicamente o design utilizando estruturas de treliçadas	Desenvolver um novo conceito de design
Qual é o problema ?								
Dimensão da peça é superior a área de fabricação	NR	NR	NR	FR	NR	NR	NR	NR
Geometria possui um alto nível de complexidade	NR	NR	NR	R	NR	FR	FR	FR
Peça apresenta desvios dimensionais	R	NR	NR	NR	R	R	R	R
Peça possui quantidade excessiva de subcomponentes	NR	NR	NR	R	NR	R	R	FR
Peça apresentada excesso de peso	NR	FR	FR	R	NR	FR	FR	FR
Resistência mecânica inferior ao desejado	R	R	NR	NR	NR	R	FR	R
Resistência térmica inferior ao desejado	FR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Custo de produção elevado	R	FR	FR	R	NR	FR	FR	FR

FR Fortemente Recomendável
R Recomendável
NR Não Recomendável

FONTE: O Autor (2020)

3.1.5. Planejamento de Processo

A próxima etapa antes da fabricação, trata do planejamento do processo onde aconteceu a definição dos parâmetros de impressão. Esta etapa foi realizada no sistema CAM *Ultimate Cura*, chamado comumente de fatiador. O primeiro passo do planejamento está atrelado ao posicionamento e orientação da peça na plataforma de fabricação. Esta definição influencia diretamente nas características dimensionais da peça, anisotropia, quantidade de material de suporte, acabamento superficial, entre outros.

Com a orientação definida, é necessária uma avaliação da necessidade de material de suporte, esta etapa é de suma importância e tem grande influência na qualidade superficial da peça, tempo de fabricação, quantidade de material necessário e por consequência o custo final do produto.

Nas etapas seguintes os demais parâmetros do processo foram definidos conforme sumarizados no QUADRO 03. Os parâmetros foram definidos de modo a atender aos requisitos da peça.

Por fim ao término das etapas anteriores é executada a simulação do processo de fabricação, sendo que esta simulação permite analisar se existem possíveis erros na trajetória de manufatura, verificar o tempo de fabricação, obter as informações inerentes a quantidade de material necessário e por consequência estipular o custo teórico para fabricar a Peça Modelo.

3.1.5.1. *Orientação do componente*

O planejamento de processo começa com a definição da orientação do componente em relação à plataforma de fabricação. Esta definição é conduzida por meio de duas análises, sendo que a primeira análise tem como propósito encontrar a orientação que proporciona melhor estabilidade e precisão dimensional para a peça. E a segunda análise avalia quais regiões da peça necessitam de estrutura de suporte, levando em consideração a orientação predeterminada anteriormente.

Referente a análise de precisão dimensional, é recomendado que a peça possui maior área de fabricação na orientação XY, ou seja, evitar que a peça fique orientada com a maior dimensão no eixo vertical de maneira a reduzir o número de camada necessárias para manufaturar a peça, pois quanto maior o número de

camadas no eixo vertical maior será o tempo de fabricação. Além disso, os eixos XY possuem maior precisão dimensional quando comparado ao Eixo Z. Portanto, o primeiro passo é investigar a possibilidade de orientar a peça no eixo XY. A partir da primeira orientação definida é possível verificar qual sua influência na geração de estrutura de suporte. Caso a peça venha a apresentar quantidades significativas de estrutura de suporte é necessário analisar a reorientação da peça, pois geralmente as estruturas de suporte afetam o acabamento superficial e a precisão dimensional. Outro ponto a ser considerado é evitar que tenha estruturas de suporte em regiões que exigem restrições dimensionais, caso a estrutura esteja sendo gerada em áreas irrelevantes para a peça, isso não deve ser considerado como um problema.

3.1.5.2. Estruturas de Suporte

A geração automática de estruturas de suporte feita pelos *softwares* de planejamento de processo pode não ser precisa o suficiente ou não ir de encontro aos requisitos exigidos na peça. Encerrada a fase de análise de orientação da peça na plataforma de impressão é importante configurar adequadamente o tipo, tamanho, densidade, orientação, localização entre outros parâmetros da estrutura de suporte de forma a otimizá-lo. Estruturas de suporte em superfícies que possuem controle e importância dimensional devem ser configuradas levando esses requisitos em consideração, por outro lado, superfícies irrelevantes para avaliação dimensional e de acabamento podem usar estruturas de suporte mais grosseiras e econômicas.

3.1.5.3. Parametrização do Software de Planejamento do Processo

Esta etapa teve como finalidade definir os valores dos parâmetros de processo mencionados no QUADRO 3, no software de planejamento do processo. Foi importante definir adequadamente os parâmetros de processo para evitar erros e falhas na fabricação.

3.1.5.4. Simulação

Por fim foi executada a simulação do processo de fabricação no software de planejamento de processo. Essa simulação além de ajudar na definição adequada dos

parâmetros, estimou o tempo de manufatura, quantidade de material necessário, custo teórico, peso do componente, e possíveis erros de fabricação.

3.1.6. Fabricação e Pós-Processamento

Com a conclusão do planejamento pode-se dar início à fabricação. Nesta etapa foi exigido apenas um monitoramento visual do processo, pois podem ocorrer algumas falhas durante a manufatura da peça, tais como descolamento da plataforma de fabricação, entupimento do bico de extrusão, queda de energia, falta de alimentação de material, entre outros. Os problemas mencionados usualmente ocorrem quando a definição e planejamento de processo não é feita de forma adequada. Portanto, caso venha a enfrentar dificuldades na manufatura da peça é importante retornar às etapas anteriores para redefinir os parâmetros e planejamentos de processo. Ao terminar a fabricação da peça é necessário realizar atividades de pós-processamentos tais como o descolamento da peça da plataforma, remoção de estruturas de suporte, remoção de rebarbas, melhorias no acabamento superficial por meio de lixas caso for necessário, pintura caso for necessário, etc. Portanto, toda e qualquer peça necessita de pós processamento. Ficando a critério do usuário definir o nível de acabamento desejado. Para as Peças Modelo é importante que as geometrias críticas predefinidas possuam um bom acabamento superficial e estejam isentas de rebarbas ou imperfeições superficiais.

3.1.7. Análise Dimensional

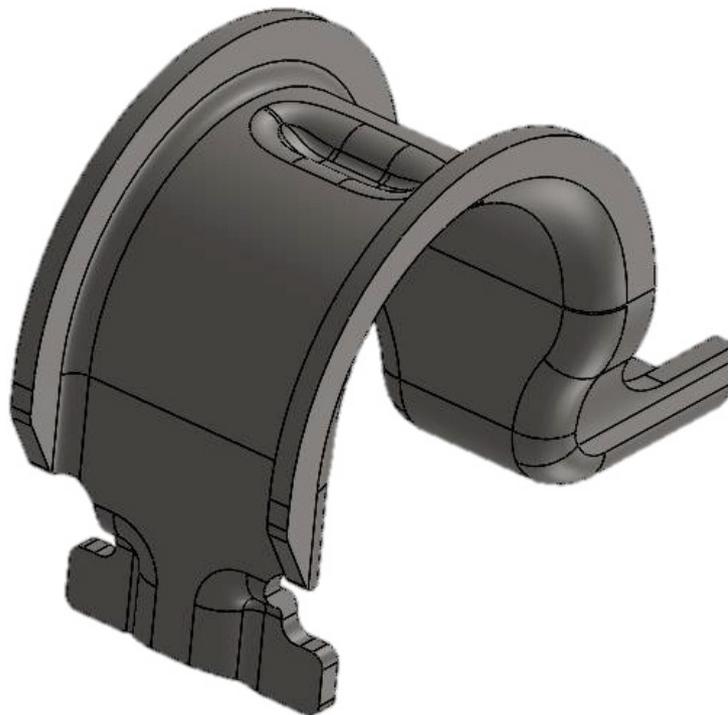
Para assegurar que a peça confeccionada está de acordo com as exigências de desenho, é preciso realizar uma validação dimensional. Essa validação deve ser feita por meio de uma máquina de medição por coordenada. Devido este equipamento possuir precisão suficiente para apresentar um relatório dimensional robusto e confiável. Encerrada a análise dimensional, é gerado um relatório que informa se a peça atende aos requisitos iniciais. Caso a peça atenda o especificado, ela está pronta para ser utilizada, do contrário, deve-se retornar às etapas anteriores, conforme indicado no fluxograma da metodologia.

4. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Nesta seção, o procedimento proposto na seção anterior é aplicado na confecção de duas peças modelo de geometrias diferentes. A primeira peça é um suporte metálico, fabricado convencionalmente por processos de estampagem (FIGURA 34) e a segunda, um tubo metálico fabricado com auxílio de dobradeiras CNC e processos de solda (FIGURA 35). Para obter tais Peças Modelo por meio dos processos convencionais, é necessário a fabricação prévia das ferramentas de estampagem e matrizes de dobras, com as respectivas validações dimensionais e parametrizações de processos.

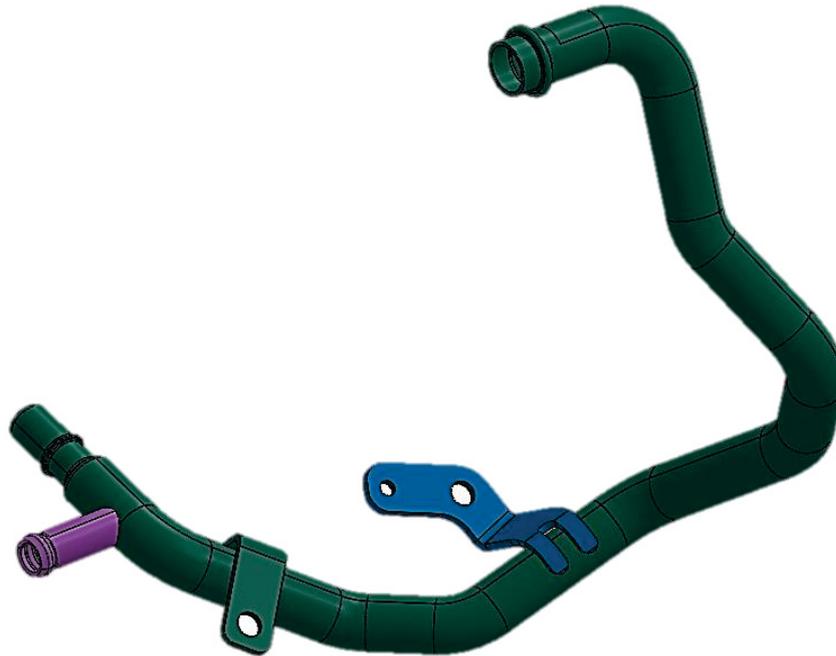
Tais peças foram selecionadas, devido seus respectivos dispositivos de fabricação e controle estarem em desenvolvimento durante a realização deste estudo. Com isso, foi possível realizar as validações dos dispositivos de controle com auxílio das Peças Modelos fabricadas por AM.

FIGURA 34: Suporte Metálico denominado “Algema” fabricado convencionalmente por processos de estampagem



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 35: Tubo metálico denominado “Tubo de Resfriamento” fabricado com auxílio de dobradeiras CNC e Processo de solda



FONTE: O Autor (2020)

4.1. Definição dos Requisitos dos Produtos

Para a obtenção robusta dos requisitos específicos dos produtos, foram executadas duas etapas de análise. A primeira etapa consistiu na leitura e interpretação do desenho técnico dos produtos identificando as informações referentes às tolerâncias dimensionais, geométricas e de acabamento superficial, e a segunda etapa consistiu na análise da aplicabilidade do produto. Com o intuito de detalhar melhor essas análises, elas foram divididas em subseções específicas.

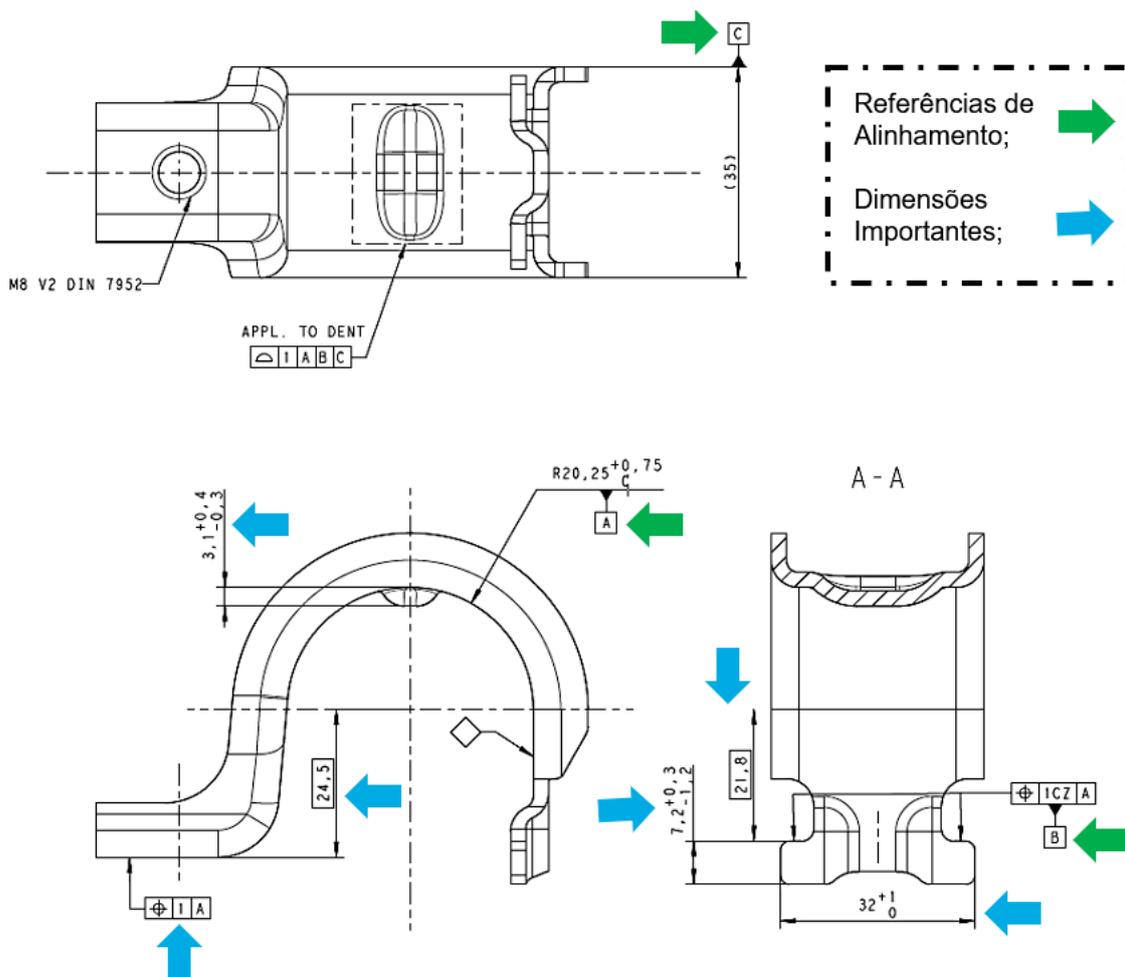
Primeiramente foi detalhado a interpretação do desenho técnico dos produtos, a qual identifica as dimensões de maior importância, tolerâncias correlacionadas e referências de alinhamentos. Em seguida, foi verificada a aplicabilidade do produto que tem como propósito assegurar que todas as informações detalhadas no desenho técnico possuem importância ou mesmo identificar regiões críticas às quais não foram mencionadas em desenho.

Por fim as dimensões e geometrias identificadas como importantes, foram listadas como requisito do produto e por consequência não podem sofrer variações que ultrapassem as tolerâncias permitidas.

4.1.1. Análise do desenho técnico 2D

No componente Algema foram identificadas as geometrias e pontos de alinhamento, conforme ilustrado na FIGURA 36 e indicado pelas setas em verde. O componente Algema possui três referências de alinhamento, sendo representadas por "A", "B" e "C". A referência primária "A" possui uma geometria cilíndrica, sendo a secundária "B" uma linha determinada por dois pontos simétricos e a terciária "C" um ponto médio determinado pela simetria de dois planos. O componente é composto por seis dimensões importantes, identificadas pelas tolerâncias geométricas e dimensionais. Essas dimensões e geometrias de alinhamento indicam os requisitos do produto e por consequência devem ser atingidas.

FIGURA 36: Representação técnica do desenho 2D do componente Algema, sendo indicado por meio das setas as características importantes do produto

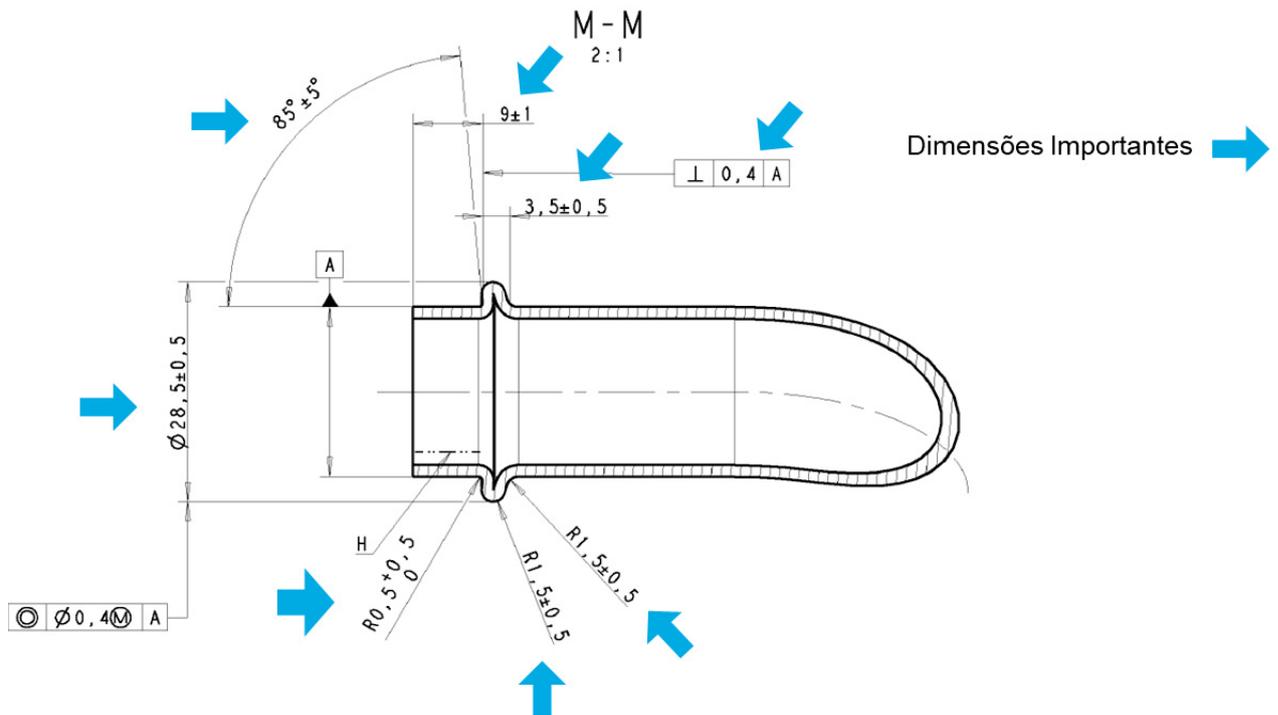


FONTE: O Autor (2020)

O mesmo procedimento de análise foi realizado para o Tubo de Resfriamento. A condição de alinhamento deste componente é composta por superfícies e geometrias que contém um ponto. Este tipo de alinhamento é conhecido como RPS (RPS, do inglês *Reference Point System*), e muito usual nas peças automotivas.

