

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

RAMON PACKER FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO GEOMÉTRICA DE PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA**

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

RAMON PACKER FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO GEOMÉTRICA DE PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso Submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Professor Orientador: André Roberto de
Sousa, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Fernandes, Ramon Packer

Avaliação da Exatidão Geométrica de Processo de Manufatura Aditiva / Ramon Packer Fernandes; orientação de André Roberto de Sousa – Florianópolis, SC, 2019. 117p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Manufatura Aditiva. 2. FDM. 3. Padrão de teste. I. Sousa, André Roberto de. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO GEOMÉTRICA DE PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA

RAMON PACKER FERNANDES

Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de julho de 2019.

Banca Examinadora:

André Roberto de Sousa, Dr. Eng. (Orientador)

Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.

Milton Pereira, Dr. Eng.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **RAMON PACKER FERNANDES**, matrícula nº 131004324-8, do curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO GEOMÉTRICA DE PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 03 de julho de 2019.

Prof. Orientador do TCC: André Roberto de Sousa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelas inúmeras bênçãos que o pai celestial me concedeu ao longo desta jornada e pelos diversos obstáculos que me fizeram e me fazem crescer diariamente.

Em especial ao meu avô Dercino *“In Memoriam”* por me ensinar a dar os primeiros passos, por me educar juntamente com meus pais e me mostrar a ter gratidão pelas pequenas coisas que a vida nos oferece. Carrego comigo a imagem de um homem ímpar, de muita bondade e caridade com o próximo.

À minha mãe Risolete, que sempre me incentivou a correr atrás dos meus objetivos, de mando apoio e me ensinando valores pelos quais carrego até hoje. Obrigado pelo amor incondicional, pelas preocupações, pelo zelo e carinho demonstrado. Ressalto também todo seu esforço em relação às inúmeras noites mal dormidas, em prol dos meus sonhos e da minha felicidade.

Ao meu pai Romário, por ser um homem de grande humildade, honestidade e que nunca mediu esforços para prover conforto a nossa família. Obrigado pelos ensinamentos, pela compreensão e por ser um exemplo de homem, pela qual espelho-me.

À minha irmã Rúbia, por me fazer crescer como irmão, me ajudando a me tornar uma pessoa melhor. Agradeço por todo respeito, apoio e carinho concedidos, principalmente nos momentos de turbulência.

À minha namorada Maria Alice, pelo companheirismo que construímos ao longo dos anos, por ser paciente inúmeras vezes, por acreditar em mim e apoiar minhas decisões. Obrigado pelos incentivos e por me mostrar a enxergar a vida de outra perspectiva.

Aos amigos que construí ao longo dos anos no curso técnico e graduação.

Aos técnicos dos laboratórios pela paciência e aprendizado repassados.

A todos os funcionários do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, sobretudo os do Departamento Acadêmico de Metal Mecânica, pela paciência e prestatividade.

Ao professor André Roberto de Sousa, pelo modelo de vocação ao trabalho científico, pelo profissionalismo e por dividir seu conhecimento ao longo de minha vida acadêmica no IFSC. Obrigado pela dedicação, orientação recebida e por não medir esforços em meu auxílio, principalmente na reta final deste trabalho.

Ao professor Aurélio da Costa Sabino Netto, pelo modelo de vocação ao trabalho científico, por compartilhar seu conhecimento na área de manufatura aditiva e por

disponibilizar o espaço do grupo de Pesquisa em Processos de Fabricação e Tecnologia dos Materiais (PFBMAT – IFSC), para a utilização dos equipamentos de impressão 3D.

Agradeço aos demais docentes que fizeram parte desta jornada e contribuíram com minha formação.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis, pelo ensino de qualidade, pelas oportunidades e aprendizados durante esses anos de graduação e sobretudo por disponibilizar seu espaço laboratorial de metrologia e equipamentos para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a empresa WEG AUTOMAÇÃO LTDA, representada pelo gestor Guilherme Bonan e aos demais companheiros de trabalho do setor Critical Power, pelo auxílio e contribuição.

*“Ninguém consegue subir a
escada do sucesso sem se
esforçar muito”*

Ozires Silva

RESUMO

Dentre as formas de se propagar uma nova tecnologia destaca-se a abordagem sob aspectos que descrevem o desempenho de seus processos. Factualmente, padrões de referência com rastreabilidade metrológica são utilizados para avaliar as capacidades e limitações dos mesmos, bem como a comparação de suas performances. A fundamental importância destes padrões está atrelada em auxiliar a garantia da qualidade em prol do atendimento dos requisitos e funcionalidades do projeto requerido. Desde a década de 90, diversos padrões de teste vêm sendo estudados e criados para manufatura aditiva, porém atualmente ainda não existem padrões certificados. A organização global ASTM e outras entidades tem unido esforços para acelerar a criação de normas técnicas necessárias para a indústria de manufatura aditiva, objetivando aproximar algumas tecnologias da MA ao setor seriado, por exemplo. Neste trabalho, buscou-se apresentar uma contextualização sobre a exatidão geométrica dos processos MA, além de uma abordagem geral sobre os processos de fabricação MA conforme a norma ISO/ASTM 52900:2015, reunindo informações potenciais e limitantes. Após realizar um breve estudo de revisão de alguns padrões existentes, selecionou-se as características geométricas que explorassem a precisão cinemática de duas impressoras de processo FDM. Para isso, um novo modelo de padrão de teste foi criado em material PLA. Para a verificação da qualidade geométricas das peças impressas, utilizou-se uma máquina de medir por coordenadas do laboratório de metrologia do Instituto Federal de Santa Catarina. Estratégias de medições foram realizadas, bem como os resultados foram coletados e interpretados. Onde as características geométricas avaliadas abordaram erros de forma, orientação e localização. Já as características dimensionais foram estudadas por meio de elementos de tamanhos, diâmetros e pelo cálculo do erro do desvio de posição. A máquina cartesiana apresentou um maior erro de forma, vinculado a circularidade e um maior desvio de paralelismo, relacionado a orientação. Já a impressora de cinemática delta, apresentou um erro de circularidade, cilindridade e concentricidade de três, cinco e sete vezes maiores que a cartesiana, respectivamente. Além disso, os erros de perpendicularidade e sobretudo, o de concentricidade obtiveram valores influenciados pela temperatura do cabeçote na deposição do material e outros fatores, explanados neste trabalho. Por fim, através das características dimensionais foi possível definir isoladamente os índices de CP e CPk, onde a cartesiana apresentou apenas 18% e a delta 15% de aprovação.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. FDM. Padrão de Teste.

ABSTRACT

Among the ways to propagate a new technology, we highlight the approach to aspects that describe the performance of its processes. Reference standards with metrological traceability are used to assess their capabilities and limitations, as well as the comparison of their performance. The fundamental importance of these standards is linked to quality assurance assistance in order to meet the requirements and functionalities of the required project. Since the 1990s, several test standards have been studied and created for additive manufacturing, but currently there are no certified standards yet. The global ASTM organization and other entities have joined forces to accelerate the creation of technical standards needed by the additive manufacturing industry to bring some MA technologies closer to the serial industry, for example. In this work, we present a contextualization about the geometric accuracy of the MA processes, as well as a general approach on the manufacturing processes MA according to ISO / ASTM 52900: 2015, gathering potential and limiting information. After performing a brief review of some existing standards, we selected the geometric characteristics that exploited the kinematic accuracy of two FDM process printers. For this, a new test artifact template was created in PLA material. For the verification of the geometric quality of the printed pieces, a machine was used to measure by coordinates of the metrology laboratory of the Federal Institute of Santa Catarina. Measurement strategies were performed, as well as the results were collected and interpreted. Where the evaluated geometric characteristics approached errors of form, orientation and location. Already the dimensional characteristics were studied by means of elements of sizes, diameters and by the calculation of the error of the position deviation. The Cartesian machine presented a larger shape error, linked to circularity and a greater parallelism deviation, related to orientation. The delta kinematic printer, on the other hand, presented a circularity, cylindricity and concentricity error of three, five and seven times greater than the Cartesian, respectively. In addition, the perpendicularity and especially the concentricity errors obtained values influenced by the head temperature in the material deposition and other factors, explained in this work. Finally, through the dimensional characteristics it was possible to define separately the CP and CPk indices, where the Cartesian presented only 18% and the delta 15% of approval.

Keywords: Additive Manufacturing. FDM. Test Artifact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais comitês de padronização MA.	21
Figura 2 : Ciclo de vida do produto.	24
Figura 3: Subdivisão cronológica MA.	25
Figura 4: Fabricação de mapas de relevo.	26
Figura 5: Processo de criação de mapas topográficos.	26
Figura 6: Técnicas de identificação.	27
Figura 7: Dispositivo de ensino de estudo topográfico.	27
Figura 8: Método de construção por adição de camadas.	28
Figura 9: Projeto de estúdio circular.	29
Figura 10: Técnica de luz graduada.	29
Figura 11: Processo de produção de baixos relevos.	30
Figura 12: Método híbrido.	30
Figura 13: Técnica fotopolimérica.	31
Figura 14: Sistema fotoquímico.	32
Figura 15: Processo de sinterização a laser.	32
Figura 16: Patente descritiva de sinterização seletiva a laser.	33
Figura 17: Sistema de estereolitografia.	33
Figura 18: Sistema de espelhos para estereolitografia.	34
Figura 19: Cronologia da Manufatura Aditiva.	35
Figura 20: Gráfico do histórico de patentes de Manufatura Aditiva.	36
Figura 21: Etapas gerais do fluxo de fabricação MA.	37
Figura 22: Manufatura digital.	38
Figura 23: Elemento triangular planar.	39
Figura 24: Classificação das tecnologias MA.	40
Figura 25: Fotopolimerização em cuba.	41
Figura 26: Características da fotopolimerização.	42
Figura 27: Jateamento de material.	42
Figura 28: Características do jateamento de material.	43
Figura 29: Jateamento de aglutinante.	44
Figura 30: Características do jateamento de aglutinante.	44
Figura 31: Fusão de leito de pó.	45
Figura 32: Características da fusão de leito de pó.	46