A peça é composta por seis pontos de alinhamento, sendo três pontos no eixo Z, dois pontos no eixo Y e um ponto no eixo X. Os valores dos pontos e as respectivas localizações estão demarcados em vermelho conforme ilustrado na FIGURA 38. As dimensões críticas da peça estão indicadas por meio das setas, conforme FIGURA 37 e FIGURA 38.

FIGURA 37: Representação técnica do desenho 2D do componente Tubo de Resfriamento", sendo indicado por meio das setas as características dimensionais importantes do produto

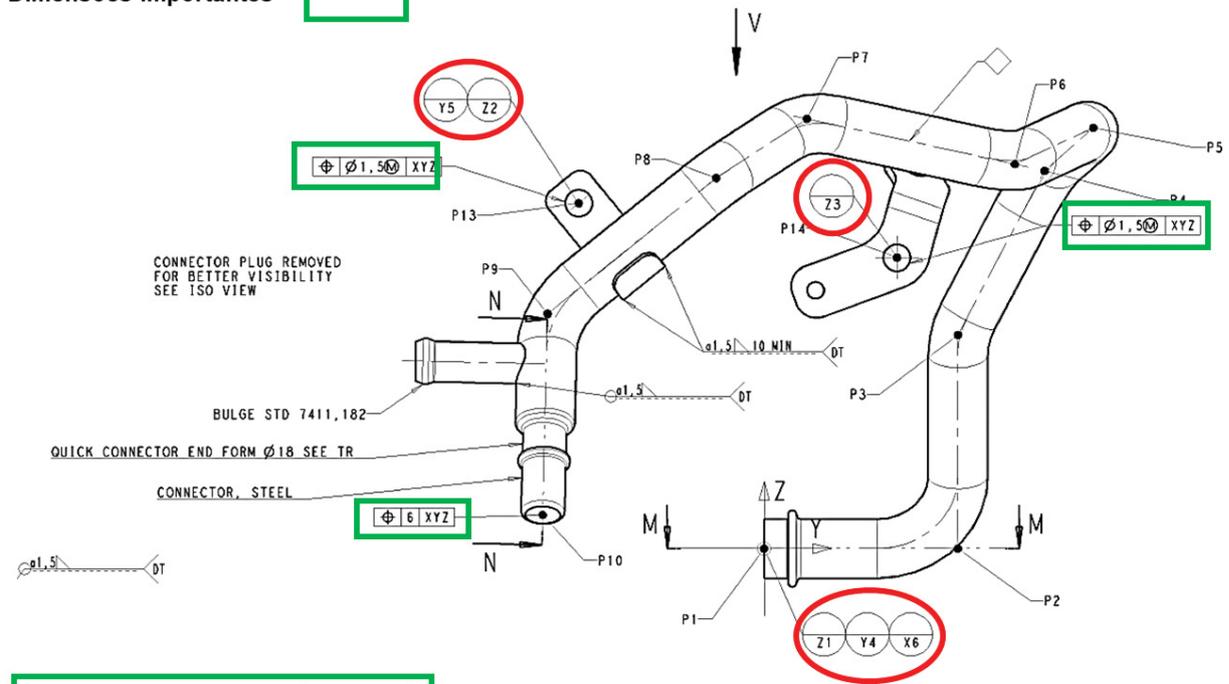


FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 38: Representação técnica do desenho 2D do Tubo de Resfriamento, sendo indicado por meio das demarcações legendadas as características importantes do produto

Referências de Alinhamento 

Dimensões Importantes 

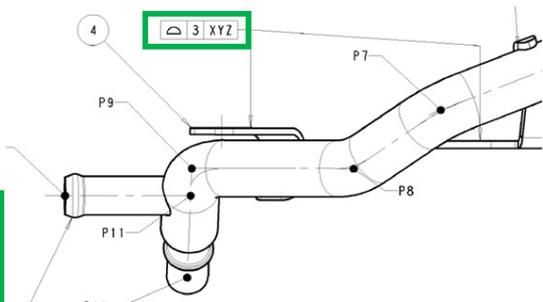


UNLESS OTHERWISE STATED:  6 XYZ

REFERENCE POINTS				
	X	Y	Z	
Z1	0	0	0	PIPE END
Z2	227,5	-68,5	128,5	BRACKET
Z3	232,5	49	108,2	BRACKET
Y4	0	0	0	PIPE END
Y5	227,5	-68,5	128,5	BRACKET
X6	0	0	0	PIPE END

COOLANT PIPE (1*)				
	X	Y	Z	
P1	0	0	0	
P2	0	71,5	0	
P3	38,5	71,5	79,5	
P4	50,5	103,5	140,5	
P5	114	121,5	156,5	
P6	190,5	92,5	143	
P7	220,5	15,7	159,9	
P8	243,3	-17,7	137,9	
P9	243,2	-80	87,4	
P10	285,6	-81,8	12,6	

HOSE CONNECTION (1*)				
	X	Y	Z	
P11	253,8	-80,4	68,7	
P12	253,8	-128,8	69,8	



BRACKET 21421202 (1*)				
	X	Y	Z	
P13	227,5	-68,5	128,5	

BRACKET 21734253 (1*)				
	X	Y	Z	
P14	232,5	49	108,2	

FONTE: O Autor (2020)

4.1.2. Análise da aplicabilidade do produto

A análise virtual das peças também foi conduzida de forma separada, pois a aplicabilidade das peças em estudo são totalmente dessemelhantes. Esta análise teve como função identificar superfícies e geometrias de contato durante a montagem final da peça, proporcionando assim uma melhor visualização das características dimensionais importantes.

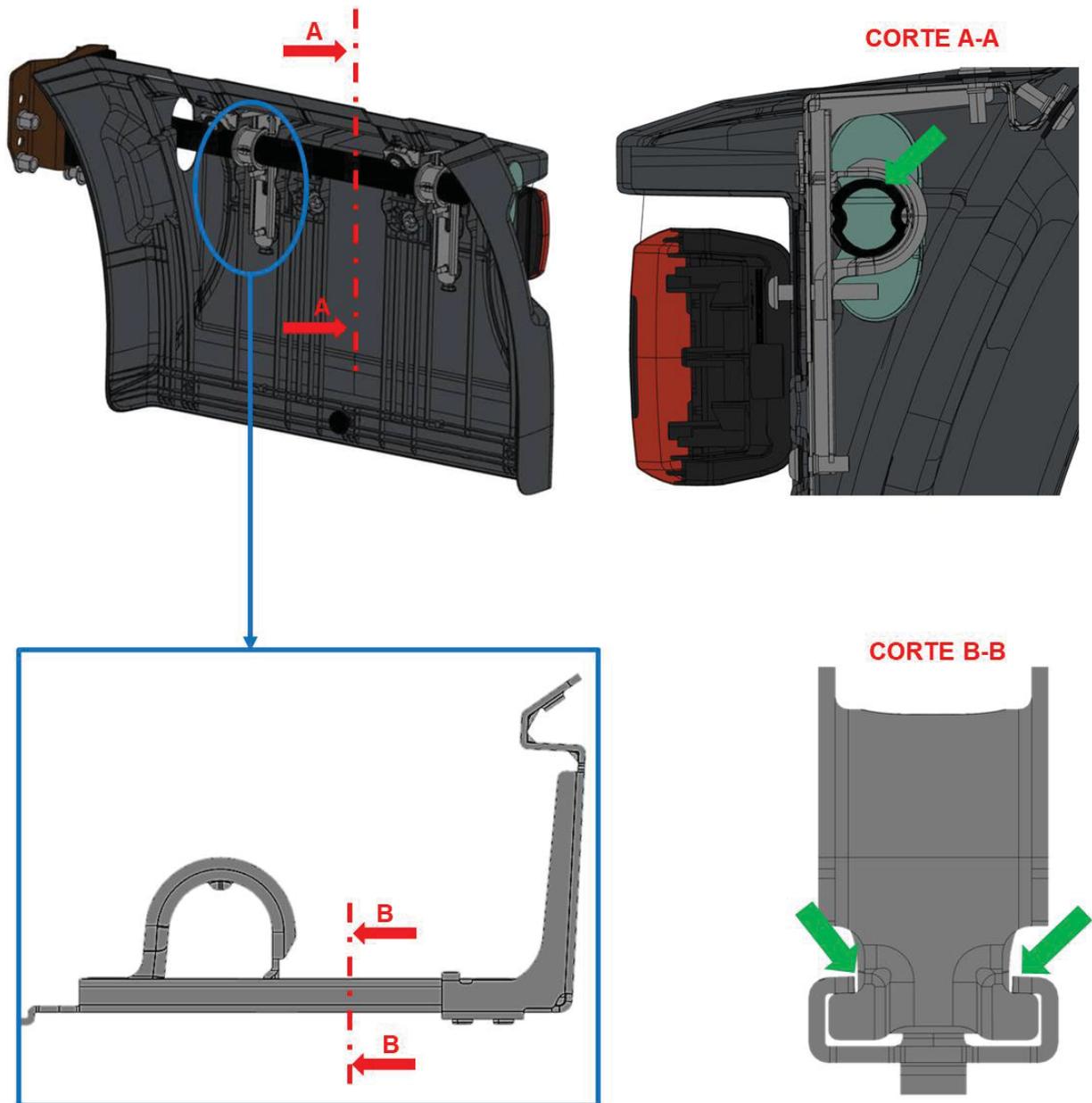
4.1.2.1. *Análise da aplicabilidade da peça Algema*

Conforme destacado na FIGURA 39 a peça Algema tem como função em assegurar a fixação do para-lama plástico no tubo de ancoragem. Por meio do corte transversal realizado foi possível identificar três superfícies de grande importância, conforme indicado pelas setas. Sendo que as superfícies identificadas já estão sendo controladas por meio do desenho 2D.

4.1.2.2. *Análise da aplicabilidade do Tubo de Resfriamento*

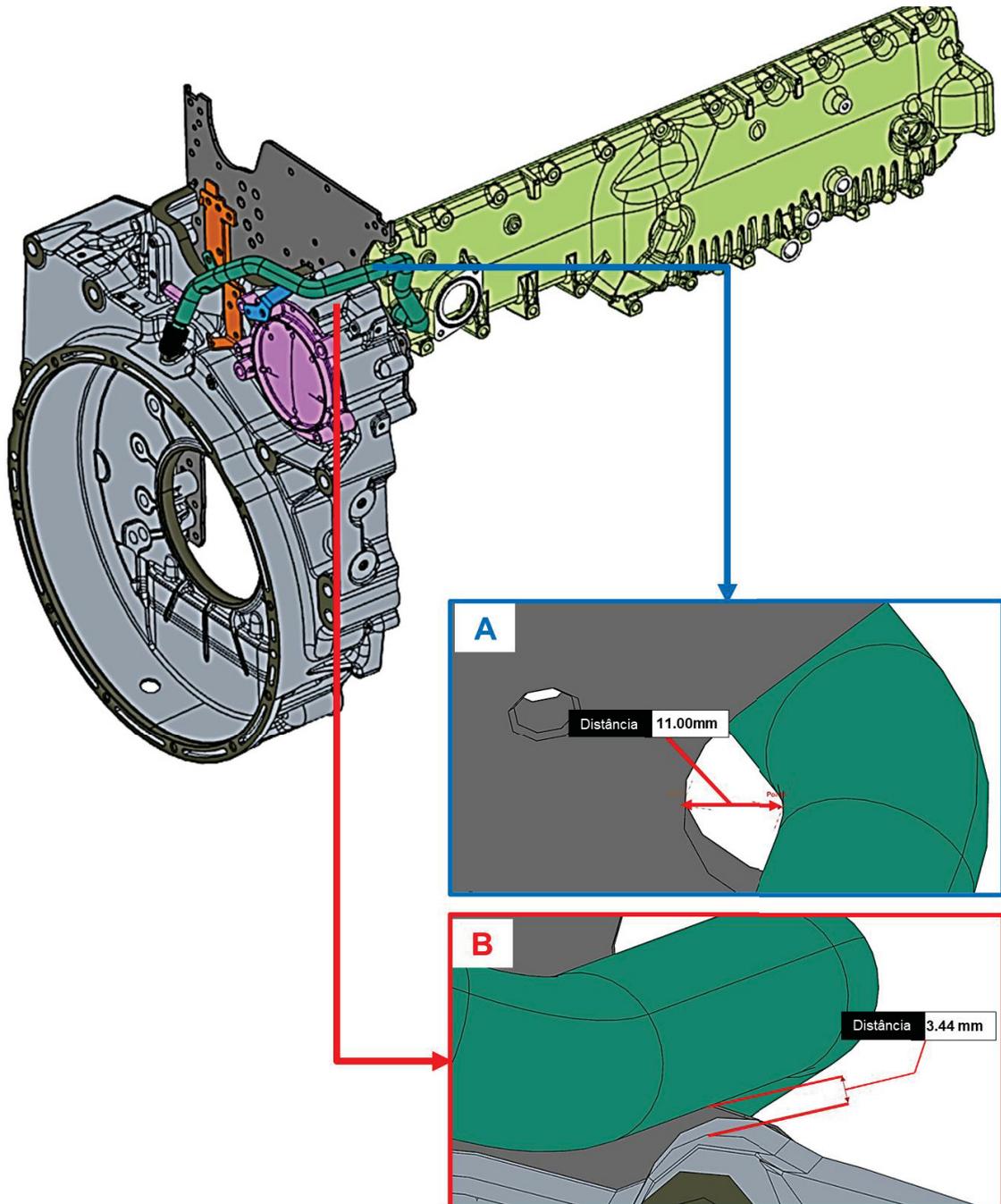
O tubo de resfriamento tem como função resfriar as galerias internas do bloco fundido do motor do veículo. Conforme ilustrado na FIGURA 40 o tubo de resfriamento está montado na parte externa do motor, sendo fixado com parafusos por meios dos suportes soldados. Conforme detalhamento A e B, as regiões de curvas do tubo de resfriamento estão próximas às peças periféricas do motor, criando assim possibilidades de atrito ou não montagem da peça, caso não atenda às especificações. No desenho técnico foi observado que as superfícies e pontos identificados estão sendo controladas por meio do desenho 2D. Desta forma enfatiza a criticidade e necessidade de controle.

FIGURA 39: Representação virtual da montagem da peça Algema, tendo como propósito indicar as regiões crítica em relação aos outros componentes



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 40: Representação virtual da montagem do tubo de resfriamento, tendo como proposito indicar as regiões críticas em relação aos outros componentes



FONTE: O Autor (2020)

4.2. Análise de Limitações de Equipamento, Material e Processo

Nessa seção é apresentada as limitações do equipamento e material utilizado e em seguida as exigências dos parâmetros de processo predeterminados para atingir as dimensões e características estabelecidas na análise de requisito de produto.

4.2.1. Equipamento de AM

A impressora disponível e empregada na fabricação das peças foi a SethiS2, que está ilustrada na FIGURA 41. Esta máquina emprega o princípio de extrusão de material e tem as seguintes características: Volume de impressão de 200x200x200mm (comprimento, largura e altura, respectivamente), possui resolução de camada de 50 microns (0,05mm) à 300 microns (0,3mm), possui apenas um extrusor, atinge temperatura de extrusão de até 260°C, possui mesa aquecida, estrutura fechada, alcança velocidade de impressão de até 150 mm/s e trabalha preferencialmente com os materiais PLA, ABS e PETG.

FIGURA 41: Impressora SethiS2 utilizada para conduzir o presente trabalho



FONTE: Adaptado de Sethi3D (2020)

4.2.2. Material

O material utilizado foi analisado levando em consideração a aplicabilidade da peça, temperatura do ambiente, esforço mecânico, armazenagem, custo de fabricação, entre outros. Conforme reportado no tópico 2.2.3, os polímeros mais usados no princípio de extrusão de material são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) e o Ácido poliláctico (PLA) por aliar boas propriedades mecânicas e fácil processamento.

As Peças Modelo geralmente são utilizadas em ambientes com temperatura controlada, tais como ferramentaria e salas de medição. Entretanto, às vezes se faz necessário levar as peças no chão de fábrica para revalidar os dispositivos de controle de forma rápida, estes ambientes geralmente são quentes e propícios a danos superficiais. Diante disso, para a fabricação das peças neste trabalho foi escolhido o material ABS por ser mais resistente termicamente que o PLA e apresentar boa resistência mecânica.

4.2.3. Processo

As Peças Modelo tem como requisito garantir tolerâncias dimensionais, geométricas e boa qualidade superficial. Portanto, os parâmetros de processo definidos objetivaram respeitar as limitações da máquina AM a ser utilizada e proporcionar condições para manufaturar as peças conforme os requisitos estabelecidos inicialmente. Os parâmetros de processo utilizados na fabricação das peças são sumarizados no QUADRO 5 e as justificativas são descritas a seguir:

- **Altura de Linhas/Camada:** O menor valor de tolerância requisitado entre as peças é de 0,3 mm. Para atender esta exigência foi utilizado a altura de camada de 0,2 mm. Este valor de altura possui uma precisão dimensional 50% maior do que a tolerância exigida. Portanto, esta altura deve atender os requisitos dimensionais e a qualidade superficial demandada. Inerente ao número de linhas contorno, número de camadas sólidas na parte inferior e superior. Foi determinado para tais características o valor de três linhas de contorno e três camadas, com o intuito em trazer maior rigidez às peças e por consequência maior resistência mecânica.
- **Velocidade de Impressão:** Para velocidades foram parametrizados valores baixos, com o objetivo em assegurar a adesão da peça na plataforma de fabricação, reduzir a vibração da máquina e por consequência assegurar uma boa qualidade superficial e estabilidade dimensional.
- **Material:** O material a ser utilizado para este estudo de caso é o ABS. Conforme já reportado no tópico 4.2.2.