Figura 33: Deposição com energia direcionada.	47
Figura 34: Características da deposição com energia direcionada.	48
Figura 35: Laminação de folhas.	48
Figura 36: Características da deposição com energia direcionada.	49
Figura 37: Modelagem por fusão e deposição.	50
Figura 38: Características da deposição com energia direcionada.	51
Figura 39: Comparação do custo x volume.	51
Figura 40: Pirâmide de materiais termoplásticos FDM.	52
Figura 41: Visualização macro da altura da camada.	53
Figura 42: Camada superiores insuficientes.	53
Figura 43: Porcentagens de preenchimento.	54
Figura 44: Padrões de preenchimento.	54
Figura 45: Problema de adesão.	57
Figura 46: Fenômeno de empenamento.	57
Figura 47: Efeito escada.	58
Figura 48: Erro de corda.	59
Figura 49: Resultados de análise em relação a dependência de orientação.	59
Figura 50: Impacto da orientação.	60
Figura 51: Erros geométricos para eixo de movimentação.	61
Figura 52: Modelo de contração no sistema de coordenada polar.	62
Figura 53: Mock-ups e testes.	63
Figura 54: Cases de sucesso.	64
Figura 55: Canais de fluxo otimizados.	64
Figura 56: Otimização topológica de suportes.	65
Figura 57: Injetor de combustível LEAP.	66
Figura 58: Componentes impressos para o Rolls-Royce Phantom.	66
Figura 59: Modelo de calçado adidas.	67
Figura 60: Power System – SLS.	68
Figura 61: Power System – Produto.	68
Figura 62: Normas em Desenvolvimento.	70
Figura 63: Artefato de teste de precisão linear.	71
Figura 64: Artefato de teste em diferentes ângulos.	72
Figura 65: Artefato de teste de criação de pequenas geometrias.	72
Figura 66: Artefato com características geométricas típicas.	73

Figura 67: Artefato para teste de precisão dimensional.	73
Figura 68: Artefato proposto pelo NIST.	74
Figura 69: Artefato de repetibilidade.	75
Figura 70: Artefato de teste para degrau em Z.	75
Figura 71: Artefato criado para Kickstarter.	76
Figura 72: Cadeia de processo adotada.	77
Figura 73: Padrão de teste modelado 3D.	78
Figura 74: Novo padrão de teste.	79
Figura 75: Filamento PLA.	80
Figura 76: Configurações cartesiana e core XY.	81
Figura 77: Impressora CR-20.	82
Figura 78: Configuração delta.	83
Figura 79: Impressora Rostock Max V2.	83
Figura 80: MMC LKG80-C.	84
Figura 81: Sistema de apalpação Renishaw.	85
Figura 82: Método off-line com modelo CAD.	86
Figura 83: Características referentes à [BQ].	89
Figura 84: Características referentes à [CF].	90
Figura 85: Desvio de posição de furos em [CB].	90
Figura 86: Características referentes à [CB].	91
Figura 87: Características referentes à [FC].	91
Figura 88: Características referentes à [CP].	92
Figura 89: Características referentes à [CN].	92
Figura 90: Características referentes à [SI].	93
Figura 91: Características referentes à [CE].	93
Figura 92: Desvios típicos.	106
Figura 93: Perpendicularidade entre eixos.	107
Figura 94: Posicionamento linear.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características geométrica típicas.....	79
Tabela 2: Especificações técnicas CR-20.	81
Tabela 3: Especificações técnicas Rostock Max V2.....	83
Tabela 4: Estratégia de medição MMC.....	86
Tabela 5: Características geométricas e dimensionais.....	87
Tabela 6: Resultados de medição CR-20.	95
Tabela 7: Valor máximo das médias amostrais CR-20.....	98
Tabela 8: Índices CP e CPk para características isoladas – Cartesiana.	99
Tabela 9: Resultados de medição Rostock Max V2.	100
Tabela 10: Valor máximo das médias amostrais Rostock Max V2.	104
Tabela 11: Índices CP e CPk para características isoladas – Delta.	105

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	<i>Bidimensional</i>
3D	<i>Tridimensional</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CDLP	<i>Continuous DLP</i>
CD&T	<i>Classical Dimensioning & Tolerancing</i>
CNC	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
DLP	<i>Direct Light Processing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
DOD	<i>Drop-On-Demand</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
EBAM	<i>Electron Beam Additive Manufacture</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>
GE	<i>General Electric Company</i>
IPC	<i>Association Connecting Electronic Industries</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LENS	<i>Laser Engineered Net Shape</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
PFMAT	<i>Processos de Fabricação e Tecnologia dos Materiais</i>
MA	<i>Manufatura Aditiva</i>
MJF	<i>Multi Jet Fusion</i>
MJP	<i>Material Jetting</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NJP	<i>Nano particle jetting</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 A BUSCA PELA EXATIDÃO EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	19
1.3 OBJETIVOS.....	22
1.3.1 Objetivo Geral	22
1.3.2 Objetivos Específicos.....	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2. MANUFATURA ADITIVA	24
2.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA.....	25
2.1.1 Topografia.....	25
2.1.2 Fotoescultura	28
2.1.3 Demais eventos	31
2.2 IMPORTÂNCIA E PERCEPÇÃO DA TECNOLOGIA	34
2.3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	37
2.4 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA.....	39
2.4.1 Classificação Geral	39
2.4.2 Fotopolimerização em cuba	40
2.4.3 Jateamento de material.....	42
2.4.4 Jateamento de aglutinante	43
2.4.5 Fusão de leito de pó.....	45
2.4.6 Deposição com energia direcionada	47
2.4.7 Laminação de folhas	48
3. EXTRUSÃO DE MATERIAL.....	50
3.1 Filamento	52
3.2 Parâmetros gerais de fabricação	52
4. EXATIDÃO DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA.....	56

4.1 CAUSAS GERAIS DE ERROS GEOMÉTRICOS EM PEÇAS	56
4.1.1 Deposição de matéria-prima	56
4.1.2 Falta de adesão à plataforma de construção	57
4.1.3 Efeito escada e erro de corda	58
4.1.4 Orientação de construção	59
4.1.5 Erros geométricos de máquinas.....	60
4.2 DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA EXATIDÃO DE PROCESSOS MA.....	61
4.2.1 Compensação de desvios de forma	61
4.3 MANUFATURA ADITIVA NA PRODUÇÃO DE PEÇAS DIVERSAS.....	62
4.3.1 TIPOS DE APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA	62
5. NORMAS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE PROCESSOS MA....	69
5.1 COMITÊS NO ÂMBITO DA MA	69
6. AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA.....	77
6.1 MODELAMENTO GEOMÉTRICO DO PADRÃO DE TESTE	78
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	80
6.3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA PROCESSO FDM	80
6.3.1 Caracterização da Máquina Cartesiana	81
6.3.2 Caracterização de Máquina Delta	82
6.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO PARA OS PADRÕES	84
6.4.1 Estratégia de medição.....	85
6.4.2 Linguagem GD&T aplicada ao padrão de teste	87
7. APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE TESTE.....	94
7.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO PROCESSO FDM CARTESIANA	94
7.1.1 Medições e Análise de Erros Encontrados.....	94
7.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS FDM DELTA.....	100
7.2.1 Medições e Análise de Erros Encontrados.....	100
8. CONCLUSÕES	106
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

1. INTRODUÇÃO

1.1 A BUSCA PELA EXATIDÃO EM PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

Nas últimas décadas, o crescente avanço tecnológico tem imposto sobre o mercado uma maior competitividade entre as empresas, devido à necessidade de desenvolver produtos e processos cada vez melhores. Fatores como: menor custo de produção, maior performance do produto e menor tempo de entrega, exigem que empresas respondam de forma satisfatória as necessidades de seus clientes, para que não percam seu *Market Share*. Os questionamentos que envolvem os aspectos produtivos devem ser respondidos de forma rápida e eficaz, objetivando a materialização de suas exigências [1]. Desta forma, as empresas são forçadas a desenvolver alternativas para obter sucesso em seus respectivos mercados [2].

Em função do mercado globalizado, novas tecnologias têm surgido ao longo dos anos, despontando sua utilização a partir da viabilidade econômica. Diante deste cenário, observa-se que a partir da década de 80, técnicas de fotoescultura e topografias foram empregadas de forma mais intensa, somente após o surgimento de equipamentos comerciais de manufatura aditiva, sendo o primeiro apresentado pela empresa americana 3D Systems com o nome de SLA-1 em 1987 [3].

A característica principal da MA se encontra na obtenção de objetos tridimensionais, criados a partir de um modelo 3D onde realiza-se a deposição sucessiva de material por adição em camadas até o produto ser finalizado, sendo esta contrária a metodologias convencionais de fabricação subtrativas [4][5].

Desde o surgimento destas tecnologias, estudos e projeções demonstram um potencial significativo e revolucionário nos diversos aspectos da manufatura, cujo potencial disruptivo, mostra-se vital em se tornar o novo modelo de negócios do século XXI [6]. O uso da MA obteve crescimento substancial a partir de aplicações iniciais em prototipagem rápida, porém, devido à constatação de suas vantagens, bem como a evolução de seus processos, grandes empresas e órgãos fomentadores vêm analisando a sua viabilidade como método de produção seriada.

Para que os diferentes processos de manufatura aditiva disponibilizados hoje caminhem no sentido da produção seriada, faz-se necessário atender os requisitos e funcionalidades do projeto. Segundo Moylan et al. (2012), a adoção generalizada dos processos MA é dificultada atualmente, devido às limitações existentes na precisão

dimensional das peças impressas, no acabamento superficial, nas propriedades dos materiais, nos parâmetros do processo, bem como suas normas técnicas.

Segundo a empresa de consultoria *Wohlers Associates* [8], houve um crescimento de 17% em termos de materiais e serviços no ano de 2016, atingindo uma quantia de \$ 6,1 bilhões de dólares, valor este comparável a taxa média de crescimento anual da MA nos últimos 28 anos. De acordo com Quinlan et al. (2017), é possível afirmar com segurança que a manufatura aditiva transitou do serviço de prototipagem rápida para usos tradicionais e em breve influenciará a produção seriada. Tal afirmação, pode ser comprovada no ano de 2015, onde a produção de peças de uso final, representou 51% do mercado mundial de serviços da MA, correspondendo a \$ 2,7 bilhões de dólares [8].

Cabe ressaltar que, embora existam organizações internacionais e empresas fomentando a promoção do conhecimento, o estímulo de pesquisas e a implementação de tecnologias MA, tem-se que a qualificação de processos, a melhoria da exatidão dimensional e geométrica, bem como a necessidade de certificação de produtos, são frequentemente identificados como obstáculos para o avanço da manufatura aditiva.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Mediante as pesquisas de literaturas científicas realizadas a respeito do universo MA, percebe-se que tal tecnologia atingirá seu grande potencial através de normas técnicas abrangentes e aceitas globalmente, por intermédio de organizações reconhecidas. A ausência dessas normas pode afetar desde a qualidade do projeto até a interoperabilidade da tecnologia, dificultando sua adoção em escala produtiva.

À medida que as tecnologias MA foram se desenvolvendo no final dos anos 80, houve a necessidade de solicitar procedimentos e ferramentas que auxiliassem a avaliação do desempenho de processos existentes. Tais avaliações poderiam ser de forma comparativa ou simplesmente a verificação das capacidades e limitações tecnológicas, através de medições e análises de um processo específico. De modo a suprir o absentismo deste cenário, muitas empresas, organizações e centros de pesquisas, voltaram seus esforços para o projeto e desenvolvimento de padrões de teste.

Embora diversos padrões de teste já tenham sido criados a partir da década de 90, percebe-se que na maioria dos casos, tais peças apresentam três configurações principais, vide a seguir. Além disso, boa parte da literatura comprova que a ausência de padronização nos procedimentos de criação e medição faz com que os dados apresentados possuam

valores limitados, uma vez que os padrões de teste possuem geralmente uma interdependência aos autores. Logo, a tomada de decisão advinda pelo operador/empresa, influencia diretamente na precisão dimensional, bem como o acabamento superficial do padrão de teste criado.

- **Padrão baseado em produto:** componente de um produto específico por exemplo, é criado em processo MA e utilizado como padrão de teste [10]. Neste caso, o interesse na peça se estende unicamente à própria organização criadora. Além disso, são peças cujo o desenvolvimento não leva em consideração características importantes e questões críticas do processo. Logo, sua aplicabilidade é limitada.
- **Padrão simples:** apresentam poucos recursos geométricos e, por consequência, utilizam menor quantidade de material. São peças usadas, por exemplo, no estudo de efeitos advindos de parâmetros do processo [11], como: espessura e orientação das camadas, orientação e posição da peça, distância entre filamentos, resolução, dentre outros.
- **Padrão complexo:** apresentam recursos geométricos diversos e complexos [12] e, por consequência, necessitam de atenção acerca dos sistemas de medição a serem utilizados na avaliação. São peças que requerem maior quantidade de material e tempo para sua construção. Nota-se que em alguns padrões, o volume de material da base é pouco aproveitado em relação aos recursos geométricos, acarretando em custos desnecessários.

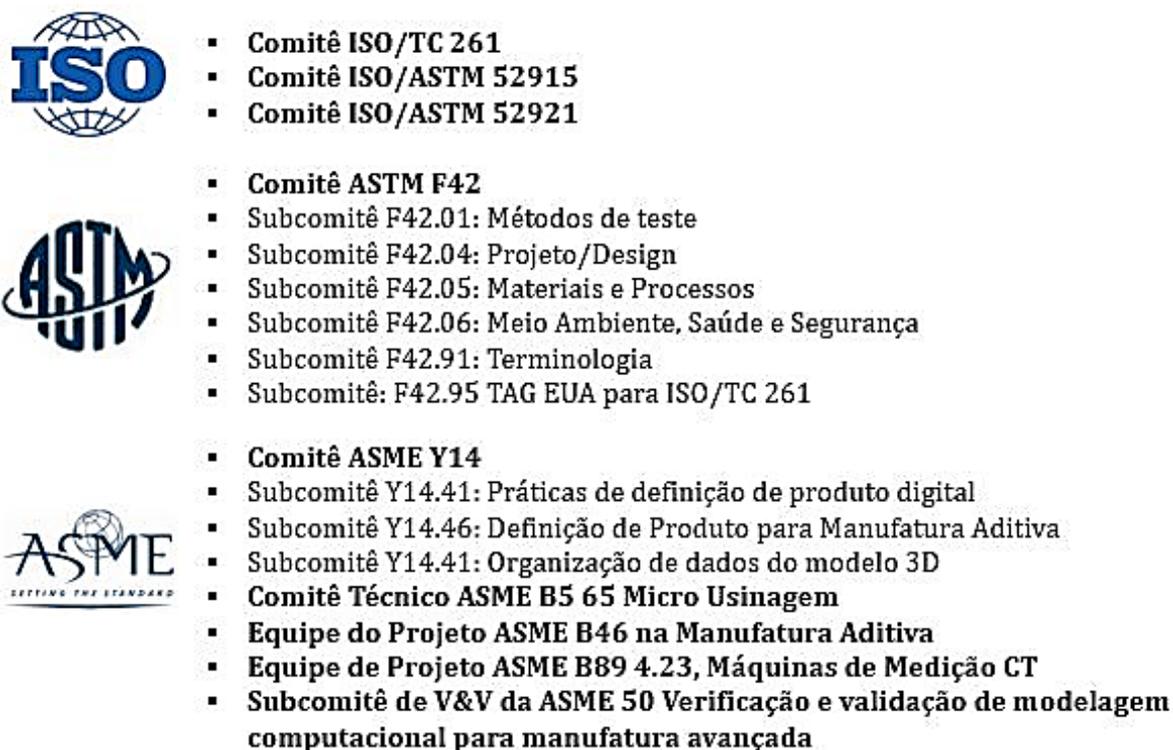
Atualmente, existe uma iniciativa entre instituições normalizadoras que objetiva estruturar as normas que darão base ao desenvolvimento tecnológico da manufatura aditiva. Dentre os comitês principais, figura 1, destaca-se: ASTM, ASME e ISO. Outros comitês que estão envolvidos nas normas, são: AWS, IPC e NASA. Cada comitê é composto por subcomitês, os quais são responsáveis por abordar segmentos específicos dentro da área de assunto geral, sob o escopo do comitê técnico.

Ao direcionar o objeto de estudo conforme a estrutura ISO/TC 261 e ASTM F42, tem-se que existe uma hierarquia de normas subdivididas em três níveis [13], vide em sequência. Normas como ISO/ASTM 52902 e ASTM WK55297, encontram-se em desenvolvimento [14]. Estas normas descrevem respectivamente, as diretrizes para avaliação da capacidade geométrica de sistemas MA e a descrição de geometrias para padrões de referência, juntamente com os tipos de medições a serem realizadas nos mesmos [15][16].

Os níveis das normas são:

- **Normas gerais:** São responsáveis por especificar conceitos gerais e requisitos comuns. São geralmente aplicáveis à maioria dos tipos de materiais, processos e aplicações de manufatura aditiva.
- **Normas de categoria:** Descrevem requisitos específicos de uma determinada categoria de processo ou material.
- **Normas especializadas:** Explicitam requisitos específicos de uma determinada aplicação, processo ou material.

Figura 1: Principais comitês de padronização MA.



Fonte: Autoria própria.

Visando contribuir para uma lacuna de literatura ainda em aberto, percebeu-se que a avaliação geométrica de processos MA se apresenta como um dos *hot topics* de grande relevância no universo da manufatura, devido ao seu caráter pouco investigado. Segundo Jurrens (1999), um padrão de referência genérico aos processos MA, ainda não está disponível na literatura atual para usuários e empresas. Porém, sabe-se que é extremamente difícil projetar um padrão de teste que seja universal para a otimização dos processos, em decorrência da grande variedade de processos existentes que norteiam a base da tecnologia MA [18].

Diante os aspectos levantados, o presente estudo focou na concepção de um novo padrão de teste, cuja configuração buscou atender requisitos como: boa adequação para impressão, utilização de características geométricas típicas baseadas em padrões anteriores, redução do tempo de fabricação devido à geometria, obtenção do melhor aproveitamento de matéria-prima, padrão com geometrias mensuráveis, facilidade em analisar as características geométricas pretendidas.

1.3 OBJETIVOS

Com o intuito de facilitar a compreensão deste trabalho, subdividiu-se os objetivos nos tópicos abaixo.

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a precisão dimensional e geométrica do processo de manufatura aditiva FDM.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar os diferentes processos de manufatura aditiva;
- Estudar usuários, parceiros e fabricantes de sistemas de manufatura aditiva para a fabricação do padrão de teste;
- Revisão de literatura existente de padrões de teste, voltados ao processo FDM;
- Estudar normas ASME Y14.5 e ISO 1101:2017 - GD&T;
- Criar padrão de teste com geometrias que explorem a precisão cinemática da máquina;
- Planejar os experimentos para avaliação geométrica dos padrões de teste;
- Criar estratégias de medição;
- Medir e avaliar os erros geométricos das peças, determinando suas causas;
- Analisar a exatidão geométrica do processo, comparando-as com as máquinas utilizadas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após a explicitação do capítulo 1 sobre o contexto geral da manufatura aditiva em buscar a exatidão de seus processos, o capítulo 2 visa conceituar alguns tópicos relevantes sobre a importância e percepção desta tecnologia, sua origem, conceitos fundamentais que estão atrelados aos métodos de fabricação por camadas e quais os processos existentes segundo a classificação da norma ISO/ASTM 52900.