- **Temperatura de extrusão e plataforma:** As temperaturas de processo foram parametrizadas levando em consideração as recomendações do fabricante do material.
- **Tipo e percentual de Preenchimento:** Para fornecer as peças uma maior resistência mecânica foi selecionado o padrão de preenchimento retangular com valor de 30%.
- **Raft (saia):** Este parâmetro não será utilizado para manufaturar as peças, portanto não foi determinado valores para o mesmo.
- **Estrutura de Suporte:** Por fim os valores de suporte determinados, possuem características dimensionais para tornar viável a manufatura das áreas suspensas com melhor aspecto superficial.
-

QUADRO 5: Parâmetros de processo utilizados na manufatura das Peças Modelo

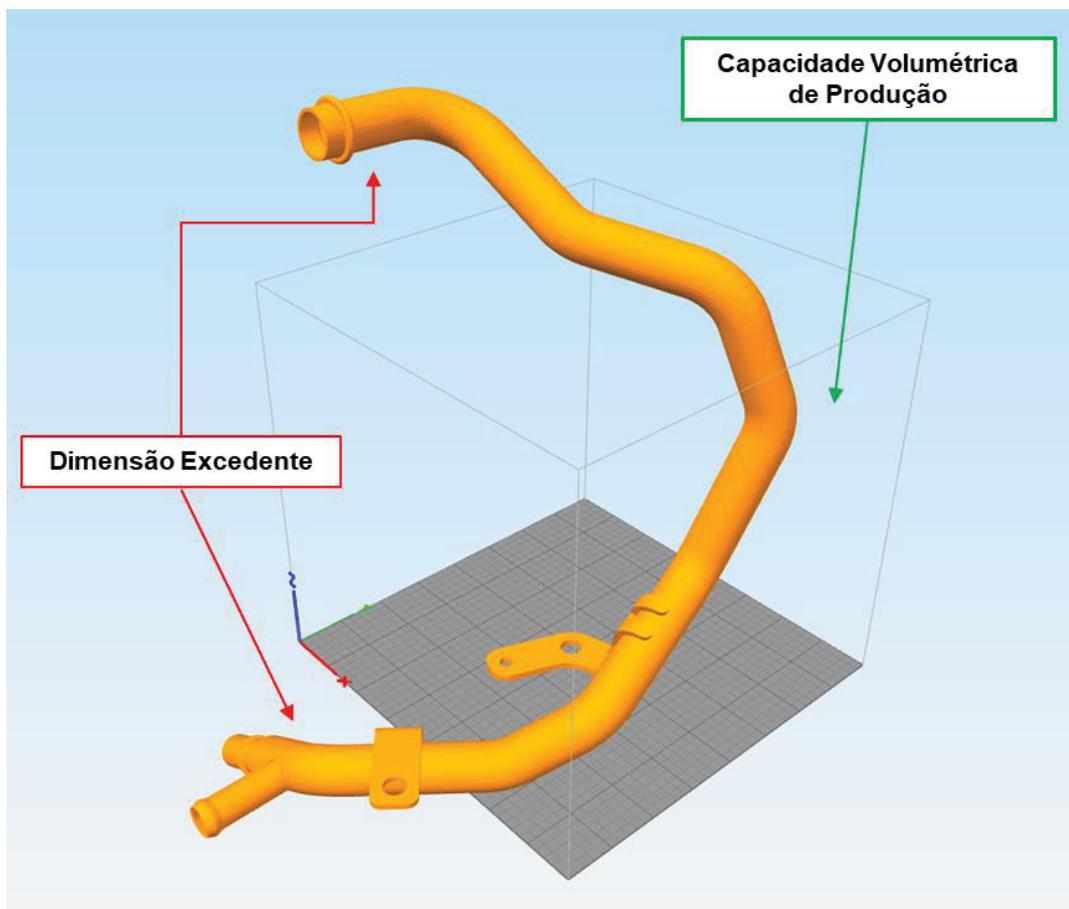
Propriedades	Parâmetro	Valor
Linhas/Camadas	Altura da camada	0,2 mm
	Altura da primeira camada	0,2 mm
	Largura da linha de contorno	0,2 mm
	Número de linhas de contorno	3
	Número de camadas sólidas no piso	3
	Número de camadas sólidas no teto	3
Velocidade	Velocidade da primeira camada	15mm/s
	Velocidade de extrusão dos contornos	20mm/s
	Velocidade de extrusão do preenchimento	30mm/s
Material	Diâmetro do filamento	1,75mm
	Material	ABS
Temperatura	Temperatura de impressão	230°C
	Temperatura da plataforma (mesa)	110°C
Preenchimento	Padrão de preenchimento	Retangular
	% de preenchimento	30%
Raft*	Número de camadas	0
	Offset da peça	0
	Distância de separação	0
	% de preenchimento	0
Suporte	Altura da camada	0,2 mm
	Altura da primeira camada	0,2 mm
	Largura da primeira camada	0,2 mm
	Número de colunas sólidas na parede	3

FONTE: O Autor (2020)

4.3. Avaliação de *Design* para AM

Nessa etapa foi empregada a metodologia proposta por Booth *et al.* (2017), conforme reportado na FIGURA 42 e FIGURA 43 e as notas apresentadas ao término da avaliação indicaram que as peças possuem *designs* compatíveis para serem manufaturados com o auxílio da AM, pois, as avaliações demonstraram notas inferiores a 20 pontos que indica uma probabilidade moderada das peças serem produzidas com sucesso. Porém, ao analisar a capacidade volumétrica de produção da máquina disponível, foi observado que as dimensões do tubo de resfriamento excedem de forma significativa o volume suportado, conforme demonstrado na FIGURA 41. Desta forma, foi necessário readequar o *design* da peça para que se tornasse possível produzi-la por meio da máquina de AM disponível. Com relação a peça Algema as dimensões foram compatíveis e não foi necessária a readequação do *design*.

FIGURA 42: Tubo de resfriamento posicionado na plataforma de fabricação, com ênfase nas condições dimensionais excedentes em relação a capacidade volumétrica de produção



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 43: Metodologia de Booth aplicada para avaliar o *Design* da peça Algeima

Projeto para Manufatura Aditiva (DFAM)		Um método rápido para reduzir o número de falhas de impressão e prototipagem, por Joran Booth. Instrução: Selecione um opção para cada categoria da peça que planeja imprimir. E por fim calcule a pontuação final				Soma Entre Linhas	Total		
Selecione uma Opção	Complexidade	Selecione uma Opção	Funcionalidade	Selecione uma Opção	Remoção de Material	Selecione uma Opção	Recursos não suportados		
<input type="radio"/>	A forma da peça é a mesma de materiais comuns de estoque ou é completamente 2D 	<input type="radio"/>	As superfícies de contato são superfícies de apoio, ou espera-se que durem mais de 1000 ciclos 	<input type="radio"/>	A peça é menor ou do mesmo tamanho que a estrutura de suporte necessária 	<input checked="" type="radio"/>	Existem recursos longos e sem suporte 	1x5	5
<input type="radio"/>	A peça é praticamente 2d e pode ser feita em uma fresadora ou torno sem reposicionamento 	<input type="radio"/>	A superfície de contato se move significativamente, sofre grandes forças ou deve suportar 100-1000 ciclos 	<input type="radio"/>	Existem pequenas lacunas que exigirão estrutura de suporte 	<input type="radio"/>	Existem pequenos recursos não suportados 	0x4	0
<input type="radio"/>	A peça pode ser feita em uma fresadora ou torno, mas somente após o reposicionamento na pinça pelo menos uma vez 	<input checked="" type="radio"/>	A superfície de contato se move um pouco, sofre forças moderadas ou espera-se que dure 100-1000 ciclos 	<input type="radio"/>	Cavidades ou canais internos não têm abertura para remoção de material 	<input type="radio"/>	Os recursos com presença de saliência apresentam suporte inclinado 	1x3	3
<input checked="" type="radio"/>	A curvatura da peça é complexa para uma operação de usinagem, como fresadora ou torno 	<input type="radio"/>	A superfície de acoplamento se moverá minimamente, sofrerá baixas forças ou será projetada para suportar 2-10 ciclos 	<input checked="" type="radio"/>	O material pode ser facilmente removido de cavidades internas, canais ou furos 	<input type="radio"/>	Os recursos de saliência têm um suporte mínimo de 45°deg 	2x2	4
<input type="radio"/>	Existem recursos internos ou a curvatura da superfície é muito complexa para ser usinada 	<input type="radio"/>	A superfície é puramente não funcional ou praticamente não apresenta ciclos 	<input type="radio"/>	Não há canais internos, cavidades ou furos 	<input type="radio"/>	A peça esta orientada para não ter regiões salientes 	0x1	0
Selecione uma Opção	Recursos Finos	Selecione uma Opção	Concentração de Estresse	Selecione uma Opção	Tolerância	Selecione uma Opção	Exatidão Geométrica	+	
<input type="radio"/>	Algumas paredes têm menos de 1,5 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos internos não possuem chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro e comprimento são nominais 	<input type="radio"/>	A peça tem grande superfície plana ou tem uma forma que é importante ser exata 	1x5	0
<input type="radio"/>	Paredes com valores entre 1,5 - 3,0 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos possuem chanfros, filetes ou nervuras 	<input checked="" type="radio"/>	As dimensões de diâmetro ou comprimento são ajustados para contração ou encaixe 	<input checked="" type="radio"/>	A peça tem superfícies planas de tamanho médio ou formas que devem ser quase exatas 	2x3	6
<input checked="" type="radio"/>	Paredes com valores maiores que 3,0 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos possuem recursos significativos de chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro e comprimento não são importantes 	<input type="radio"/>	A peça tem pequenas superfícies ou nenhuma superfície plana ou formas que precisam ser exatas 	1x1	1
Pré Avaliação * Considere um processo de fabricação diferente † Considere fortemente um processo de fabricação diferente				Pontuação Total 33-40 Precisa Redesenhar 24-32 Considere Redesenhar 16-23 Probabilidade moderada de sucesso 8-15 Maior probabilidade de sucesso		= Total Geral		19	

FONTE: Adaptado de Booth et al. (2017)

FIGURA 44: Metodologia de Booth aplicada para avaliar o *Design* da peça tubo de resfriamento

Projeto para Manufatura Aditiva (DFAM)		Um método rápido para reduzir o número de falhas de impressão e prototipagem, por Joran Booth. Instrução: Selecione um opção para cada categoria da peça que planeja imprimir. E por fim calcule a pontuação final							
Selecione uma Opção	Complexidade	Selecione uma Opção	Funcionalidade	Selecione uma Opção	Remoção de Material	Selecione uma Opção	Recursos não suportados	Soma Entre Linhas	Total
<input type="radio"/>	A forma da peça é a mesma de materiais comuns de estoque ou é completamente 2D † 	<input type="radio"/>	As superfícies de contato são superfícies de apoio, ou espera-se que durem mais de 1000 ciclos * 	<input type="radio"/>	A peça é menor ou do mesmo tamanho que a estrutura de suporte necessária 	<input checked="" type="radio"/>	Existem recursos longos e sem suporte 	1x5	5
<input type="radio"/>	A peça é praticamente 2d e pode ser feita em uma fresadora ou torno sem reposicionamento * 	<input type="radio"/>	A superfície de contato se move significativamente, sofre grandes forças ou deve suportar 100-1000 ciclos * 	<input type="radio"/>	Existem pequenas lacunas que exigirão estrutura de suporte 	<input type="radio"/>	Existem pequenos recursos não suportados 	0x4	0
<input type="radio"/>	A peça pode ser feita em uma fresadora ou torno, mas somente após o reposicionamento na pinça pelo menos uma vez 	<input checked="" type="radio"/>	A superfície de contato se move um pouco, sofre forças moderadas ou espera-se que dure 100-1000 ciclos 	<input type="radio"/>	Cavidades ou canais internos não têm abertura para remoção de material 	<input type="radio"/>	Os recursos com presença de saliência apresentam suporte inclinado 	1x3	3
<input type="radio"/>	A curvatura da peça é complexa para uma operação de usinagem, como fresadora ou torno 	<input type="radio"/>	A superfície de acoplamento se moverá minimamente, sofrerá baixas forças ou será projetada para suportar 2-10 ciclos 	<input checked="" type="radio"/>	O material pode ser facilmente removido de cavidades internas, canais ou furos 	<input checked="" type="radio"/>	Os recursos de saliência têm um suporte mínimo de 45°deg 	2x2	4
<input checked="" type="radio"/>	Existem recursos internos ou a curvatura da superfície é muito complexa para ser usinada 	<input type="radio"/>	A superfície é puramente não funcional ou praticamente não apresenta ciclos 	<input type="radio"/>	Não há canais internos, cavidades ou furos 	<input type="radio"/>	A peça esta orientada para não ter regiões salientes 	0x1	0
Selecione uma Opção	Recursos Finos	Selecione uma Opção	Concentração de Estresse	Selecione uma Opção	Tolerância	Selecione uma Opção	Exatidão Geométrica	+	
<input type="radio"/>	Algumas paredes têm menos de 1,5 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos internos não possuem chanfros, filetes ou nervuras 	<input checked="" type="radio"/>	As dimensões de diâmetro e comprimento são nominais 	<input type="radio"/>	A peça tem grande superfície plana ou tem uma forma que é importante ser exata 	1x5	0
<input type="radio"/>	Paredes com valores entre 1,5 - 3,0 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos possuem chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro ou comprimento são ajustados para contração ou encaixe 	<input checked="" type="radio"/>	A peça tem superfícies planas de tamanho médio ou formas que devem ser quase exatas 	1x3	3
<input checked="" type="radio"/>	Paredes com valores maiores que 3,0 mm de espessura 	<input type="radio"/>	Cantos possuem recursos significativos de chanfros, filetes ou nervuras 	<input type="radio"/>	As dimensões de diâmetro e comprimento não são importantes 	<input checked="" type="radio"/>	A peça tem pequenas superfícies ou nenhuma superfície plana ou formas que precisam ser exatas 	2x1	2
Pré Avaliação * Considere um processo de fabricação diferente † Considere fortemente um processo de fabricação diferente					Pontuação Total 33-40 Precisa Redesenhar 24-32 Considere Redesenhar 16-23 Probabilidade moderada de sucesso 8-15 Maior probabilidade de sucesso		= Total Geral		17

FONTE: Adaptado de Booth et al. (2017)

4.4. Adequação de *Design* para AM

As dimensões do tubo de resfriamento excederam a capacidade volumétrica de produção da máquina, criando assim a necessidade de repensar o *design* da peça ou separá-la em partes para posterior montagem. Para encontrar a solução do problema reportado, foi utilizado como suporte a matriz de recomendação ilustrada na FIGURA 33. Conforme interpretação da matriz, a solução recomendada é dividir a peça em partes, para permitir a fabricação por AM.

Primeiramente, o tubo de resfriamento foi dividido em dez partes conforme ilustrado na FIGURA 45. A divisão consiste em sete partes correlacionados ao tubo principal e três partes inerentes aos suportes soldados e tubo de menor diâmetro. As divisões do tubo principal foram executadas na região central dos cilindros de maior comprimento, com o propósito de se afastar das zonas curvadas e reduzir a possibilidade de desvios dimensionais.

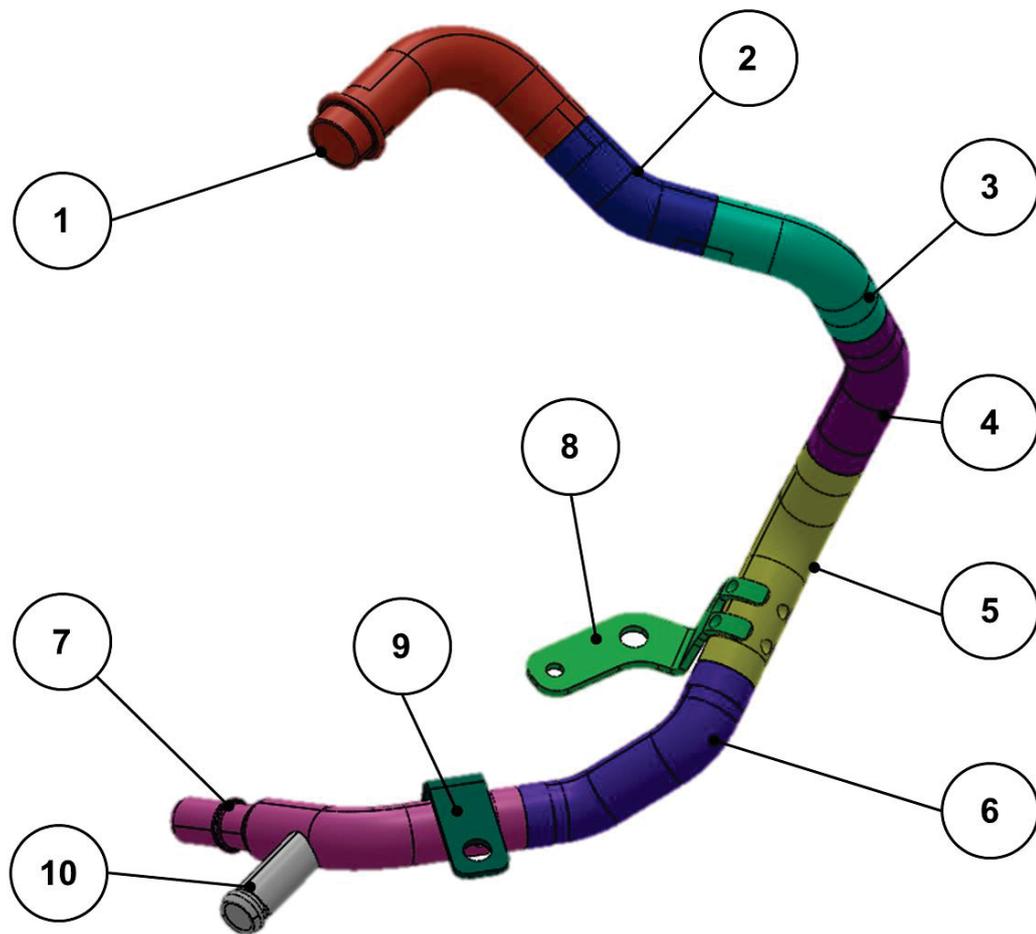
Em seguida o tubo principal foi preenchido com material de forma que se torne um sólido de único diâmetro (FIGURA 46), uma vez que apenas as superfícies externas são necessárias. Esta modificação tem como objetivo evitar material de suporte interno durante a fabricação por meio da AM e proporcionar maior resistência mecânica para a peça.

Para interligar às sete partes do tubo principal foram projetadas conexões nas extremidades em forma de polígonos (FIGURA 47). Tais conexões foram unidas com pinos de mesma geometria e então fixadas por meio de super cola instantânea para prover estabilidade mecânica.

Por fim, os suportes soldados e o tubo de menor diâmetro foram acoplados e fixados por meio de parafusos. Para realizar as fixações foram criados furos passantes entre o corpo dos componentes e o tubo principal. A decisão em manufaturar os componentes de forma separada, tem como justificativa em proporcionar a manufatura do Tubo de resfriamento, devido a limitação volumétrica de fabricação encontrada na máquina utilizada.