No capítulo 3, aborda-se de forma mais específica a tecnologia FDM, destacando-se alguns parâmetros de fabricação. Já o capítulo 4 contextualiza sobre a exatidão de peças fabricadas em MA, abordando-se também algumas causas de erros geométricos, bem como exemplos de aplicação em diferentes setores. O capítulo 5 é responsável por apresentar os tipos de normas envolvidas e um estudo de benchmarking de padrões de teste existentes.

São apresentados no capítulo 6, as metodologias de desenvolvimento, o modelamento geométrico do padrão de teste, bem como a caracterização do material utilizado na impressão. Além disso, descreve-se os tipos de impressoras utilizadas, sua cinemática e especificações técnicas. O tipo de medição proposto e o plano de inspeção realizado, também são descritos. No capítulo 7, apresenta-se os resultados das medições, bem como suas análises. Por fim o capítulo 8 apresenta as principais conclusões deste trabalho e sugestões futuras.

2. MANUFATURA ADITIVA

O recente advento da chamada quarta revolução industrial por alguns países e empresas, vem transformando de forma holística os estágios do ciclo de vida de produtos. Desta forma, percebe-se que um novo escopo de transformação digital já se faz realidade, cuja caracterização se encontra na integração de diversas tecnologias em prol do monitoramento de toda a cadeia produtiva, figura 2 [19]. Segundo o relatório do fórum econômico mundial, estima-se que o valor econômico global vinculado à digitalização de diversos setores em todo o mundo será de US \$ 100 trilhões somente nos próximos 10 anos [20]. Neste cenário, surge fortemente a aplicação do conceito de “*Mudança de Mindset*” sobre as chamadas tecnologias disruptivas. No entanto, sabe-se que toda inovação tecnológica que provoca tal efeito gera um sentimento de desconfiança em relação à sua aplicação.

Figura 2 : Ciclo de vida do produto.



Fonte: SKA.

Diante as inúmeras ferramentas tecnológicas ditas 4.0, a manufatura aditiva tem se destacado fortemente devido ao seu desempenho inovador e flexibilidade ímpar. Para Rodolpho Pereira, líder de Manufatura Aditiva na GE Aviation – Celma, em Petrópolis/RJ, tal tecnologia é sim o processo do futuro, considerando-a como uma provedora de soluções. Ressalta também que toda inovação tecnológica deve ser encarada sob uma nova perspectiva, cujo questionamento deve ser feito de forma diferente: "Por que não usar?".

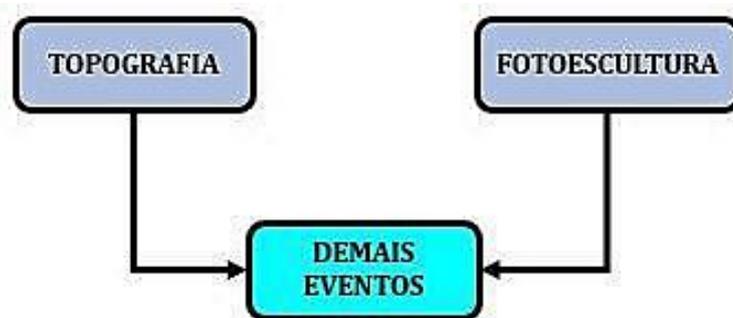
Por meio desta mudança de questionamentos, o uso da manufatura aditiva na GE Celma alavancou novas experiências, conhecimentos, know-how e, sobretudo, respostas rápidas para problemas diários [21].

O setor industrial representa aproximadamente 16% da economia a nível global [22]. Logo, havendo a mudança de *Mindset*, a MA poderá impulsionar cada vez mais a produção de bens junto ao consumidor, havendo uma melhor democratização em escala mundial e, em consequência, uma maior gama de personalização de serviços e/ou produtos. De modo geral, o produto acabado não precisa ser impresso. Porém, pode-se imprimir cases e ou itens que agreguem melhorias contínuas aos processos de fabricação e a cadeia produtiva, sendo estes responsáveis por tornar o produto “ser final” [21].

2.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA

Segundo Bourell et al. (2009), após revisões bibliográficas de patentes americanas, tem-se que as tecnologias de MA possuem duas raízes iniciais, sendo elas a topografia e a fotoescultura. A figura 3 mostra esta subdivisão da cronologia.

Figura 3: Subdivisão cronológica MA.



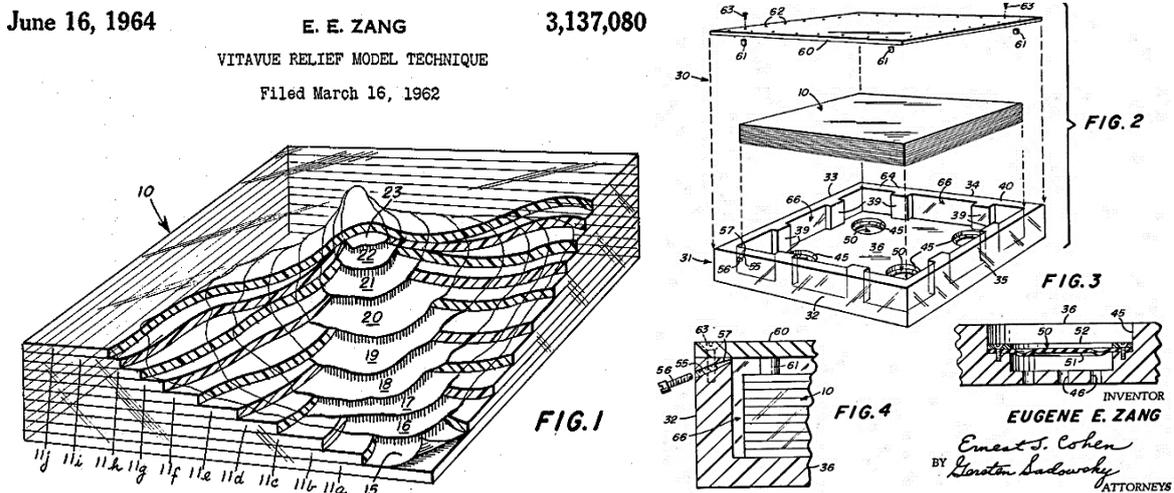
Fonte: Autoria própria.

2.1.1 Topografia

Em 1892 foi sugerido por Blather [24], uma metodologia que consistia na construção de um molde para mapas topográficos, figura 4. Segundo o autor, uma série de placas de cera com suas respectivas linhas de contorno eram empilhadas, obtendo-se superfícies tridimensionais positivas e negativas. Ao final, compunha-se sobre o relevo um papel, dando-se origem ao mapa topográfico.

Aperfeiçoamentos foram encontrados no modelo de Zang [26] em 1964, que propôs a utilização de placas transparentes com escrituras identificando as layers e detalhes sobre a topografia, figura 6.

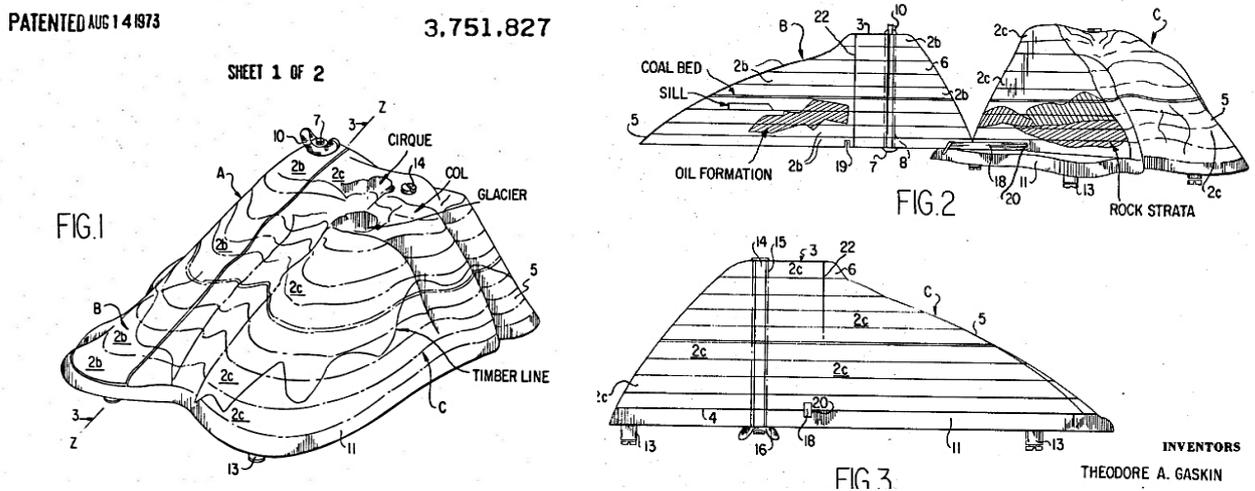
Figura 6: Técnicas de identificação.



Fonte: Zang (1964).

No ano de 1973, Gaskin [27] criou um dispositivo de ensino para estudo de formações geológicas e topográficas. Tal modelo de característica tridimensional se baseia na montagem e desmontagem da estrutura, com objetivo de divulgar ilustrações tanto externas quanto internas, figura 7.

Figura 7: Dispositivo de ensino de estudo topográfico.

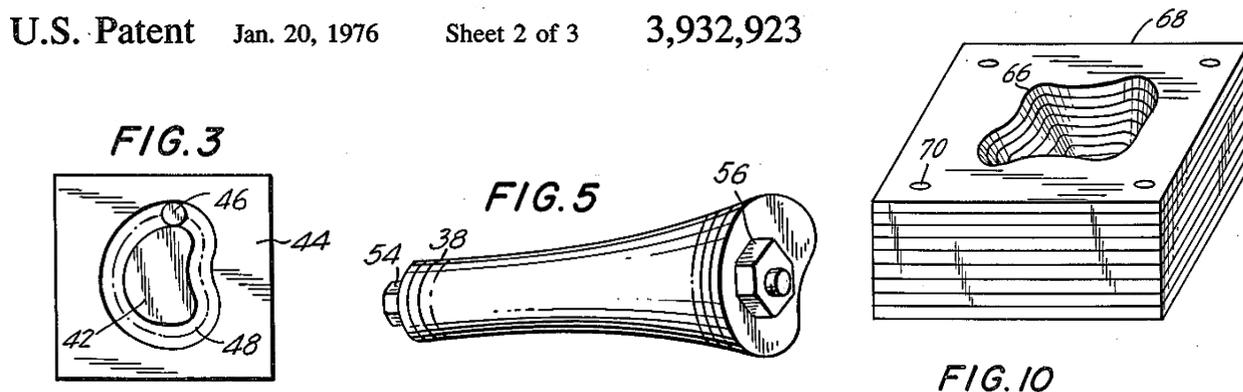


Fonte: Gaskin (1973).

Através da empresa Mitsubishi Motors, Matsubara [28] patenteou, em 1974, o desenvolvimento de um processo topográfico através de materiais fotopoliméricos com revestimento refratário. Tal resina era espalhada em layers, sendo estas curadas através de uma lâmpada de vapor sequencialmente até solidificar a forma pretendida. Cabe ressaltar que em regiões com falhas ou não endurecidas utilizava-se um solvente para diluição (BOURELL et al., 2009).

Após dois anos, DiMatteo [29] avançou os estudos da topografia, objetivando satisfazer algumas particularidades relacionadas aos processos de fabricação convencional. Neste caso, foi constatado que as técnicas de empilhamento poderiam solucionar problemas relacionados a geometrias complexas, figura 8. Em meados da década de 80, Nakagawa [30] utilizou o método de laminação para produzir ferramentas de estampagem e moldes de injeção.

Figura 8: Método de construção por adição de camadas.



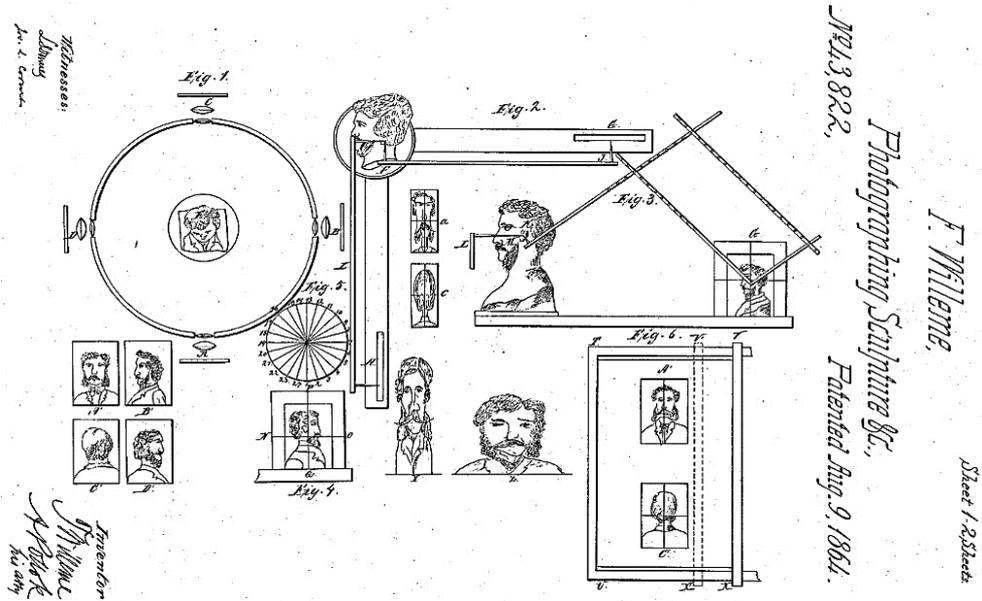
Fonte: DiMatteo (1976).

2.1.2 Fotoescultura

Segundo o autor supracitado Bourell et al. (2009), em 1864 Willème, visando criar réplicas tridimensionais de objetos, construiu uma sala circular com câmeras fotográficas distanciadas igualmente para posterior esculpimento dos objetos [31], figura 9.

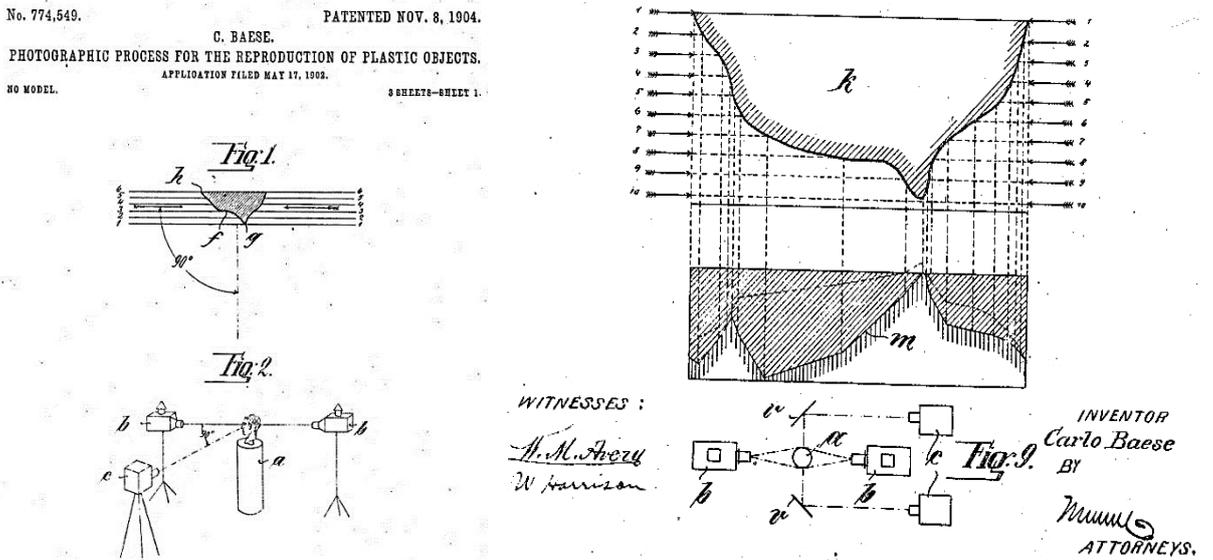
Após alguns anos, Baese [32] criou uma técnica utilizando luz graduada, propondo melhorias nos processos fotográficos advindos pelo trabalho de escultura de Willème. Sua proposta se deu na utilização de uma gelatina fotossensível que se expande em contato com a luz, desta forma conseguia-se produzir uma imitação em relevo dos objetos ou representações pretendidas, figura 10.

Figura 9: Projeto de estúdio circular.



Fonte: Willème (1864).

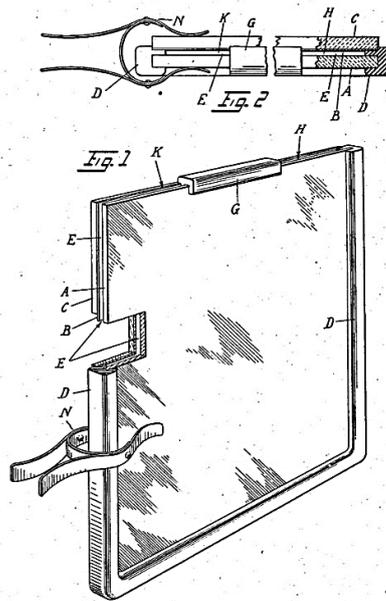
Figura 10: Técnica de luz graduada.



Fonte: Baese (1904).

Em 1924 Monteah [33], desenvolveu técnicas fotomecânicas para a produção de baixos relevos. Materiais como gesso e cera foram utilizados visando questões como revestimento, acabamento desejado e aplicação em moldes ou matrizes de produção, figura 11.

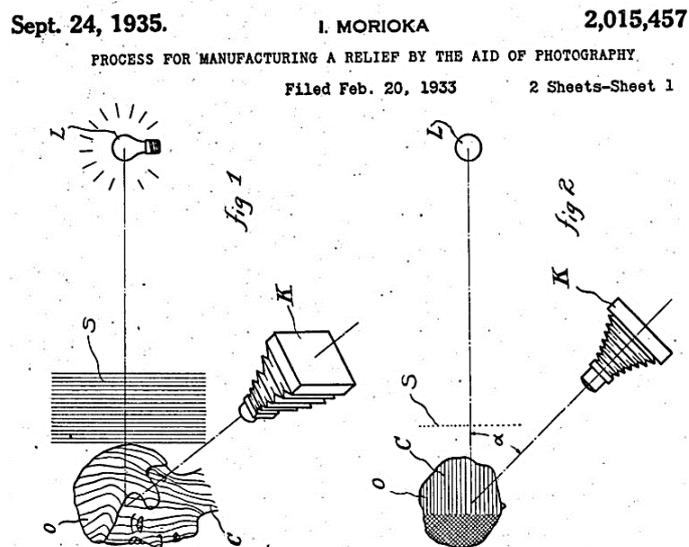
Figura 11: Processo de produção de baixos relevos.



Fonte: Monteah (1924).