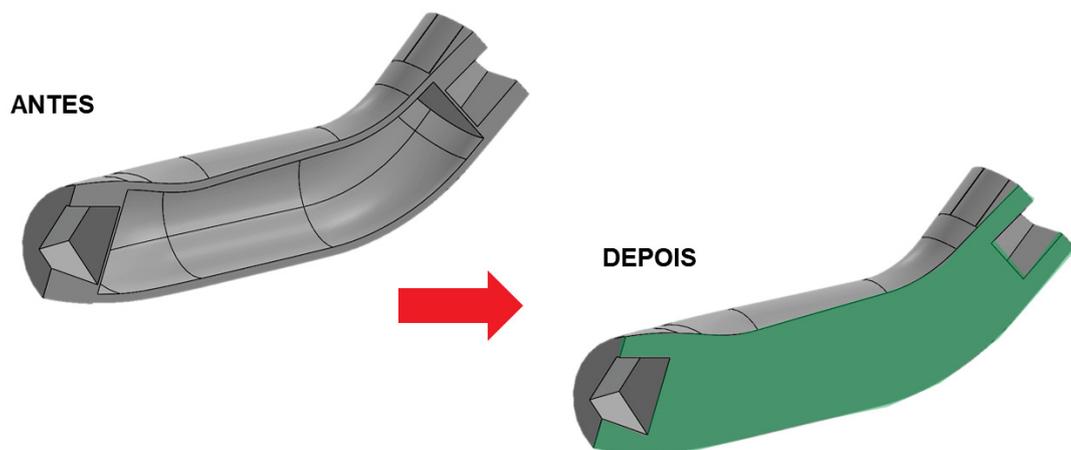
Com o término da readequação de *design* foi possível iniciar as etapas subsequentes de planejamento de processo, simulação e fabricação.

FIGURA 45: Tudo de Resfriamento dividido em dez partes para atender a readequação de *design* exigida



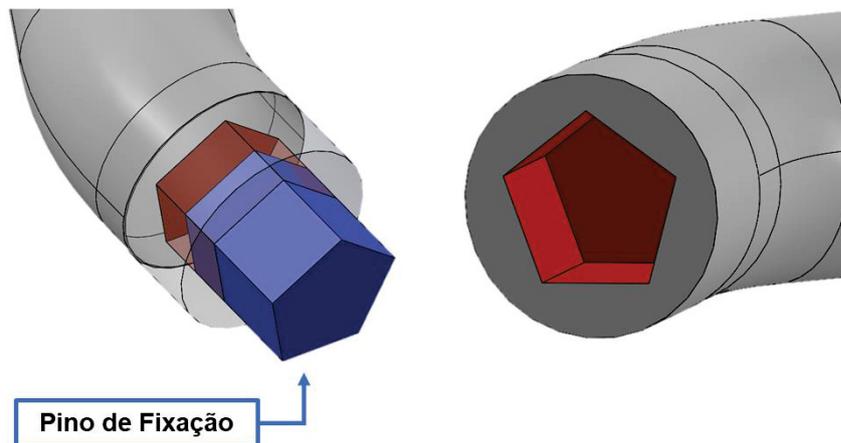
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 46: Tubo principal preenchido com material de forma que se torne um sólido de único diâmetro



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 47: Conexões em forma de polígonos projetadas para interligar às partes do tubo principal



FONTE: O Autor (2020)

4.5. Planejamento de Processo

O planejamento de processo das peças a serem fabricadas, foi conduzido em três etapas. Sendo que primeiramente foi determinada a melhor orientação em relação a plataforma de fabricação, em seguida configuradas as regiões de suporte e por fim definidos os parâmetros de fabricação no *software* de planejamento utilizado.

4.5.1. Orientação do componente e Estruturas de Suporte

Com o propósito em evitar estrutura de suporte e assegurar o atendimento das dimensões de maior importância para o componente Algema, foi decidido em orientar a peça no sentido horizontal (XY). Conforme demonstrado na FIGURA 48, tal orientação proporciona área de contato significativa em relação a plataforma de fabricação e redução de material de suporte. Por consequência proporciona melhor qualidade superficial à peça.

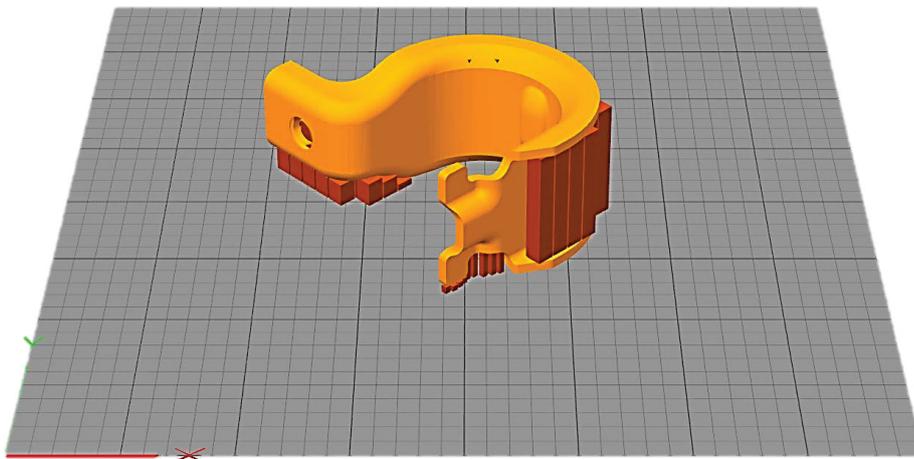
Com relação ao Tubo de Resfriamento, a readequação de *design* viabilizou a fabricação da peça. Conforme observado na FIGURA 49, as sete partes do tubo de maior diâmetro foram orientadas de forma que proporcione menor quantidade de suporte, sem prejudicar as características dimensionais das partes.

Os suportes soldados e o tubo de menor diâmetro foram dispostos em conjunto na plataforma e impressos em uma segunda batelada (FIGURA 50). A orientação dos suportes soldados predomina no sentido horizontal (XY), com o intuito de proporcionar

maior área de contato em relação à plataforma de fabricação. O tubo de menor diâmetro possui orientação predominante no eixo Z para assegurar o dimensional e geometria cilíndrica.

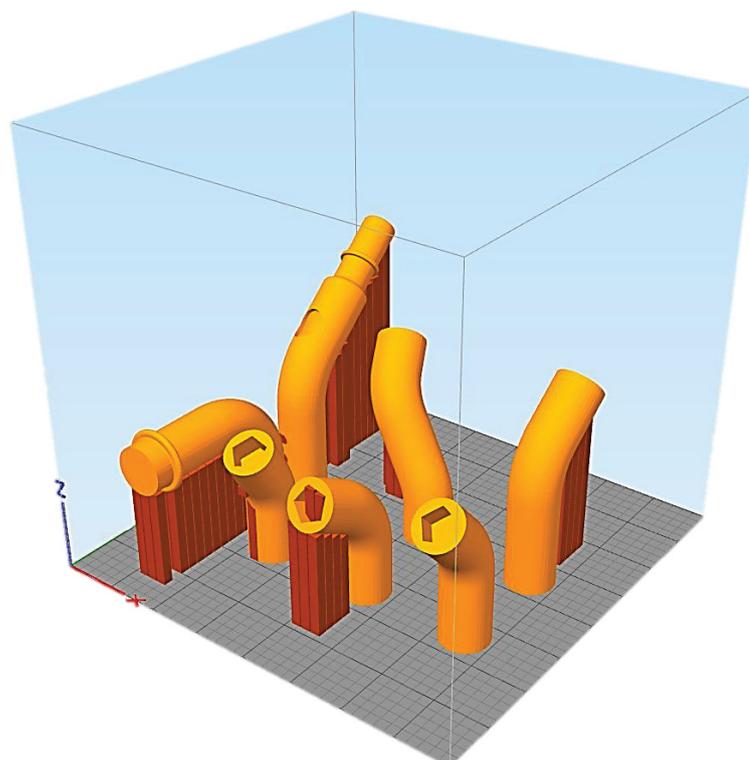
Em relação aos parâmetros da estrutura de suportes os valores utilizados estão mencionados no QUADRO 5 e foram definidos de forma a proporcionar melhor qualidade superficial e dimensional para as peças.

FIGURA 48: Peça Algema orientada no sentido horizontal (XY) e as estruturas de suporte aplicadas



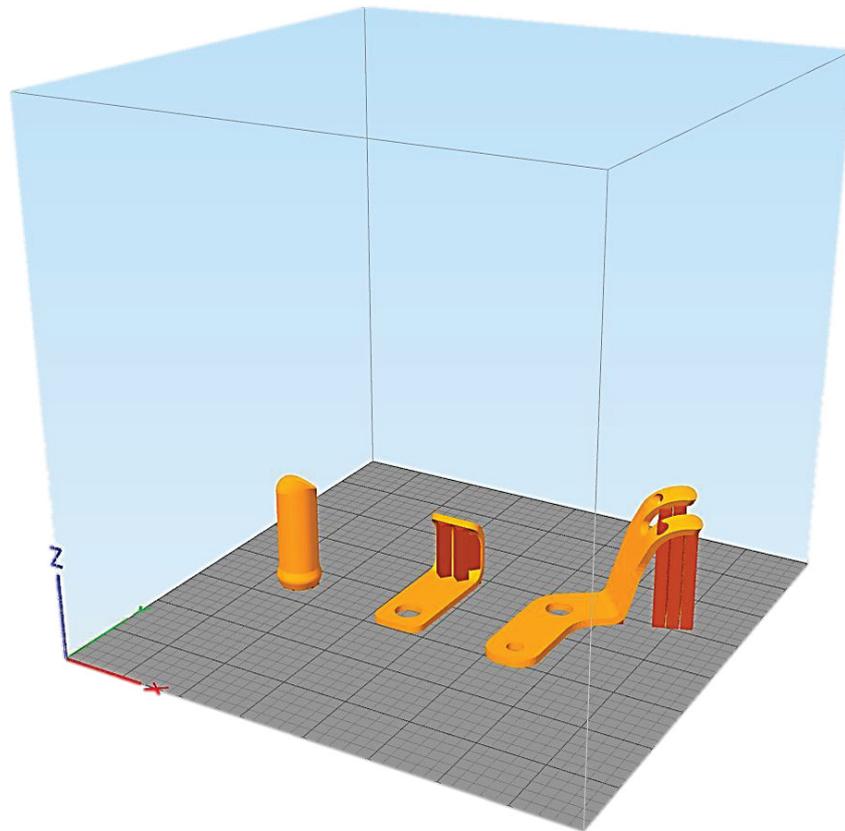
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 49: Partes do Tubo de resfriamento orientadas na plataforma de fabricação



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 50: Suportes soldados e tubo de menor diâmetro orientados na plataforma de fabricação, sendo as peças representadas pela cor laranja claro e as estruturas de suporte laranja escuro



FONTE: O Autor (2020)

4.5.2. Parametrização do *Software* e Simulação

Os parâmetros de impressão definidos estão sumarizados no QUADRO 5. Após todas as definições, foi possível simular o processo de fabricação das Peças Modelo e estimar o tempo, quantidade de material e peso final das peças.

Para a peça Algema, a simulação estimou 2h40min para fabricação, 10 metros de filamento e peso de 24g. Para o Tubo de Resfriamento a simulação estimou 12h30min para fabricação, 62 metros de filamento e peso 156g.

4.6. Fabricação e Pós-Processamento

Após a simulação de processo, o *software* gera um arquivo baseado em código “G”, com informações de controle para o funcionamento da impressora. Esse arquivo foi transferido para o equipamento e antes de iniciar a impressão foi garantido o correto

alinhamento da plataforma e a alimentação do material. Os resultados da fabricação das peças são apresentados no capítulo 5.

Com relação ao Pós-Processamento, foi necessário executar em ambas as peças a remoção das estruturas de suporte e pequenas rebarbas, além de pequenas melhorias no acabamento superficial por meio de lixa gramatura 600 e uma camada fina de tinta primer acrílico. Para o Tubo de Resfriamento também foi necessário unir e fixar as partes divididas. O detalhamento do Pós-Processamento também é apresentado no capítulo 5.

4.7. Análise Dimensional

Após as etapas de fabricação e pós-processamento, as peças foram dimensionadas com auxílio de uma máquina de medição por coordenadas do tipo Portal modelo ACCURA da marca ZEISS com uma incerteza de medição de 2,2 μ m.

Ao término da medição foram gerados os respectivos relatórios dimensionais para análise e validação. Os relatórios e os resultados de validação são apresentados no capítulo 5.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados referentes à aplicação do procedimento de DFAM proposto, assim como da fabricação por AM e validação do procedimento. A validação é feita comparando os resultados dimensionais das Peças Modelo fabricadas por AM com peças fabricadas por métodos tradicionais.

5.1. Procedimento de DFAM

O procedimento proposto permitiu analisar a viabilidade de fabricação de duas Peças Modelo por AM. Na primeira etapa do procedimento foram levantados os requisitos do produto e eles serviram de referência para analisar as limitações do processo e também para a posterior validação. A etapa seguinte consistiu em analisar as limitações do processo, tais como: Impressora 3D disponível, Material e Características do processo. Nessa etapa um limitador importante foi a disponibilidade de apenas uma impressora com volume de impressão insuficiente para a impressão da Peça Modelo Tubo de Resfriamento. Entretanto, essa foi uma limitação contornável e por meio da aplicação da matriz de recomendação de adequação do *design* ilustrada na FIGURA 33, a peça foi dividida em partes que couberam no volume de impressão e posteriormente foram montadas. Caso a análise da matriz de recomendação para adequação do *design* não apontasse uma alternativa viável, ou existisse alguma outra limitação de material, processo ou equipamento que não fosse contornável, o procedimento indica inviabilidade de fabricação por AM e as peças devem ser fabricadas por outros processos convencionais. Neste estudo, outros fatores limitantes não foram encontrados para as peças submetidas ao procedimento.

Na etapa seguinte, os *designs* das duas Peças Modelo foram submetidos a uma análise de adequação à fabricação por AM. O procedimento de DFAM planejado proposto por Booth *et al.* (2017) foi aplicado e o resultado foi 19 para a peça Algema e 17 para a peça Tubo de Resfriamento. Na escala de pontuação do procedimento, entre 16-23 indica probabilidade moderada de sucesso na fabricação por AM. Os pontos mais críticos analisados foram as tolerâncias requeridas em desenho, as superfícies de contato e os perfis geométricos das peças.

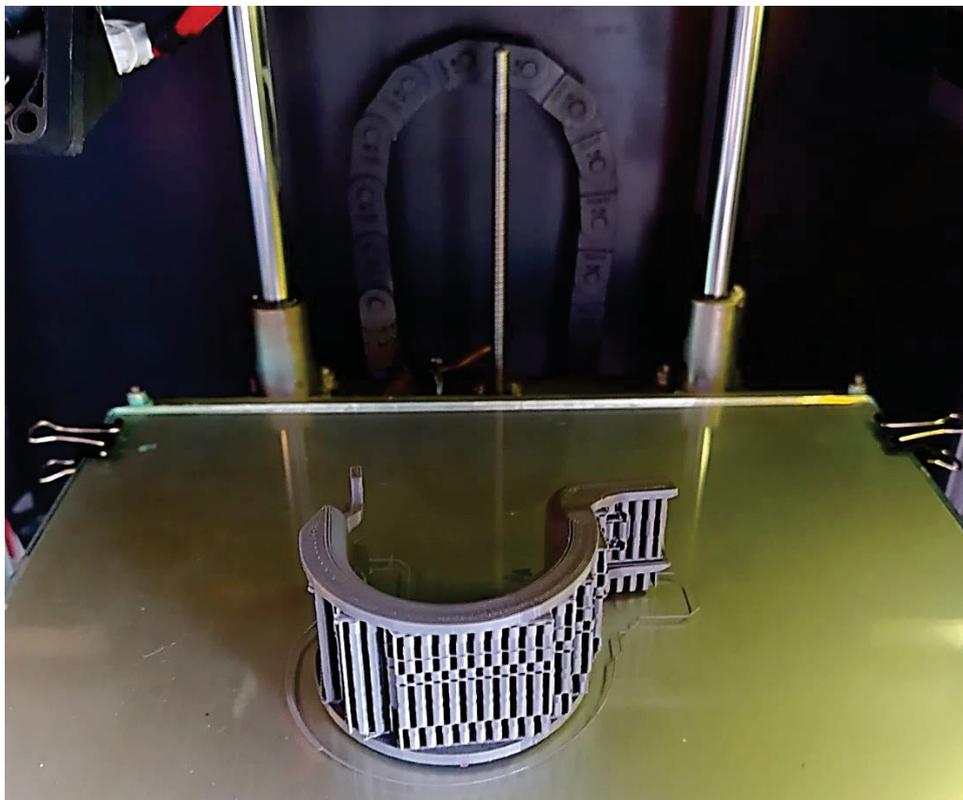
5.2. Manufatura das Peças Modelo

5.2.1. Manufatura da peça Algema por AM

O tempo total gasto na fabricação da peça Algema foi de 4h45min, sendo 3h45min para fabricar a peça por meio da AM (FIGURA 51) e 1h para executar a etapa de pós-processamento. O tempo de impressão excedeu em 1h5min a estimativa feita pelo *software* de planejamento de processo.

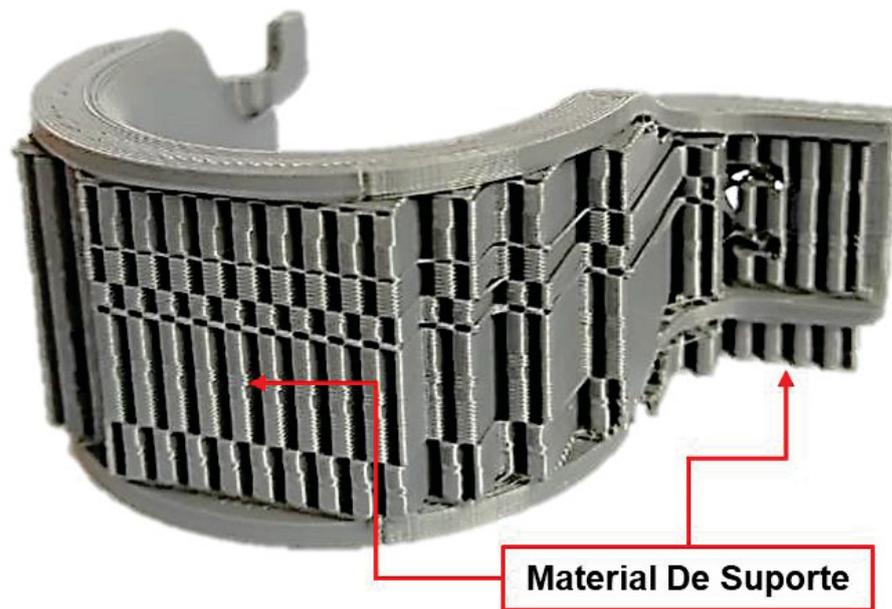
O pós-processamento iniciou com o descolamento da peça da plataforma de impressão. Na sequência foram removidas as estruturas de suporte e as rebarbas oriundas do processo de fabricação com ajuda de um pequeno alicate de ponta fina e outro de corte. Na FIGURA 52 pode ser vista a peça antes da remoção da plataforma. Como as peças fabricadas por AM apresentam o efeito “degrau de escada”, oriundo do processo de adição sucessiva de camada-sobre-camada, a Algema foi na sequência lixada e pintada com tinta acrílica de baixa espessura para melhorar o acabamento superficial. O resultado final pode ser visto na FIGURA 53.