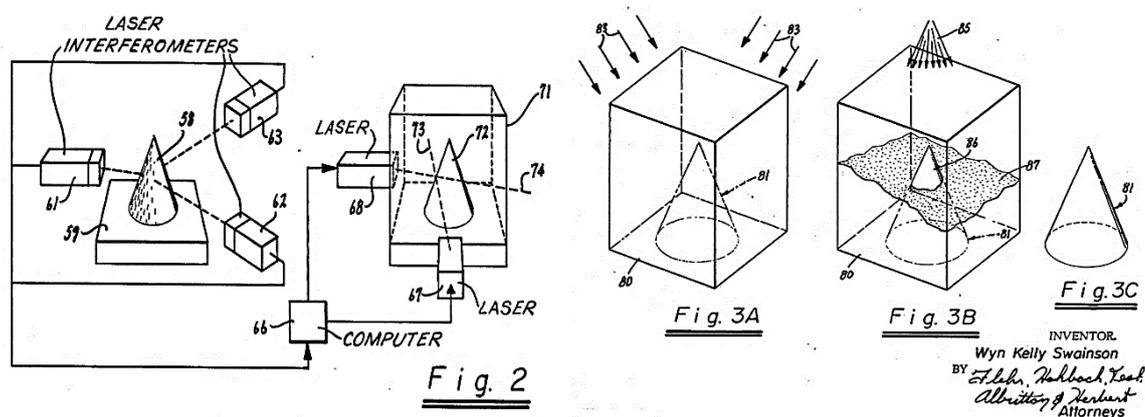
No ano de 1935, destaca-se o surgimento de uns dos primeiros desenvolvimentos híbridos por Morioka [34], através da combinação de ambas as técnicas apresentadas. Tal método consiste na utilização de luz estruturada para criação de linhas de contorno do objeto desejado, sendo estas transferidas para folhas que posteriormente cortava-se e empilhava-se sobre o material a ser esculpido, figura 12.

Figura 12: Método híbrido.



Fonte: Morioka (1935).

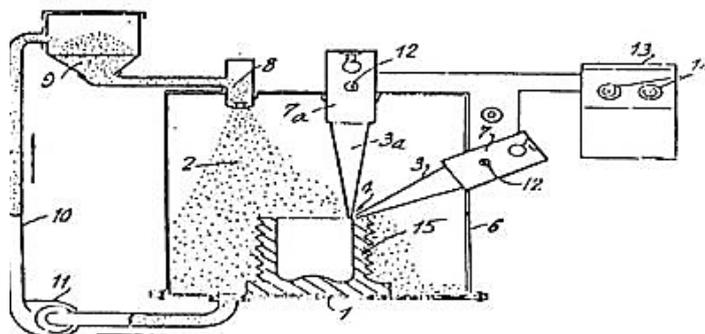
Figura 14: Sistema fotoquímico.



Fonte: Swainson (1968).

Em 1972, foi proposto por Ciraud [37], a utilização de pós a partir de uma variedade de materiais com boas propriedades em relação a capacidade de derretimento total ou parcial. Segundo a literatura, sua técnica possui características semelhantes aos processos de deposição direta encontrados atualmente, figura 15. Dentre as formas de aplicar material em pó, Ciraud utilizava uma matriz por três tipos de ação: gravitacional, magnética ou eletrostática. Para que houvesse a fusão das partículas e formação das camadas, utilizava-se feixes de laser, elétrons ou plasma. Cabe ressaltar que em algumas ocasiões, aumentava-se quantidade de feixes para o aumento da força de união entre as partículas.

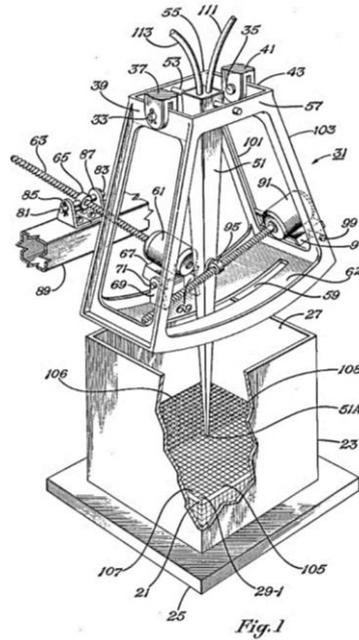
Figura 15: Processo de sinterização a laser.



Fonte: Ciraud (1972).

A primeira patente descritiva sobre o processo de sinterização seletiva a laser foi realizada pelo pesquisador Housholder [38] no ano de 1979. Foi discutido por ele questões como: deposição de camadas planas, solidificação seletiva por meio da utilização de calor e máscara e por fim, o processo de varredura de uma fonte de calor controlada, figura 16.

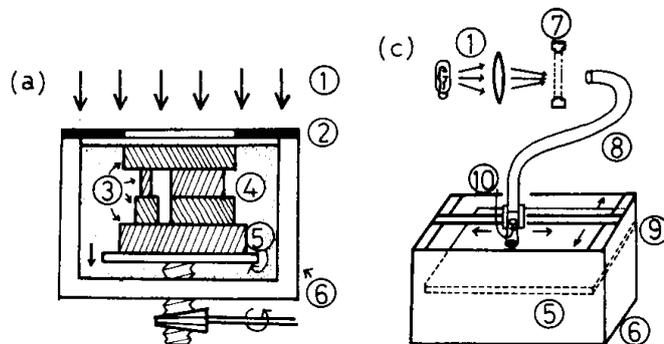
Figura 16: Patente descritiva de sinterização seletiva a laser.



Fonte: Housholder (1979).

Em 1981, Kodama [39] publicou um sistema de prototipagem rápida de um fotopolímero, figura 17. Seu método consistia em três tipos de estudos, sendo que no primeiro, utilizou-se uma máscara para controle da fonte de luz UV e uma plataforma que imergia o modelo em uma cuba de fotopolímero líquido. Posteriormente, a posição do mecanismo era invertida, cujo objeto era desenhado de “baixo para cima”. Por fim, o modelo era imergido em cuba como nos processos anteriores, porém utilizava-se um mecanismo x-y e uma fonte de energia por fibra óptica na formação das camadas.

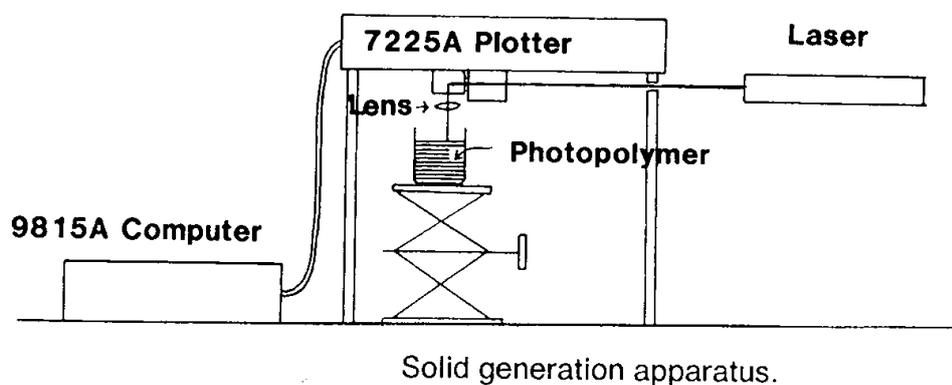
Figura 17: Sistema de estereolitografia.



Fonte: Kodama (1981).

No ano de 1982, Herbert [40] descreveu um sistema que direciona um feixe de laser UV com o objetivo de polimerizar um fotopolímero. O mecanismo conta com a utilização de um sistema de espelhos, um plotter x-y e um computador, de modo a comandar o feixe de laser, figura 18.

Figura 18: Sistema de espelhos para estereolitografia.



Fonte: Herbert (1982).

2.2 IMPORTÂNCIA E PERCEPÇÃO DA TECNOLOGIA

Segundo Monteiro (2015), a importância da tecnologia MA pode ser notada na sua evolução, se comparada aos processos de manufatura convencionais. Desta forma, muitos pesquisadores apontam tal tecnologia como solucionadora de eventuais problemas relacionados à personalização de produtos. Estudos mostram que a manufatura aditiva tem impactado de forma direta a cadeia produtiva na indústria. Logo, sua utilidade como ferramenta visa auxiliar engenheiros e projetistas para a produção de protótipos, bem como de produtos funcionais [42][43].

Para Rayna e Striukova (2016), a manufatura aditiva terá um próximo estágio evolutivo em sua utilização devido a chamada “Manufatura Direta”, que irá reconfigurar os processos produtivos, a comercialização e a cadeia de suprimentos do modelo atual. De acordo com a empresa de consultoria *A.T. Kearney* [45], é possível identificar uma cronologia da MA atual e suas tendências, figura 19, cuja economia global será impactada por meio de uma redistribuição na ordem de 4 a 6 trilhões de dólares nos próximos 10 anos, devido ao crescimento acelerado.

Figura 19: Cronologia da Manufatura Aditiva.

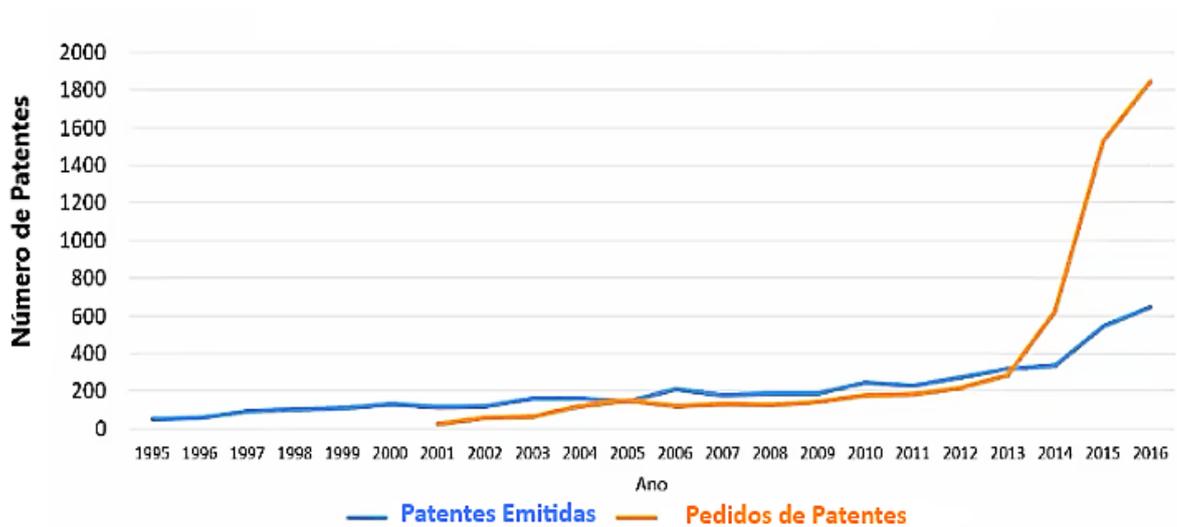


Fonte: Adaptado de A.T. Kearney.

Conforme estudo realizado por *A.T. Kearney*, a manufatura aditiva é atualmente usada em aplicações de baixo volume, alto custo unitário e pela necessidade de personalização. Sabe-se que os custos de fabricação são relativamente altos devido aos valores relacionados dos equipamentos, materiais e manutenção, constituindo uma das principais barreiras para a utilização da tecnologia (HOPKINSON; DICKENS, 2003). Contudo, pesquisadores ressaltam um aumento na aplicação da MA em diversos setores e projetam um crescimento substancial nos próximos 5 anos em áreas como a aeroespacial e a automobilística. Por conseguinte, percebe-se que os custos serão cada vez mais reduzidos, possibilitando que novos fornecedores de máquinas, equipamentos e materiais surjam no mercado, intensificando a competição através de preços favoráveis.

A relevância desta tecnologia pode ser presenciada através de um gráfico do histórico de patentes, realizado pela empresa *Wohlers Associates* [47]. No ano de 2016, o número de patentes emitidas foi de 646 se comparado as 53 patentes em 1995. Além disso, o número de pedidos de patentes migrou de 24 em 2001 para 1842 no ano de 2016, conforme figura 20. O crescente número de patentes e publicações registrados nos últimos anos mostra o interesse das empresas em aplicar a MA nos processos da cadeia produtiva.

Figura 20: Gráfico do histórico de patentes de Manufatura Aditiva.



Fonte: Adaptado de Wohlers Associates.

Diversas empresas como a HP vêm impulsionando o uso da MA, através de plataformas de incentivos de materiais abertos, de modo a agregar mais fornecedores de conteúdo *open source*. Percebe-se um crescente avanço dos chamados “FabLabs”, que são laboratórios que visam estimular a inovação tecnológica por meio da fabricação digital. Além disso, com um aumento médio anual de 346% nas vendas de impressoras de até 5000 dólares, observasse um crescimento do “Movimento Maker” iniciado em 2005, com o incentivo da *Revista Americana Make* [48].

Outro exemplo, são os comumente conhecidos “integradores de sistemas”. Tais profissionais possuem papel fundamental em ajudar empresas e fabricantes a integrar as tecnologias MA aos cenários de produção existentes. Por fim, a necessidade de softwares de design voltados para as inovações disponíveis em máquinas e sistemas tem imposto sobre o mercado o surgimento de novas empresas e readaptação das já existentes.

Com base em pesquisas realizadas por especialistas, existem cinco setores chaves que apresentam maior possibilidade e potencial de serem transformados pela manufatura aditiva, sendo eles: Automotivo, Aeroespacial, Industria Pesada, Produtos de consumo e Médica. Juntos correspondem a 76% do setor de manufatura global, gerando anualmente 9 trilhões de dólares. De acordo com pesquisadores, aproximadamente 23% a 40% de peças desses setores destacados serão fabricados por MA nos próximos 5 a 10 anos, representando um valor de 3 trilhões de dólares [49].

É perceptível que o surgimento de novas profissões se dará em locais onde a MA está sendo aplicada devido à migração de empregos. Desta forma, países cujo consumo

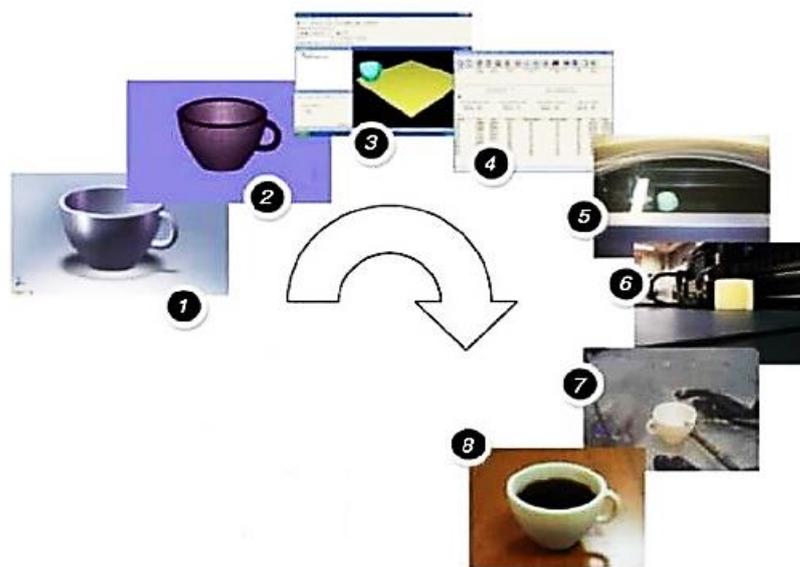
de produtos é destacado e possuem uma forte economia baseada nos setores de manufatura em geral, terão uma necessidade eminente em adotar a manufatura aditiva em prol da garantia da competitividade de mercado. Indiscutivelmente, a manufatura aditiva já se faz realidade em diversos setores. Porém, discute-se que chegou a hora de sua utilização ser provedora de uma mudança cultural esperada, cuja solução dos problemas se dará por qualquer criador.

2.3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Segundo Volpato (2017), define-se a manufatura aditiva como sendo um processo de fabricação, onde adiciona-se sucessivamente camadas de material, advindas de uma representação geométrica computacional, originado de um sistema CAD. O autor ressalta a permissividade em fabricar objetos a partir de vários tipos de materiais, com geometrias diversas por meio de diferentes técnicas de fabricação.

De acordo com os autores Gibson, Rosen e Stucker (2010), que possuem mais de 60 anos de experiência no campo da manufatura aditiva, o fluxo de fabricação da MA pode ser dividido em oito etapas, figura 21, descritas a seguir.

Figura 21: Etapas gerais do fluxo de fabricação MA.



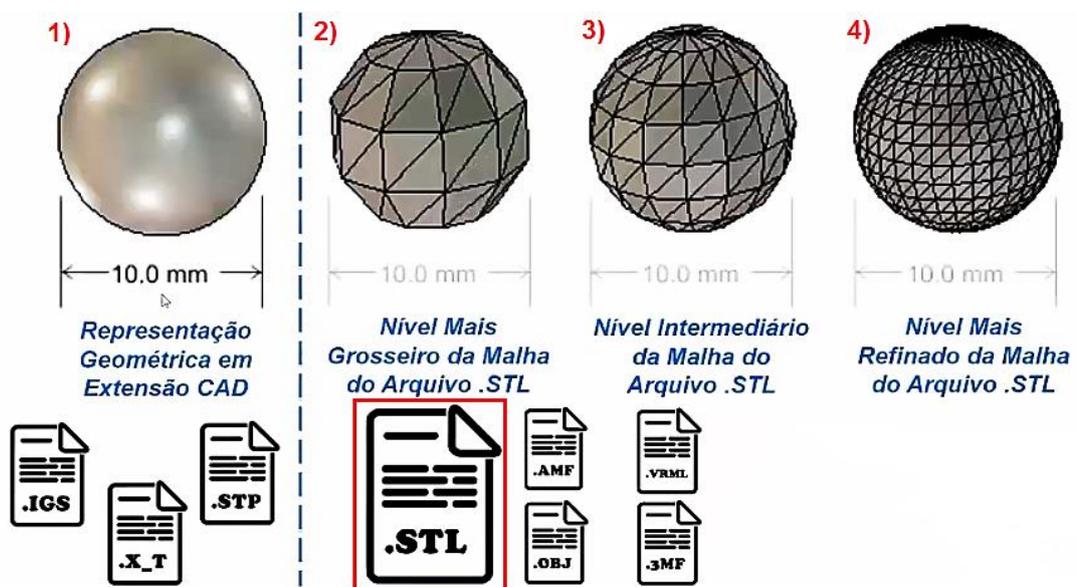
Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2010).

- **Criação de geometria:** a primeira etapa do processo consiste na elaboração de um modelo 3D. Desta forma, o objeto pode ser modelado via software CAD ou através

de um objeto real, por meio da digitalização via equipamentos específicos de engenharia reversa.

- **Conversão de arquivo:** obtém-se um arquivo geométrico de formato específico para a manufatura aditiva. Dentre os formatos existentes, praticamente todos os softwares CAD e equipamentos MA, conseguem produzir e aceitar o formato STL, respectivamente. Denominado atualmente como o padrão industrial, a figura 22 ilustra as diferentes configurações de resolução e como elas afetam o modelo pós conversão [51]. O arquivo STL caracteriza-se por utilizar elementos triangulares planares, figura 23 [52], cuja representação não é fidedigna do modelo CAD. Logo, se aumentarmos o número de faces, mais precisa será a discretização do elemento. Por consequência, exigirá uma maior capacidade de processamento e armazenamento (MA; LIN; CHUA, 2001).
- **Transferência para a máquina:** o arquivo STL contendo a geometria virtual do modelo, é verificado. Caso haja erros de geometria como superfícies abertas, furos deslocados por exemplo, faz-se necessário corrigi-los. Manipulações relacionadas à orientação e posição da peça, bem como definições de suportes e parâmetros podem ser necessárias. Posteriormente realiza-se o chamando fatiamento do modelo, obtendo-se as “curvas de nível” 2D que definem quais regiões terá o material depositado, através dos parâmetros numéricos de fabricação criados (VOLPATO, 2017). Por fim, os dados são transferidos para a máquina.

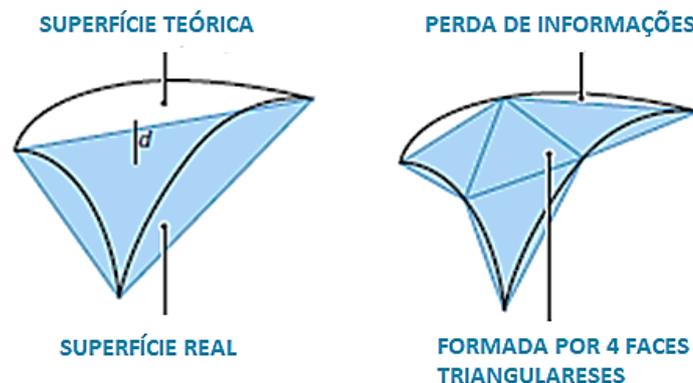
Figura 22: Manufatura digital.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes e Instituto Senai de Inovação.