FIGURA 51: Peça Modelo do componente Algema ao final da fabricação, posicionada na plataforma



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 52: Peça Modelo do componente Algema como removida da impressora 3D, apresentando estruturas de suporte e pequenas rebarbas e marcas do processo



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 53: Peça Modelo do componente Algema concluída e pronta para avaliação dimensional



FONTE: O Autor (2020)

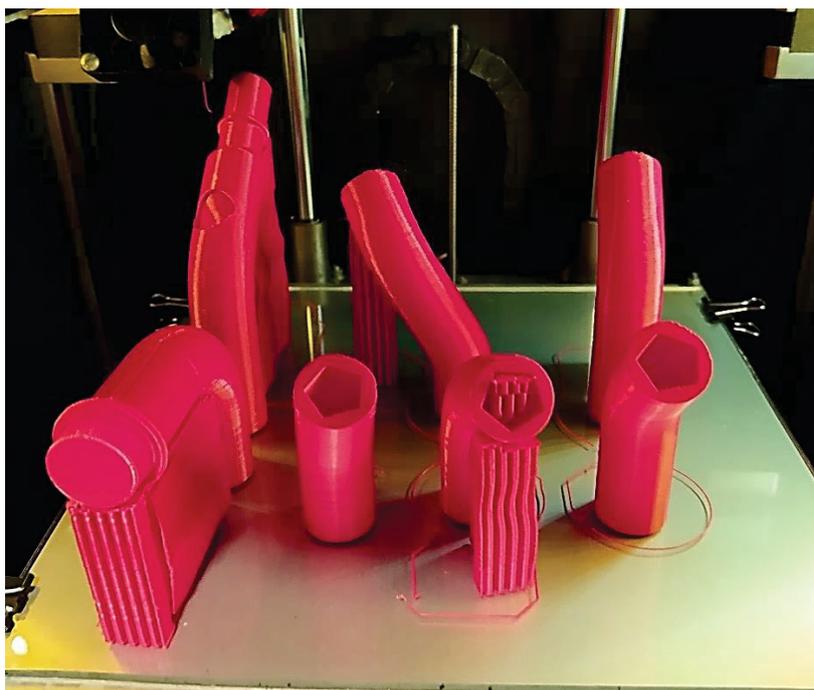
5.2.2. Manufatura do Tubo de Resfriamento por AM

A fabricação do Tubo de Resfriamento foi realizada em duas etapas, primeiramente foram fabricados os componentes tubulares, conforme ilustrado na FIGURA 54 e em seguida os componentes periféricos, demonstrados na FIGURA 55.

O tempo total de fabricação foi de 14h, sendo 11h de impressão e 3h de pós-processamento. Assim como aconteceu na peça Algema, as peças foram inicialmente descoladas da plataforma de impressão e submetidas a remoção das estruturas de suporte e rebarbas oriundas do processo de fabricação, (FIGURA 56). Para realizar a remoção das rebarbas e melhoria do acabamento superficial foi utilizada uma lixa com gramatura de 600 e em seguida a superfície recebeu uma camada de primer acrílico de baixa espessura.

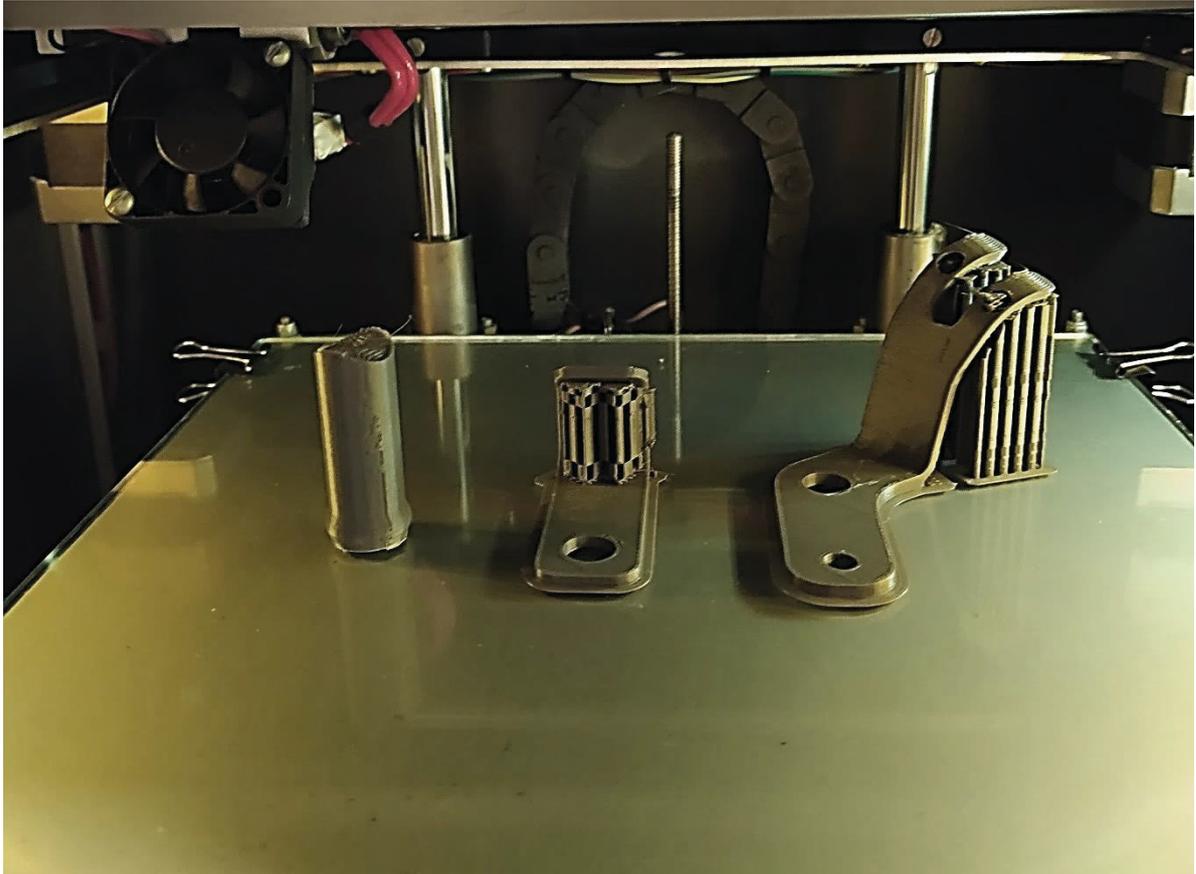
Após as operações de acabamento, os encaixes foram montados nas divisões tubulares como representado na FIGURA 57. Na sequência as partes foram montadas e coladas com super cola instantânea. Para concluir a montagem os componentes periféricos foram fixados no tubo principal por meio de parafusos, conforme ilustrado na FIGURA 58. Na FIGURA 59 pode ser vista a peça finalizada e pronta para a etapa seguinte de avaliação dimensional.

FIGURA 54: Tubo de Resfriamento na plataforma da máquina AM após conclusão da manufatura



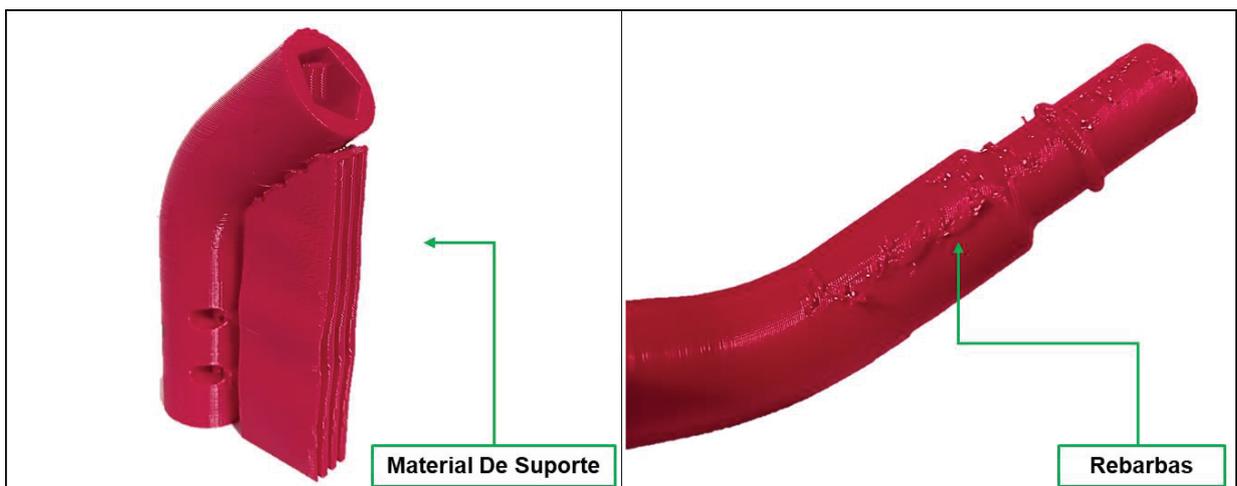
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 55: Componentes periféricos do Tubo de Resfriamento disponibilizados na plataforma da máquina AM após conclusão da fabricação



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 56: Partes do Tubo de Resfriamento removidas da máquina AM, tendo como ênfase o material de suporte e rebarbas que foram removidas na etapa de pós-processamento



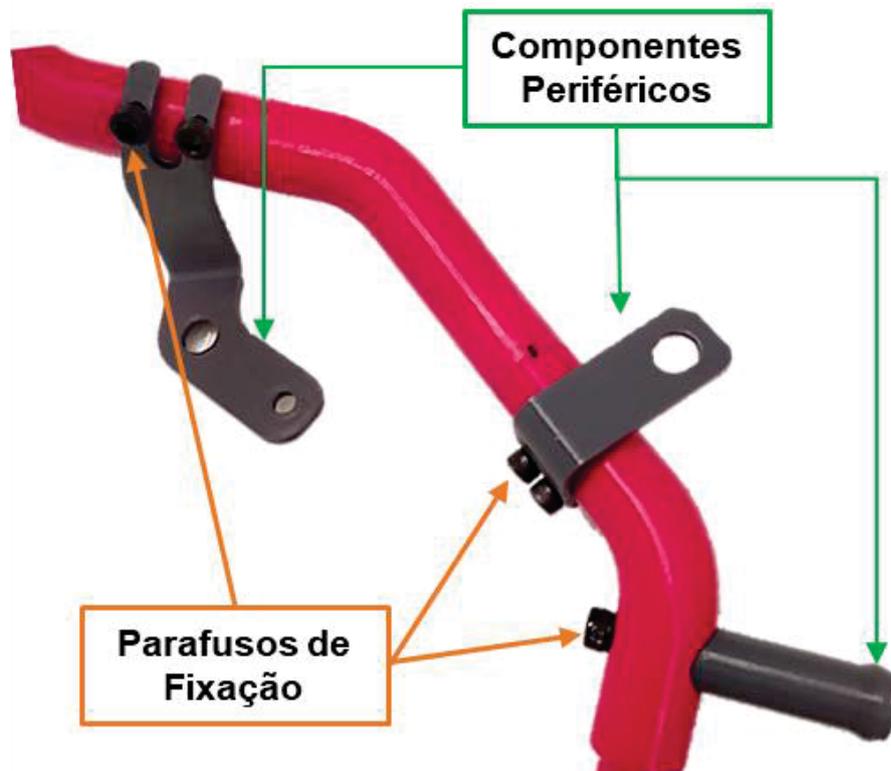
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 57: Ilustração do encaixe montado e utilizado para interligar às sete partes do tubo principal



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 58: Componentes periféricos fixados no tubo principal por meio de parafusos



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 59: Peça Modelo do Tubo de Resfriamento concluída e pronta para ser submetida aos ensaios dimensionais



FONTE: O Autor (2020)

5.3. Avaliação Dimensional

Com as Peças Modelo acabadas elas foram submetidas a avaliação dimensional em máquina de medição por coordenada da ZEISS conforme pode ser visto nas FIGURA 60 e FIGURA 61. As avaliações dimensionais foram realizadas individualmente, sendo que primeiramente foi dimensionado o componente Algamma e em seguida o Tubo de Resfriamento. Conforme reportado a seguir.

FIGURA 60: Componente Algamma posicionado de forma representativa na máquina de medição



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 61: Tubo de Resfriamento posicionado de forma representativa na máquina de medição



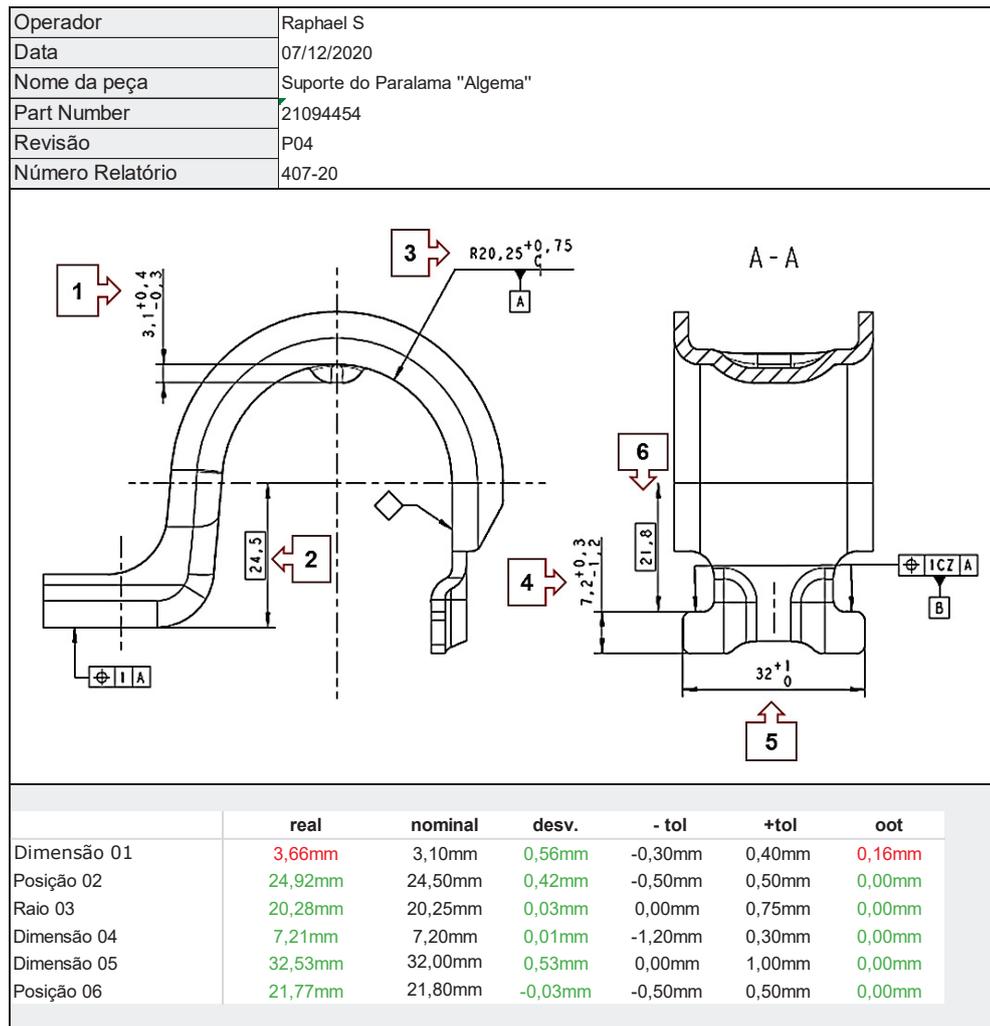
FONTE: O Autor (2020)

5.3.1. Avaliação Dimensional da Algema

De acordo com o relatório apresentado no FIGURA 62 o componente Algema atendeu a maioria das dimensões exigidas em desenho e levantadas como requisitos do produto. Uma delas apresentou desvio dimensional fora da tolerância especificada (+0,16mm), porém este desvio pode ser desconsiderado por não comprometer a aplicação da Peça Modelo. Caso o desvio compromettesse a aplicação da peça em uma validação de dispositivo ou algo semelhante, seria necessário reiniciar a aplicação do procedimento e rever principalmente os parâmetros de fabricação.

Desta forma, com base no relatório apresentado é possível afirmar que a peça manufaturada por meio da AM, pode ser considerada como uma Peça Modelo e está pronta para ser utilizada na validação dos gabaritos de produção. O tempo total gasto na avaliação dimensional foi de 30 minutos.

FIGURA 62: Relatório Dimensional do componente Algema produzido por meio da AM



FONTE: O Autor (2020)

5.3.2. Avaliação Dimensional Tubo de Resfriamento

O resultado da avaliação dimensional do Tubo de Resfriamento pode ser visto na FIGURA 63. Todas as dimensões ficaram dentro das tolerâncias estipuladas em projeto e identificadas com requisitos do produto. Uma das preocupações na fabricação do Tubo de Resfriamento estava atrelada aos possíveis erros dimensionais que as subdivisões feitas na peça para viabilizar a fabricação poderiam proporcionar. Entretanto, essa preocupação não se confirmou e a estratégia de dividir a peça em diversas partes e depois montá-la, se mostrou eficiente.

Diante disso, a peça fabricada por meio da AM e submetida ao procedimento proposto foi aprovada como Peça Modelo e pode ser utilizada na validação de gabaritos de produção. O tempo empregado na avaliação dimensional foi de 1h10min.

FIGURA 63: Relatório dimensional do Tubo de Resfriamento produzido por meio da AM

Operador	Raphael S					
Data	03/12/2020					
Nome da peça	Tubo Resfriador - MD13					
Part Number	22748854					
Revisão	P01					
Número Relatório	394-20					

The image shows a 3D CAD model of a cooling tube assembly. The tube is green with red and blue sections. It has several joints and fittings. Thirteen measurement points are indicated by dashed lines and labels: P1 (Z1 Y4 X6), P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, and P13 (Y5 Z2). A coordinate system is shown in the bottom left corner with Z pointing up, Y pointing right, and X pointing out of the page.

P1 (Z1 Y4 X6)						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	0,00mm	0,00mm	0,00mm	-0,50mm	0,50mm	0,00mm
Centro.y	0,00mm	0,00mm	0,00mm	-0,50mm	0,50mm	0,00mm
Centro.z	0,00mm	0,00mm	0,00mm	-0,50mm	0,50mm	0,00mm

P2						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	0,84mm	0,00mm	0,84mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	73,18mm	71,50mm	1,68mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	-1,17mm	0,00mm	-1,17mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm

P3						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	38,39mm	38,50mm	-0,11mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	70,55mm	71,50mm	-0,95mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	76,86mm	79,50mm	-2,64mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm

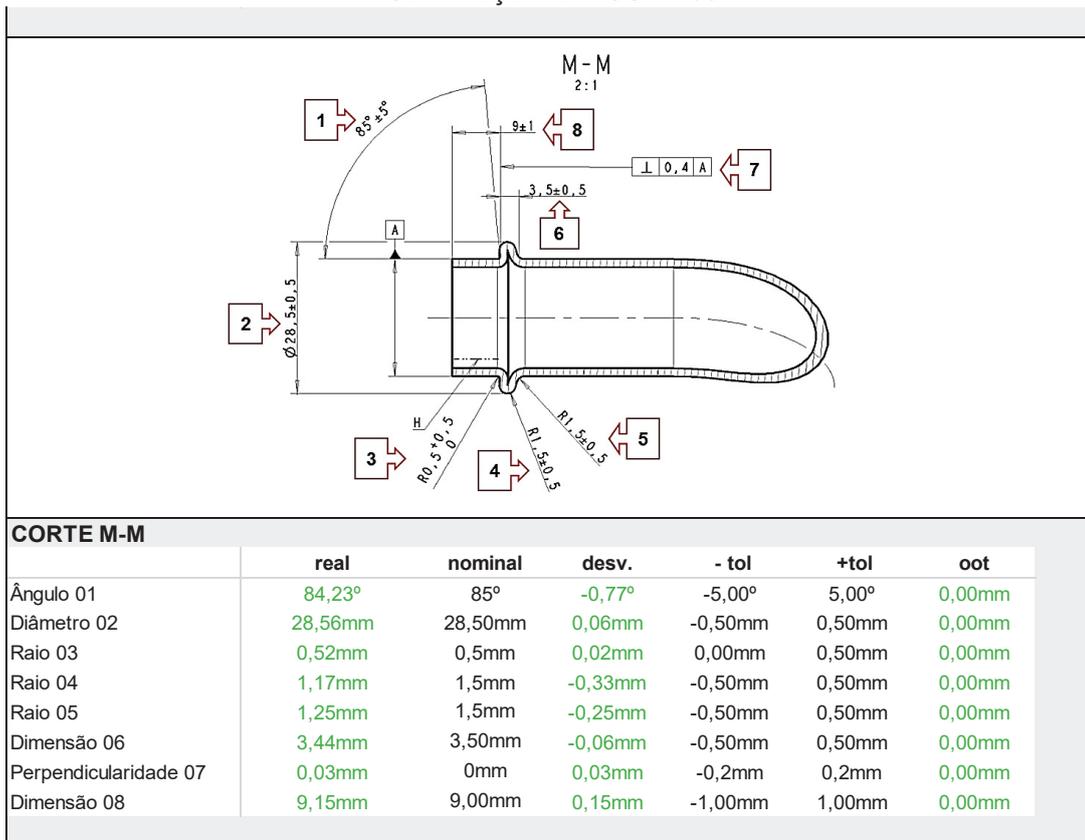
P4						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	51,33mm	50,50mm	0,83mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	105,10mm	103,50mm	1,60mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	140,73mm	140,50mm	0,23mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm

P5						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	115,78mm	113,98mm	1,80mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	121,74mm	121,50mm	0,24mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	155,70mm	156,50mm	-0,80mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm

Continuação da FIGURA 63

P6						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	190,94mm	190,50mm	0,44mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	91,62mm	92,50mm	-0,88mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	142,37mm	143,00mm	-0,63mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
P7						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	220,56mm	220,50mm	0,06mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	15,89mm	15,74mm	0,15mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	159,50mm	159,85mm	-0,35mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
P8						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	243,49mm	243,30mm	0,19mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	-18,79mm	-17,70mm	-1,09mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	136,55mm	137,90mm	-1,35mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
P9						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	242,10mm	243,20mm	-1,10mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	-79,19mm	-80,00mm	0,81mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	89,17mm	87,40mm	1,77mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
P10						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	284,35mm	285,60mm	-1,25mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	-82,75mm	-81,80mm	-0,95mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	12,36mm	12,60mm	-0,24mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Posição	3,18mm		3,18mm	0,00mm	6,00mm	0,00mm
P11						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	252,70mm	253,80mm	-1,10mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	-80,04mm	-80,40mm	0,36mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	71,09mm	68,70mm	2,39mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
P12						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	250,79mm	253,79mm	-3,00mm	-3,00mm	3,00mm	-0,002mm
Centro.y	-127,99mm	-128,78mm	0,79mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	71,98mm	69,82mm	2,16mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
P13 (Y5 Z2)						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	226,55mm	227,53mm	-0,99mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	-68,49mm	-68,49mm	0,00mm	0,00mm	0,00mm	0,00mm
Centro.z	128,52mm	128,52mm	0,00mm	0,00mm	0,00mm	0,00mm
Diâmetro	10,39mm	10,00mm	0,39mm	-0,40mm	0,40mm	0,00mm
Posição	0,01mm		0,01mm	0,00mm	2,29mm	0,00mm
P14 (Z3)						
	real	nominal	desv.	- tol	+tol	oot
Centro.x	232,07mm	232,50mm	-0,43mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.y	48,41mm	49,01mm	-0,59mm	-3,00mm	3,00mm	0,00mm
Centro.z	108,23mm	108,23mm	0,00mm	0,00mm	0,00mm	0,00mm
Diâmetro	10,38mm	10,00mm	0,38mm	-0,40mm	0,40mm	0,00mm
Posição	1,19mm		1,19mm	0,00mm	2,28mm	0,00mm

Continuação da FIGURA 63



FONTE: O Autor (2020)

5.4. Validando os Dispositivos de Controle Dimensionais

Foi comprovado por meio dos relatórios dimensionais que as peças fabricadas por meio AM atenderam os requisitos do produto. Portanto, com o propósito em verificar os benefícios da metodologia proposta, as peças foram utilizadas para validar os dispositivos de controle dimensionais. O processo de fabricação convencional das peças estudadas são diferentes, e por este motivo os dispositivos a serem apresentados possuem características e geometrias diferentes.

5.4.1. Validação dos Dispositivos de Controle do Componente Algema

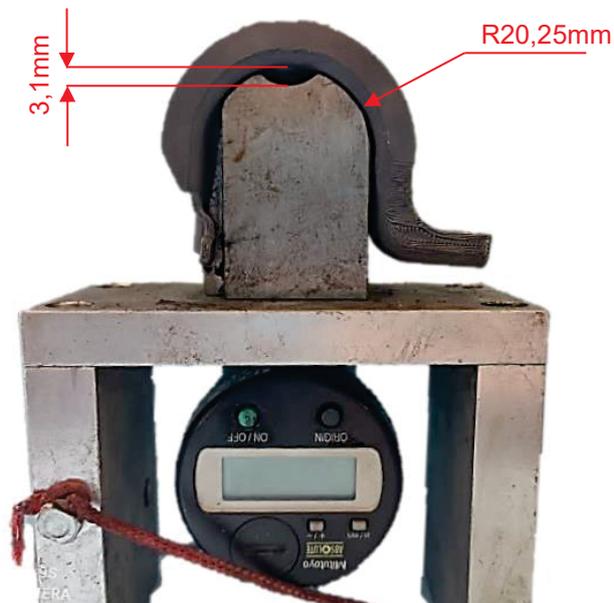
O componente Algema possui três dispositivos de controle para verificar as principais características dimensionais. O primeiro dispositivo tem como objetivo verificar o raio de 20,25mm e a dimensão de 3,1mm (FIGURA 36). O Segundo dispositivo afere as posições de 24,5mm e 21,8mm. E por fim o terceiro dispositivo

avalia as dimensões de 32mm e 7,2mm. Caso a peça venha apresentar desvios dimensionais, ela não é aprovada no dispositivo e deve ser descartada.

Os três dispositivos possuem geometrias simples, porém para validar tais dispositivos seria necessário despende em torno de 1h30min com análises dimensionais em salas de medição. Portanto, para verificar os reais benefícios no quesito tempo, a Peça Modelo foi inspecionada e utilizada para validar os dispositivos.

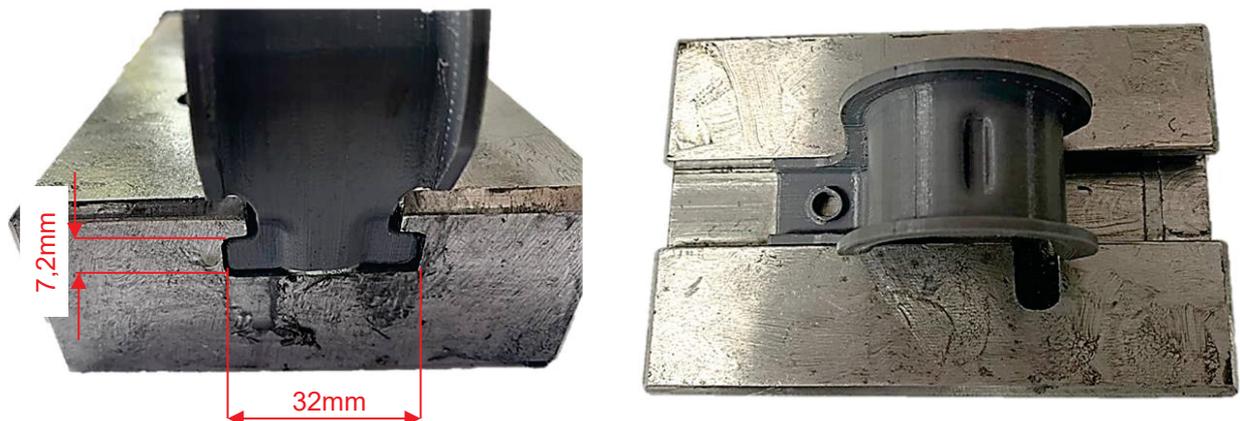
Conforme reportado nas FIGURAS 64, FIGURA 65 e FIGURA 66 a Peça Modelo foi aprovada em todos os dispositivos de controle, e foram necessários apenas 5 min para concluir as inspeções e validar os dispositivos.

FIGURA 64: Componente Algema aplicado no dispositivo de controle utilizado para verificar o raio de 20,25mm e a dimensão de 3,1mm



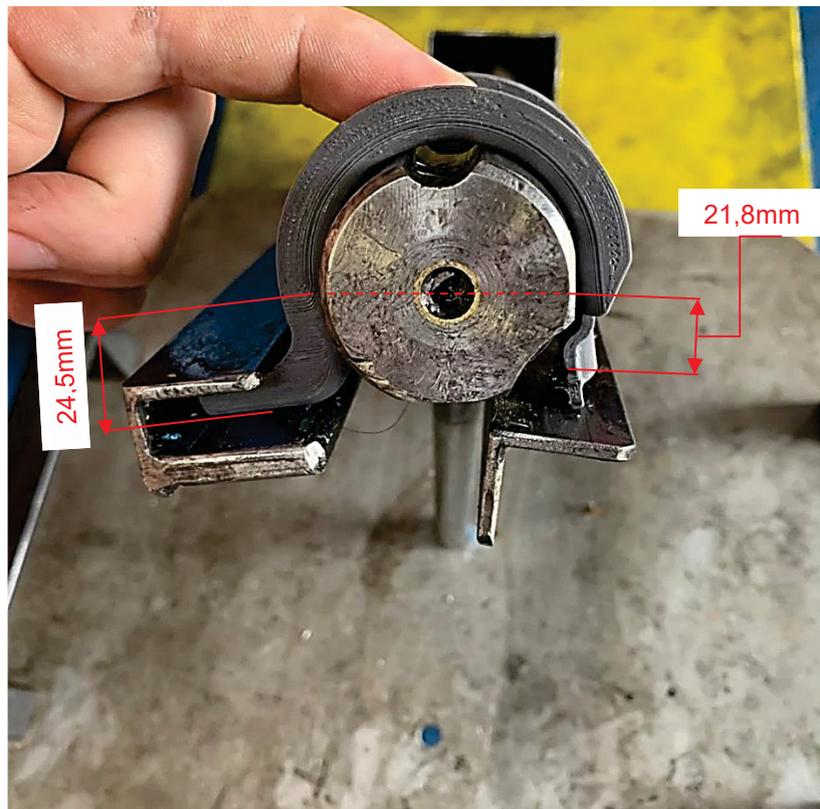
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 65: Algema aplicada no dispositivo de controle para verificação das dimensões de 32mm e 7,2mm



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 66: Componente Algema aplicado no dispositivo de controle utilizado para verificar as posições de 24,5mm e 21,8mm



FONTE: O Autor (2020)

5.4.2. Validando os Dispositivos de Controle do Tubo de Resfriamento

A aferição do Tubo de Resfriamento é feita por meio de dois dispositivos de controle e em etapas diferentes. Sendo que, o primeiro dispositivo é utilizado durante o processo de curvatura do tubo principal e tem como finalidade verificar as coordenadas das dobras do tubo antes de executar o processo de soldagem dos componentes. Ao concluir a soldagem dos componentes periféricos o Tubo de Resfriamento é encaminhado para o segundo dispositivo, que tem como função, verificar a posição dos componentes soldados.

Para validar os dispositivos por meio dos métodos tradicionais em salas de metrologia, é necessário em torno de 2h, pois os dispositivos são grandes e possuem uma grande quantidade de pontos e geometrias a serem avaliadas. Portanto, para verificar os reais benefícios de usar uma Peça Modelo para validar um dispositivo, foi empregado o Tubo de Resfriamento fabricado neste trabalho por meio de AM.

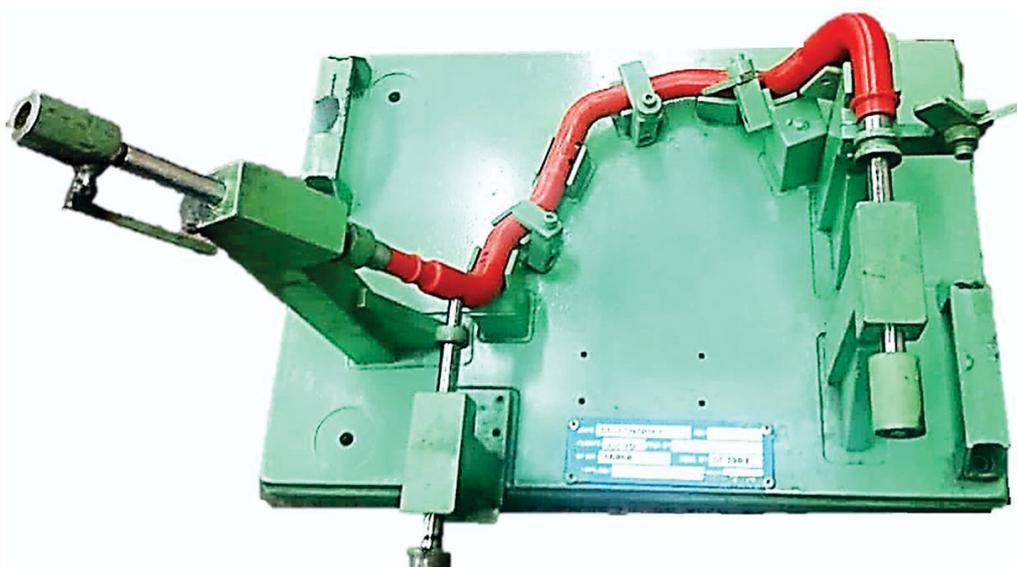
Primeiramente foi validado o dispositivo que avalia as coordenadas de curvatura do tubo principal. Para realizar esta validação, os componentes periféricos foram removidos da peça. Conforme reportado na FIGURA 67 a peça foi aprovada no dispositivo de forma interina e foram necessários apenas 2 minutos para concluir as inspeções da peça e validações do primeiro dispositivo.

Ao concluir a avaliação do primeiro dispositivo, os componentes periféricos foram montados novamente e então o Tubo de Resfriamento foi encaminhado para validar o segundo dispositivo. Durante a avaliação do segundo dispositivo, foi detectado um desvio dimensional no pino que afere a posição do tubo de menor diâmetro, conforme ilustrado na FIGURA 69. Portanto, com base nesta evidência o dispositivo está rejeitado e deve ser ajustado para que proporcione uma condição de verificação conforme requisitado em projeto.

Para obter melhor precisão do ajuste, será necessário encaminhar o dispositivo para uma sala de medidas e então encontrar o erro dimensional numérico. Porém o tempo gasto na sala de medidas para verificar este desvio será menor, pois a análise será direcionada para o ponto reportado, visto que os outros pontos de aferição se mostraram dentro do especificado, conforme ilustrado na FIGURA 68.

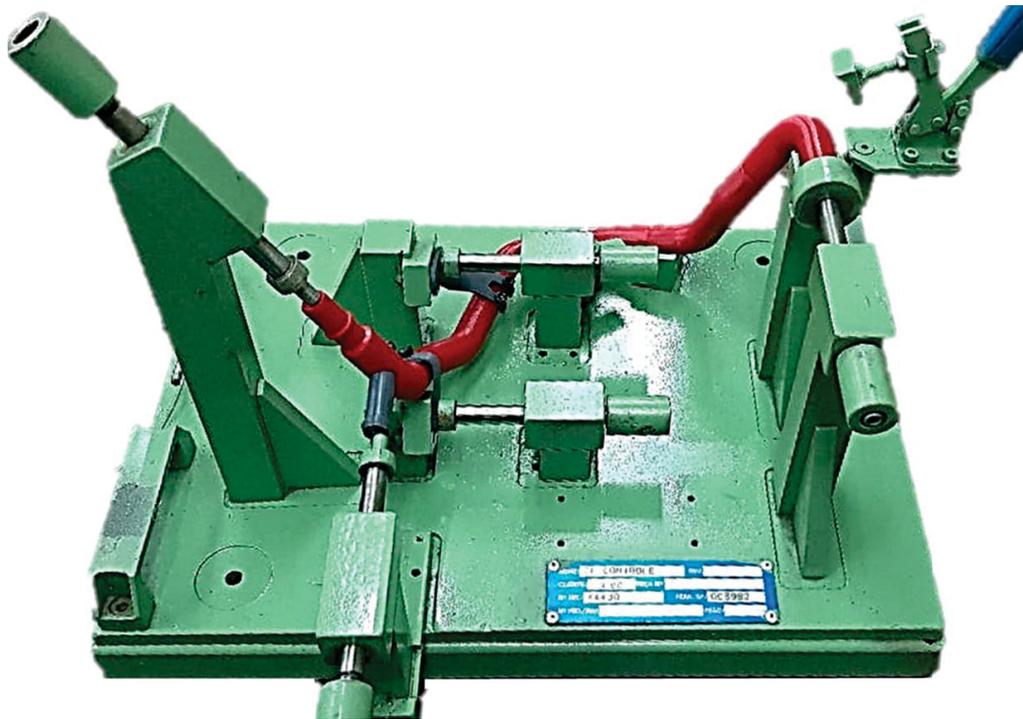
Portanto, a Peça Modelo do Tubo de Resfriamento foi eficaz na avaliação do segundo dispositivo e demonstrou maior agilidade na detecção dos erros dimensionais e por consequência uma possível redução de tempo na correção dos desvios.

FIGURA 67: Peça Modelo do Tubo de Resfriamento aplicada no Dispositivo de Controle que tem como finalidade em verificar as coordenadas das dobras do Tubo Principal



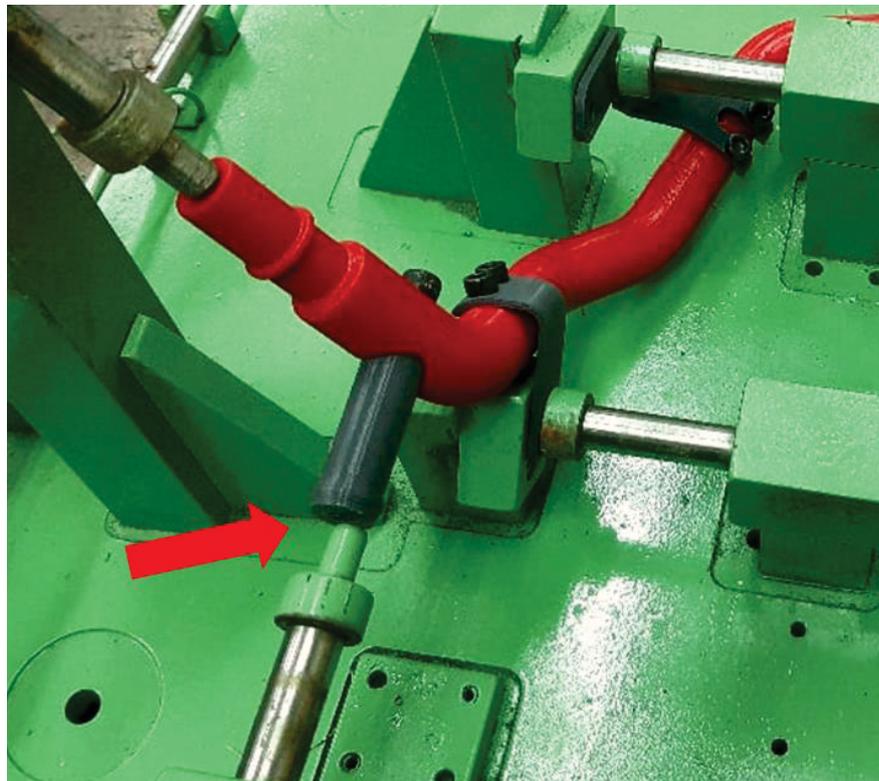
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 68: Tubo de Resfriamento aplicado no Dispositivo que verificar a posição dos componentes periféricos.



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 69: Tubo de Resfriamento aplicado no Dispositivo de Controle que verifica a posição dos componentes periféricos. Dando ênfase no desvio do pino que afere a posição do tubo de menor diâmetro



FONTE: O Autor (2020)

5.5. Fabricação pelo Processo Convencional versus AM

Para obter mais dados em relação aos benefícios da fabricação de uma Peça Modelo por meio da AM, uma análise comparativa foi executada. Tendo como propósito verificar qual seria o tempo necessário para fabricar uma Peça Modelo por meio dos processos convencionais versus o tempo despendido para obter a Peça Modelo por meio da AM. As informações referentes à fabricação convencional foram repassadas pelos fornecedores.

5.5.1. Análise Comparativa Componente Algema

Para fabricar o componente Algema de forma seriada foi utilizada uma ferramenta progressiva de estampagem com treze estágios, conforme ilustrado na FIGURA 70. Somente após a fabricação dessa ferramenta é possível fabricar a peça desejada.

Conforme pode ser visto no QUADRO 6, para fabricar e validar a ferramenta com este nível de complexidade foram empregadas em torno de 440h, estando incluso o tempo de projeto, tempo de aquisição da matéria-prima, fabricação da ferramenta, validação entre outras. Com a conclusão da ferramenta foram fabricadas as primeiras peças e então conduzidas para avaliações dimensionais que levaram em torno de 30min. Encerradas as análises dimensionais foi evidenciado que as peças atenderam as dimensões mencionadas em desenho e podem ser utilizadas como Peças Modelo.

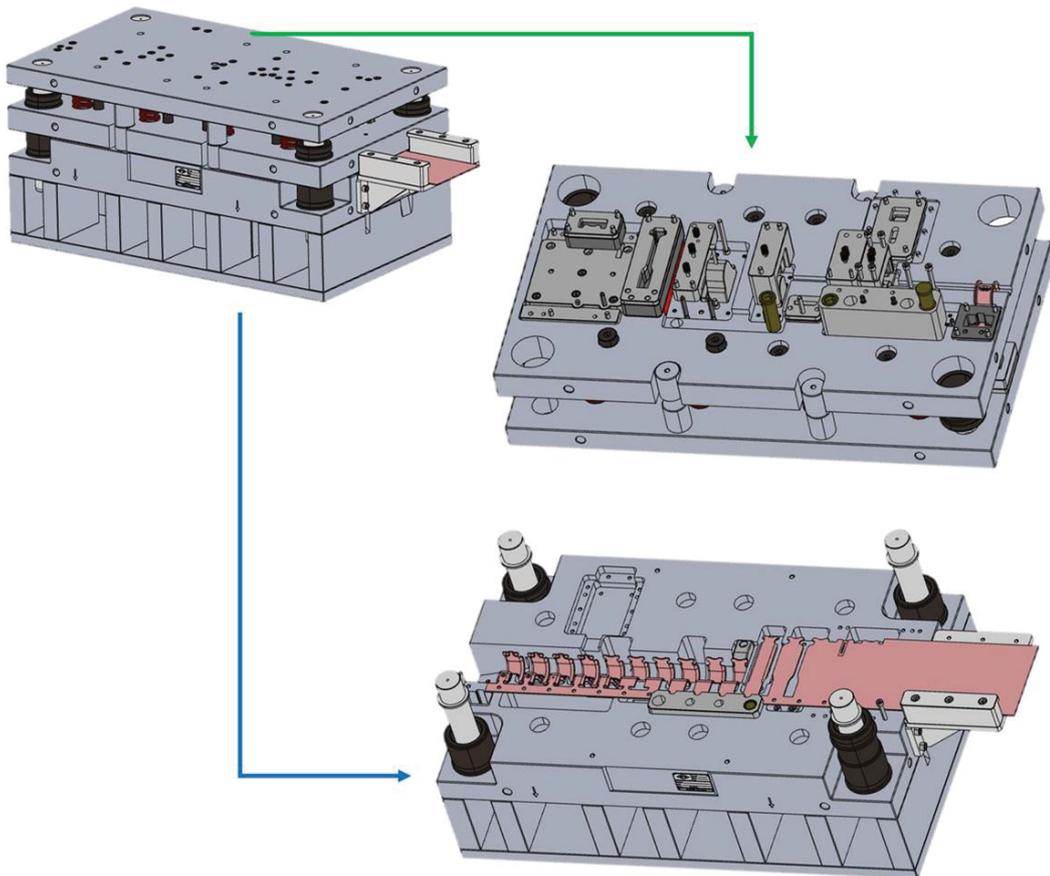
Em um mercado tão competitivo como o automotivo, o *time-to-market* é algo levado muito a sério. O tempo gasto para aprovar apenas uma peça do fornecedor pode comprometer toda uma linha de produção e atrasar a chegada de um produto no mercado. De acordo com o resumo apresentado no QUADRO 7, o tempo para obtenção da Peça Modelo por meio da AM é significativamente inferior quando comparada ao processo convencional, menos de 2% do tempo gasto. Conclui-se que essa alternativa de fabricação de Peça Modelo por AM deveria ser implementada pela indústria.

QUADRO 6: Tempo gasto nas etapas de desenvolvimento da Peça Modelo por processos convencionais

Etapa de Desenvolvimento	Tempo (Horas)
Projeto e modelagem da ferramenta	80
Aquisição da matéria-prima	96
Usinagem das matrizes e punções	160
Montagem da ferramenta	40
Ajustes de desvios	24
Análise dimensional	16
Transporte	4
Montagem da ferramenta na prensa hidráulica	4
<i>Try-out</i> da ferramenta	8
Liberação do processo de fabricação	8
Total	440

FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 70: Ferramenta de estampagem progressiva utilizada para manufaturar o componente Algema



FONTE: O Autor (2020)

QUADRO 7: Análise Comparativa do tempo de aquisição da Peça Modelo do componente Algema

Etapa de Desenvolvimento	Processo de Fabricação		Resultado
	Convencional (Horas)	AM (Horas)	
Adequação de <i>Design</i>	0	0	C = AM
Fabricação da Peça	440h	4h45min	AM < C
Validação da Peça	30min	30min	C = AM
TOTAL	440h30min	5h15min	AM < C

FONTE: O Autor (2020)

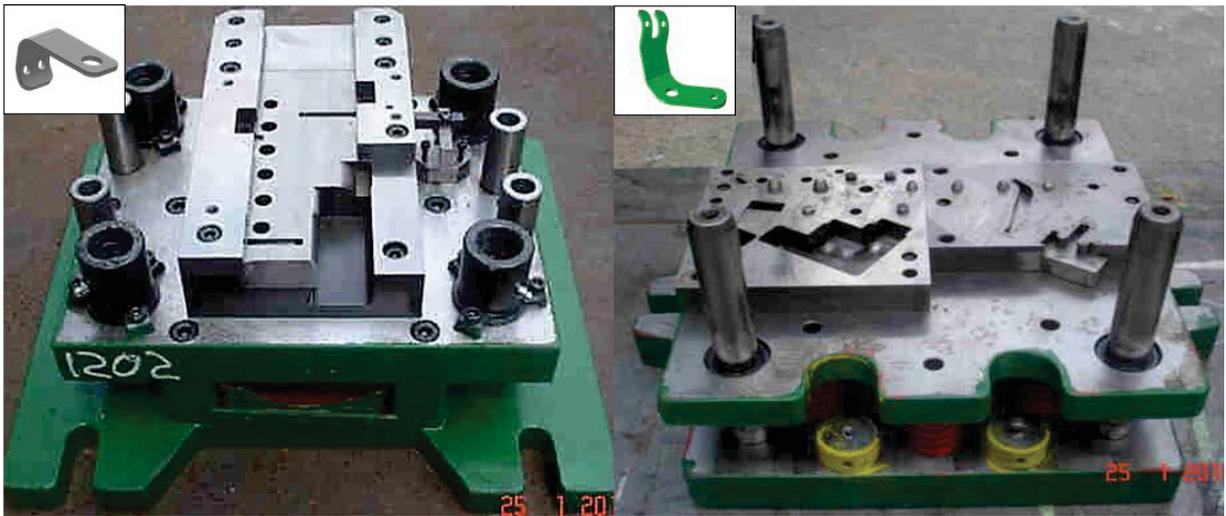
5.5.2. Análise Comparativa do Tubo de Resfriamento

A fabricação do Tubo de Resfriamento por métodos convencionais é realizada em três etapas principais. A primeira etapa consiste em manufaturar os dois suportes periféricos por meio de ferramentas de estampagem, conforme ilustrado na FIGURA 71. Em seguida, na segunda etapa são realizadas as curvaturas do tubo principal e a furação que irá receber o tubo periférico de menor diâmetro, sendo que para executar esta furação é utilizado um dispositivo de fixação auxiliar (FIGURA 72). Por fim, na última etapa os componentes periféricos são soldados no tubo principal com o auxílio do dispositivo de soldagem conforme indicado na FIGURA 73.

Conforme pode ser visto no QUADRO 8, o tempo gasto para obter o ferramental de fabricação da Peça Modelo por meio dos processos tradicionais foi em torno de 416h, que incluem: tempo de projeto, tempo de aquisição da matéria-prima, fabricação das ferramentas e dispositivos e validação. Após a conclusão das ferramentas, as primeiras peças foram fabricadas e submetidas a avaliações dimensionais que levou em torno de 1h10min. Com o resultado positivo da avaliação dimensional a peça foi nomeada “Peça Modelo”.

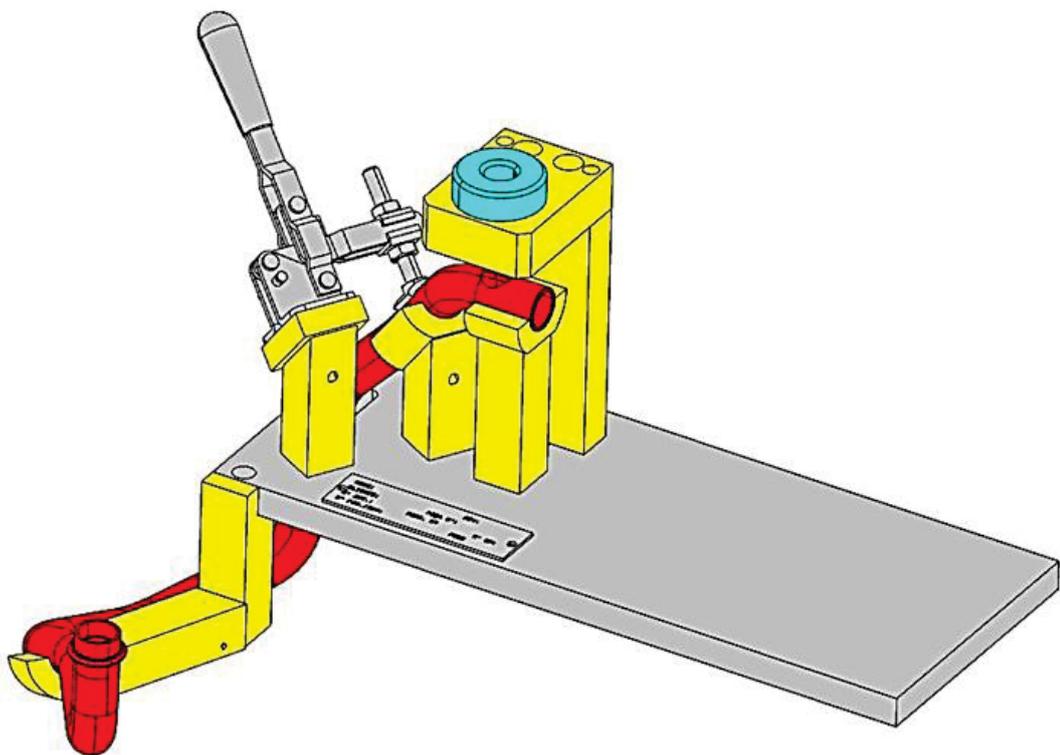
No QUADRO 9 é apresentado um comparativo de tempo de obtenção da Peça Modelo por métodos convencionais e pelo procedimento apresentado neste trabalho, empregando a AM. Enquanto o tempo total pelo método convencional foi de 417h10min, usando a AM foi de 15h10min, ou seja, menos de 4% do tempo. Isso é significativamente menor e o impacto que isso pode causar no ciclo produtivo e nos gastos não foi mensurado, mas certamente existe.

FIGURA 71: Ferramentas utilizadas para fabricar os suportes periféricos do Tubo de Resfriamento



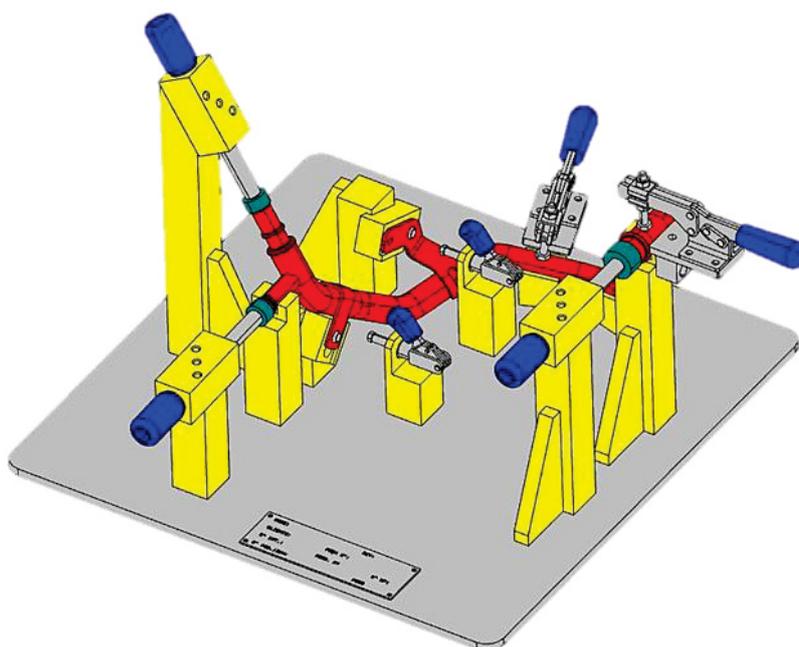
FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 72: Dispositivo de fixação para executar a furação para o tubo periférico de menor diâmetro



FONTE: O Autor (2020)

FIGURA 73: Dispositivo de Soldagem utilizado para soldar os componentes periféricos



FONTE: O Autor (2020)

QUADRO 8: Detalhamento das etapas de desenvolvimento para obter a Peça Modelo do Tubo de Resfriamento por meio dos processos convencionais

Etapa de Desenvolvimento	Tempo (Horas)
Projeto e modelamento das ferramentas e dispositivos auxiliares	72
Aquisição da matéria-prima	80
Usinagem das matrizes e punções das ferramentas	80
Usinagem dos componentes relacionados aos dispositivos auxiliares	40
Montagem das ferramentas e dispositivos	56
Ajustes de desvios	16
Análise dimensional	24
Transporte	8
Montagem das ferramentas na prensa hidráulica	8
Try-out das ferramentas	16
Liberação do processo de fabricação dos suportes periféricos	4
Try-out dos dispositivos auxiliares	8
Liberação do processo de fabricação final	4
Total	416

FONTE: O Autor (2020)

QUADRO 9: Análise Comparativa do tempo de aquisição da Peça Modelo do Tubo de Resfriamento

Etapa de Desenvolvimento	Processo de Fabricação		Resultado
	Convencional (Horas)	AM (Horas)	
Adequação de <i>Design</i>	0	8	C < AM
Fabricação da Peça	416h	14h	AM < C
Validação da Peça	1h10min	1h10min	C = AM
TOTAL	417h10min	15h10min	MA < C

FONTE: O Autor (2020)

5.6. Análise e Discussão dos Resultados

Em conformidade com os resultados apresentados nas seções anteriores, é possível comprovar que as Peças Modelo submetidas ao procedimento de DFAM apresentado neste trabalho, apresentaram benefícios consideráveis ao processo de desenvolvimento de peças automotivas, tais como:

- Redução de tempo na aquisição das Peças Modelo;
- Agilidade na avaliação e validação dos dispositivos de controle;
- Estabilidade dimensional das peças manufaturadas;

Por consequência, as Peças Modelo obtidas neste trabalho podem trazer outros benefícios secundários, tais como:

- Reduzir o tempo no desenvolvimento do processo de fabricação;
- Agilizar a obtenção da documentação de PPAP;
- Garantir assertividade na aprovação de PPAP.

Por mais de um século a indústria automotiva se limitava às capacidades de fabricação dos processos tradicionais de usinagem, conformação e fundição. O setor de manufatura em geral se limitava a investir em ferramentas e equipamentos fixos. A manufatura aditiva, fundamentalmente, muda isso e nos permite criar objetos sob demanda, complexos, *free-forms* e com diversas características anteriormente

impensadas. O resultado deste trabalho mostra que AM incorporada como alternativa de processo de fabricação trouxe diversas vantagens para a empresa.

Como já disseram autores como Thompson *et al.* (2016) e Sossou *et al.*, (2018) a AM é a maior novidade na área de fabricação dos últimos trinta anos. A AM tem capacidades únicas e um imenso potencial de aplicação e as empresas que observaram isso certamente estão à frente da concorrência.

Este trabalho se propôs a desenvolver um procedimento para a fabricação de Peças Modelo por meio da AM. Certamente, existirão peças que devido aos requisitos do produto não poderão ser produzidas por esse processo e isso o procedimento proposto tem a função de analisar.

As duas Peças Modelo submetidas ao procedimento e analisadas neste trabalho, foram adequadas e fabricadas com sucesso por meio da AM. Isso evidencia que tanto o procedimento quanto a AM podem ser implementados por montadoras e fornecedores de peças automotivas para obtenção de Peças Modelo.

Entre as peças Algema e Tubo de Resfriamento foi observado que quanto maior a dimensão da peça, maior foi o nível de dificuldade de fabricação por meio da AM e o tempo gasto. Devido às limitações identificadas no início do procedimento a peça Tubo de Resfriamento precisou passar por uma readequação onde a subdivisão e posterior montagem agregou etapas extras e maior tempo empregado. Porém, para diminuir as limitações de máquina, material e processo é necessário que a empresa invista em equipamento AM de porte industrial e também que trabalhe com outros princípios de processamento e materiais. Por exemplo, equipamentos de AM que trabalhem com materiais metálicos ou polímeros de alto desempenho, ou que garantam precisão dimensional superior aos de extrusão de material, ou que tenham um grande volume de impressão, aumentariam as possibilidades de aplicação da AM a uma gama muito maior de peças.

Neste trabalho o equipamento de AM disponível opera com o princípio de extrusão de material, processa polímeros de baixo desempenho e tem volume de impressão limitado, mas ainda assim o procedimento apresentado se mostrou eficaz na fabricação das duas Peças Modelo propostas.

Fornecedores analisaram as peças fabricadas neste trabalho em seus dispositivos de controle e relataram que a metodologia proposta é inovadora para o ramo automotivo e pode ser facilmente aplicada nos processos de desenvolvimentos.

6. CONCLUSÕES

Um procedimento de DFAM que permite analisar a viabilidade e sistematizar o projeto de Peças Modelo para fabricação por AM foi proposto e validado neste trabalho. Inicialmente, duas peças automotivas com características diferentes foram selecionadas (Algema e Tubo de Resfriamento) e submetidas ao procedimento de DFAM proposto. O procedimento composto por diversas etapas, exigiu inicialmente o levantamento dos requisitos do produto para que diante das limitações (equipamento, material e processo), a viabilidade da fabricação por AM fosse verificada. As duas Peças Modelo analisadas, foram consideradas viáveis para a fabricação por AM. A peça Tubo de Resfriamento foi direcionada a uma readequação de *design* para contornar a limitação de volume de impressão do equipamento disponível. Na sequência, foi realizado o planejamento do processo, a fabricação em material ABS, pós-processamento e por fim, a avaliação dimensional.

Os resultados da avaliação dimensional das duas peças confirmaram o atendimento dos requisitos iniciais e atestaram as duas peças feitas por AM como Peças Modelo, que puderam ser empregadas posteriormente na avaliação de dispositivos de controle.

Uma análise comparativa entre as peças produzidas de forma convencional e as produzidas neste trabalho por AM demonstrou que o tempo de obtenção das Peças Modelo empregando o procedimento aqui proposto foi significativamente menor – menos de 2% do tempo para a peça Algema e menos de 4% para obter o Tubo de Resfriamento. Essa redução no tempo para a obtenção das Peças Modelo agiliza a avaliação e validação dos dispositivos de controle dos fornecedores, pode agilizar a obtenção da documentação de PPAP, garantir assertividade na aprovação de PPAP e pode reduzir consideravelmente o tempo no desenvolvimento do processo de fabricação das peças seriadas.

Além disto, o emprego do procedimento de DFAM proposto é inovador no contexto da indústria automotiva, pois sugere uma mudança de conceito produtivo e insere a AM como mais uma opção de processo de fabricação e não mais apenas como ferramenta de prototipagem rápida.

6.1. Sugestões de Trabalhos Futuros

Conforme relatado na revisão bibliográfica a tecnologia de AM está em ampla expansão, porém ficou evidente a ausência de trabalhos e pesquisas voltadas ao tema da Manufatura Aditiva aplicada nos procedimentos de avaliação de qualidade, PPAP e desenvolvimento de processo de fabricação de peças automotivas. Demonstrando assim lacunas a serem investigadas, tais como:

- Utilização da AM para manufaturar dispositivos de inspeções rápidas, com o intuito em segregar peças conformes e não conformes;
- Utilização da AM para auxiliar nas tratativas e investigações de problemas de qualidade reportados nas peças durante a fabricação ou montagem final;
- Proporcionar treinamentos aos operadores com auxílio de dispositivos e peças manufaturadas por meio da AM.

Inerente ao presente trabalho, para reforçar a eficiência do procedimento proposto, recomenda-se aplicar o procedimento na manufatura de Peças Modelo de diferentes características de fabricação, tais como peças injetadas, usinadas, fundidas, forjadas, etc. Além disto, outras áreas de estudo podem ser conduzidas com o intuito em verificar a versatilidade do procedimento ou mesmo encontrar pontos de melhoria, tais como:

- Aplicar o procedimento em peças de grande porte dimensional, como, por exemplo rodas, para-choque, painel de acabamento, etc.
- Aplicar o procedimento com equipamentos de AM de outras tecnologias, de maior volume de impressão e que processem outros materiais.
- Submeter o procedimento a princípios de AM específicos, tais como: Sinterização Seletiva a Laser, Fotopolimerização em Cuba, Jateamento de Material, entre outros.
- Desenvolver um plano de disseminação do conhecimento sobre Manufatura Aditiva para as indústrias de autopeças, tornado assim o procedimento DFAM proposto acessível e aplicável.

REFERÊNCIAS

3DHUBS. **3D printing STL files: A step-by-step guide.** Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-stl-files-step-step-guide/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

3DHUBS. **FDM 3D printing materials compared.** Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materialscompared/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

3DHUBS. **Introduction to FDM 3D printing.** Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

3DHUBS. **Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing.** Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

3DSYSTEM. **Gabaritos & fixações, Fabricação aditiva para suporte de produção eficiente e eficaz.** Disponível em: <<https://br.3dsystems.com/applications/jigs-fixtures>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

ADAM, G.A.O., ZIMMER, D., Design for Additive Manufacturing-Element transitions and aggregated structures, **CIRP J Manuf Sci Technol**, Vol. 7, pp. 20–28, 2014.

AHMAD, A.; SABER, A.; DARMOUL, S. Prototyping for Rapid Prototyping for Assembly Training, **IFAC-PapersOnLine**, vol. 48, no. 3, pp. 412–417, 2015.

All3DP. **Acetone 3D Print Smoothing.** Disponível em: <<https://all3dp.com/2/acetone-3d-print-smoothing-easy-steps/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

BAGARIA, V.; DESHPANDE, S.; RASALKAR, D. D.; KUTHE, A.; PAUNIPAGAR, B. K. Use of rapid prototyping and three-dimensional reconstruction modeling in the management of complex fractures. **Eur. J. Radiol.**, vol. 80, no. 3, pp. 814–820, 2011.

BOOTH, J. W.; ALPEROVICH, J.; CHAWLA, P.; RAMANI, K. The design for additive manufacturing worksheet. **J. Mech. Des. Trans. ASME**, vol. 139, no. 10, pp. 1–9, 2017.

BOOTH, J.W., *et al.* The design for additive manufacturing worksheet, Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2016, August 21-24, 2016, Charlotte, North Carolina, USA, 2016.

BOOTHROYD, G.; DEWHURST, P.; KNIGHT, W. **Product Design for Manufacture and Assembly.** 3.ed. Boca Raton (FL), Taylor and Francis Group, 2011.

BOYARD, N., *et al.* “A design methodology for parts using additive manufacturing”, Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototyping High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, pp. 399-404, 2014.

CARBON3D. **The perfect fit: Carbon + adidas collaborate to upend athletic footwear.** Disponível em: <<https://www.carbon3d.com/case-studies/adidas/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

CARTER *et al.* The GE Aircraft Engine Bracket Challenge: An Experiment in Crowdsourcing for Mechanical Design Concepts, **SFF 20141402**, 2015.

CHU, C., GRAF, G. AND ROSEN, D.W. (2008), "Design for additive manufacturing of cellular structures", **Computer-Aided Design and Applications**, Vol. 4 No. 5, pp. 686-696.

CHU, C.; GRAF, G; ROSEN, D. W. Design for additive manufacturing of cellular structures. **Comput. Aided. Des. Appl.**, vol. 5, no. 5, pp. 686–696, 2008.

DAVER, F.; PENG, K.; LEE, M.; BRANDT, M.; SHANKS, R. Cork – PLA composite filaments for fused deposition modelling. **Compos. Sci. Technol.**, vol. 168, no. September, pp. 230–237, 2018.

DIETER L.S.; LAJARIN, S. F.; OKIMOTO, M. L.; FOGGIATTO, J. **Projeto De Produto Para Manufatura Aditiva Por Extrusão De Material Utilizando Uma Impressora 3D De Baixo Custo**, 2019.

DUL, S.; FAMBRI, L.; PEGORETTI, A. Part A Fused deposition modelling with ABS – graphene nanocomposites. **Composites**, vol. 85, pp. 181–191, 2016.

DUNN, A. M.; HOFMANN, O. S.; WATERS, B; WITCHEL, E. Cloaking malware with the trusted platform module. **Proceedings of the 20th USENIX Security Symposium**, pp. 395–410, 2011.

DVIBYZ. **3D Print Jigs & Fixtures.** Disponível em: <<https://www.divbyz.com/blog/3d-print-jigs-fixtures/>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

GAWLIK, J.; REWILAK, J.; TOKAJ, T. Application of PPAP tools in production preparation management. **Innov. Manag. Prod. Eng.**, pp. 391–402, 2012.

GEBISA A. W.; LEMU, H. G. Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability. **Procedia Manufacture**, vol. 13, pp. 724–731, 2017.

GIBSON, I; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.** 2. ed. New York: Springer, 2016. E-book.

HIETIKKO, E. Design for Additive Manufacturing – DFAM. **The International Journal of Engineering and Science (IJES)**, v.3, n.12, p. 14-19, dec. 2014.

JUNK, S.; KLERCH, B.; HOCHBERG, U. Structural optimization in lightweight design for additive manufacturing. **Procedia CIRP**, vol. 84, pp. 277–282, 2019.

KATHRYN, M. *et al.* CIRP Annals - Manufacturing Technology Design for Additive Manufacturing : Trends , opportunities , considerations , and constraints. **CIRP Ann. - Manuf. Technol.**, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016.

KIM, H.; PARK, E.; KIM, S.; PARK, B.; KIM, N.; LEE, S. Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-Material 3D Printed Products. **Procedia Manuf.**, vol. 10, pp. 887–897, 2017.

KLAHN, C.; LEUTENECKER, B.; MEBOLDT, M. Design strategies for the process of additive manufacturing. **Procedia CIRP**, vol. 36, pp. 230–235, 2015.

KRANZ, J., HERZOG, D., EMMELMANN, C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in titanium. **Journal of Laser Applications**, Vol. 27(S1), S14001, 2015.

KRZYNAR, N.; PILIPOVI, A.; ŠERCER, M. Additive manufacturing of fixture for automated 3D scanning. **Case study**, vol. 149, no. June, pp. 197–202, 2016.

KUMKE, M., *et al.* A new methodological framework for design for additive manufacturing. **Virtual and Physical**, Vol. 11, No. 1, pp. 3–19, 2016.

MALVAR. **Avaliação comparativa das tecnologias de prototipagem rápida**. pp. 1–121, 2008.

Manual PPAP, **PPAP - Processo de Aprovação de Peças de Produção**, Disponível em <https://ppap.com.br/>, Acesso em 30 de junho de 2020.

MDIC - **Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, Setor automotivo**, Disponível em: mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo/ Acesso em: 23 de maio de 2020.

MIN, Z. Procedia Engineering A New Approach of Composite Surface Reconstruction Based on Reverse Engineering. **Procedia Eng.**, vol. 23, pp. 594–599, 2011.

NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L.; KURIC, I. Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology. **Manuf. and Ind. Eng.**, v. 11, n. 1, p. 1338–6549, 2012.

PARANDOUSH, P.; LIN, D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. **Compos. Struct.**, vol. 182, pp. 36–53, 2017.

PEREIRA, E. *et al.* Engenharia simultânea: um estudo de caso em uma empresa têxtil. **Revista Produção**, v.1, n.1, out. p. 2-10, 2001.

PHAM; LAZARO, S. Auto Fix – An Expert CAD System For Jigs and Fixtures. **The International Journal of Tools Manufact**, vol. 30, no. 3, pp. 403–411, 1990.

PONCHE, R., *et al.* A new global approach to design for additive manufacturing: A method to obtain a design that meets specifications while optimizing a given additive manufacturing process is presented in this paper, **Virtual and Physical Prototyping**, Vol. 7, No. 2, pp. 93-105, 2012.

PLESSIS, A. Du. *et al.* Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. **Additive Manufacture**, vol. 27, no. March, pp. 408–427, 2019.

RAPID PROTOTYPING REPORT, **Volkswagen Uses Laminated Object Manufacturing to Prototype Complex Gearbox Housing** 5(2), CAD/CAM Publishing Inc. (February 1995): 1–2.

ROSEN, D.W. Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures, **Computer-Aided Design & Applications**, Vol. 4, No. 5, pp. 585-594, 2007.

SHROTRI, A.; DANDEKAR, A. PPAP an Effective Tool for Vendor Quality. **Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.**, vol. 2, no. 4, pp. 369–372, 2012.

SOSSOU, G., DEMOLY, F., MONTAVON, G., GOMES, S., 2018, “An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies.”. **J. of Comp. Des. and Eng.**, Vol. 5, pp. 3–18.

STRATASYS. **3D Printed Jigs & Fixtures: A Powerful Solution for the Production Floor**. Disponível em: <<https://www.stratasysdirect.com/applications/jigs-fixtures/3d-printed-jigs-ixtures-powerful-solution-production-floor?phrase=jigs>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

STRATASYS. **Innovation Takes a Front Seat for TS Tech**. Disponível em: <<https://www.stratasysdirect.com/resources/case-studies/3d-printed-heckfixtures-ts-tech>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

STRATASYS. **Printing Puts Fixtures into Gear for MAHLE**. Disponível em: <<https://www.stratasysdirect.com/resources/case-studies/3d-printingautomotive-fixtures-mahle>>. Acesso em: 02 Julho. 2019.

TANG, Y., ZHAO, Y.F. A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance, **Rapid Prototyping Journal**, Vol. 22, No. 3, pp. 569–590, 2016.

TEL, C. *et al.* Dimensional accuracy of threads manufactured by fused deposition modeling. **Procedia Manuf.**, vol. 26, pp. 763–773, 2018.

THOMAS, D. The Development of Design Rules for Selective Laser Melting, **(Dissertação de Doutorado) University of Wales**, 2019.

THOMPSON, M.K. *et al.*, “Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, CIRP Annals” – **Manufacturing Technology**, Vol. 65, pp. 737–760, 2016.

VAYRE, B, VIGNAT, F., VILLENEUVE, F. **Designing for Additive Manufacturing. Proc CIRP** 3:632–637, 2012,

VOLPATO, N. **Processos de AM por extrusão de material.** In: **VOLPATO, N.(org) Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Edgar Blücher, 2017. p. 145-179.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. de. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D.** In: **VOLPATO, N.(org) Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Edgar Blücher, 2017. p.16-30.

VOLPATO, N.; SILVA, J.V.L.DA. **Planejamento de processo para tecnologias de AM.** In: **Volpato, N.(org) Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D.** São Paulo: Edgar Blücher, 2017. p. 98-127.

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites : A review and prospective. **Compos. Part B**, vol. 110, pp. 442–458, 2017.

YANG, S., AND ZHAO, Y. F. Additive manufacturing enabled design theory and methodology: a critical review. **Int J Adv Manuf Technol**, Vol. 80 No. (1-4), pp. 327–342, 2015.

Anexo 1

TERMO DE VALIDAÇÃO DO TRABALHO NA INDÚSTRIA

Eu David Knopfholtz Becher gerente de qualidade e desenvolvimento de fornecedores América do Sul acompanhei a realização do trabalho de mestrado do Lucas Aurélio S. Fischer e foi possível comprovar a sua aplicação no ambiente industrial. O trabalho intitulado PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA (DFAM) APLICADO NA FABRICAÇÃO DE “PEÇA MODELO” UTILIZADA NA VALIDAÇÃO DE GABARITOS DE CONTROLE E DISPOSITIVOS DE PRODUÇÃO, foi aplicado no contexto da empresa Volvo do Brasil e permitiu validar um procedimento que empregou a Manufatura Aditiva na fabricação de duas peças modelo. A fabricação por Manufatura Aditiva permitiu uma redução considerável no tempo de fabricação (-98% para a peça Algema e -96% para o Tubo de Resfriamento). Essa redução no tempo para a obtenção das Peças Modelo agilizam a avaliação e validação dos dispositivos de controle dos fornecedores, pode agilizar a obtenção da documentação de PPAP, garantir assertividade na aprovação de PPAP e pode reduzir consideravelmente o tempo no desenvolvimento do processo de fabricação das peças seriadas.

É importante ressaltar que o emprego do procedimento de DFAM proposto é inovador no contexto da indústria automotiva, pois sugere uma mudança de conceito produtivo e inseri a AM como mais uma opção de processo de fabricação e não mais apenas como ferramenta de prototipagem rápida.

Curitiba 29 de junho de 2021.

DAVID KNOPFHOLZ
BECHER:53633008934

Assinado de forma digital por DAVID
KNOPFHOLZ BECHER:53633008934
Dados: 2021.06.29 13:36:58 -03'00'

Assinatura do supervisor ou responsável direto