- **Configuração de trabalho:** nesta etapa, define-se o processo e o material a ser utilizado. Cabe ressaltar que obter conhecimentos sobre técnicas de impressão e melhores práticas do sistema escolhido, geram maior confiabilidade do processo e norteiam questionamentos como capacidade do sistema, tamanho da peça, dissipação de calor, sistema de refrigeração, tipos de bico extrusor, dentre outros.
- **Fabricação:** a peça física é gerada através do “empilhamento” sequencial das camadas até finalizar a peça, por meio da adesão do material [3][50]. Para Zancul et al. (2017), o papel do operador nesta etapa consiste em prevenir eventuais problemas e garantir o suprimento de materiais, uma vez que o processo de fabricação ocorre de forma automatizada.
- **Remoção:** retira-se a peça da máquina.
- **Pós-processamento:** etapa estritamente relacionada ao processo de fabricação adotado. Dentre algumas atividades destaca-se: remoção de matéria prima não consolidada; remoção de estruturas de suportes ou material de apoio; tratamentos térmicos; acabamentos superficiais, dentre outros.
- **Aplicação:** peça encontra-se apta para utilização.

Figura 23: Elemento triangular planar.



Fonte: Adaptado de Tronco – USP São Carlos.

2.4 PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA

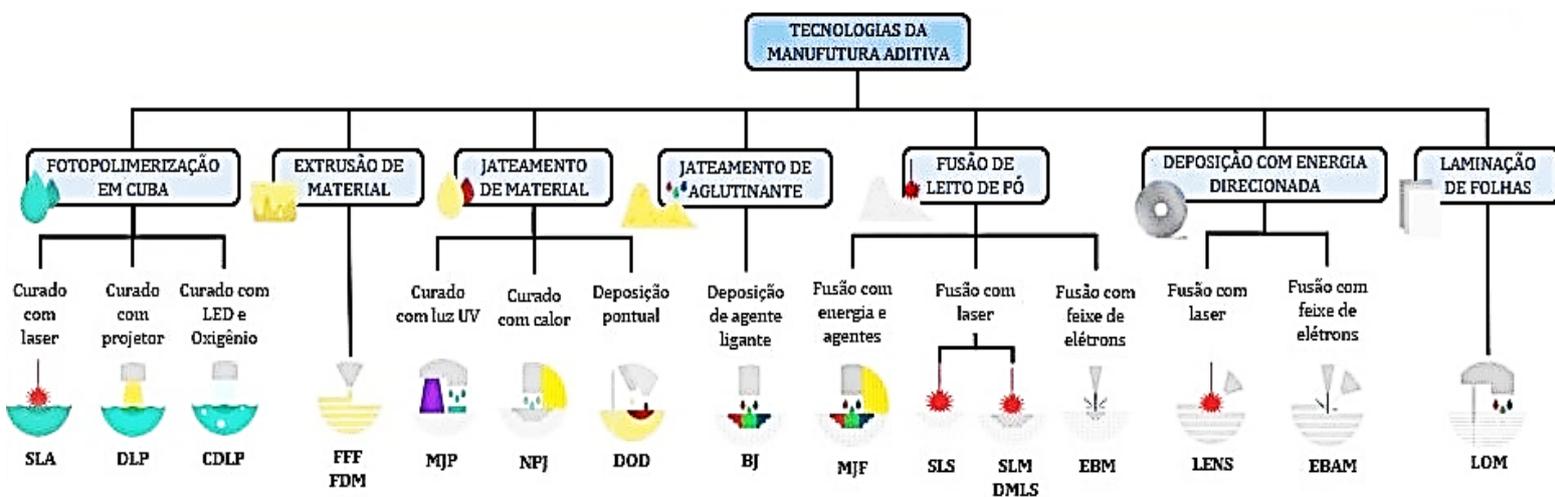
2.4.1 Classificação Geral

Diversos autores tem destacado a possibilidade vantajosa da manufatura aditiva em apoiar as diversas etapas da cadeia produtiva, devido sua variedade de sistemas existentes [55][56][57]. Por muitos anos, diversas técnicas e sistemas foram criados ou evoluíram,

onde os setores industriais não possuíam uma classificação correta das tecnologias existentes. Por conseguinte, a comunicação nos ambientes técnicos e não técnicos tornou-se contestável.

Em detrimento a diversos fatos, criou-se no ano de 2015 a norma ISO/ASTM 52900, que padronizou a classificação dos diferentes métodos MA em sete categorias, figura 24. Ressalta-se que os termos criados visam esclarecer quais tipos de máquinas possuem similaridades no processo de fabricação ao invés de explicitar uma extensa lista de variações comerciais de uma metodologia de processo [58].

Figura 24: Classificação das tecnologias MA.



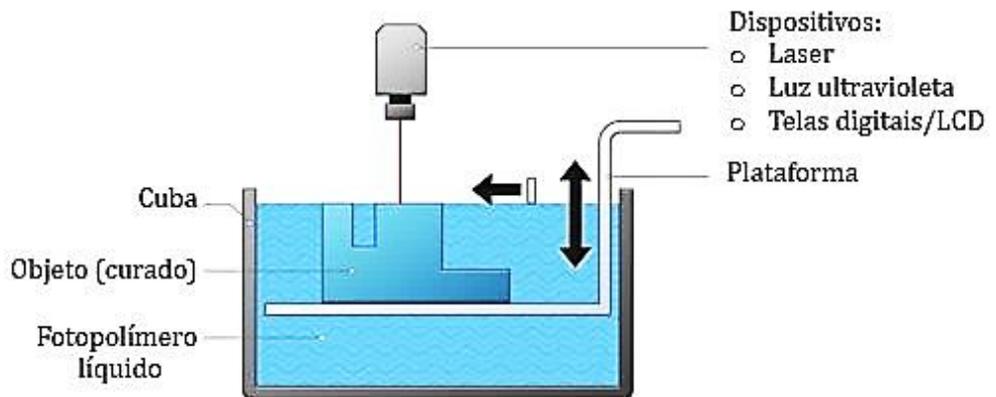
Fonte: Adaptado de 3D Hubs.

A seguir as sete categorias são apresentadas. Cabe salientar que o processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) terá um capítulo próprio, devido esta ser a técnica utilizada como objeto de estudo.

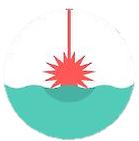
2.4.2 Fotopolimerização em cuba

Um polímero fotossensível líquido em cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz, cujo o comprimento de onda específico sobre o material, gera uma reação química em detrimento da solidificação [58], figura 25. Além disso, a figura 26 mostra algumas características relevantes do processo.

Figura 25: Fotopolimerização em cuba.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.



- **Estereolitografia (SLA):** considerada como técnica pioneira, baseia-se na utilização de uma plataforma de construção de movimentação vertical, sendo esta submersa em uma cuba preenchida com resina fotossensível. Primeiramente a plataforma é posicionada na altura de camada em relação a superfície da resina. Como auxílio de espelhos galvanométricos, um laser UV mapeia a área da secção transversal, criando-se a primeira camada. Após conclusão da primeira camada, a plataforma se move a uma distância segura e uma lâmina de varredura reveste a superfície. O processo então se repete até que a peça esteja completa. As peças são tipicamente pós-curadas por luz UV para melhorar suas propriedades mecânicas e térmicas.

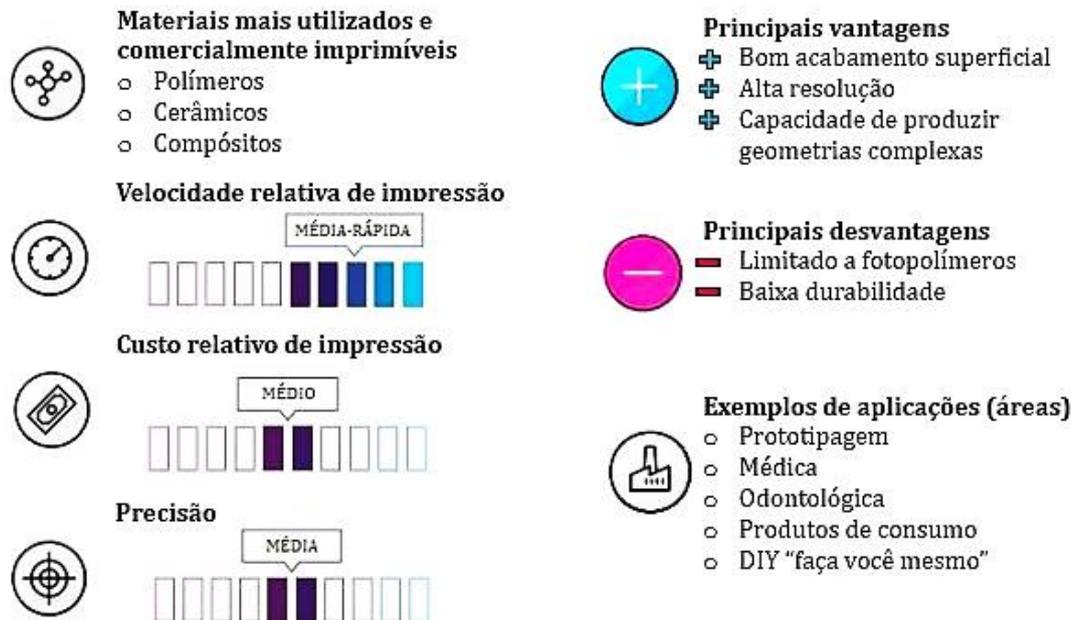


- **Processamento Digital de Luz (DLP):** método de fabricação idêntico ao SLA, diferindo-se na utilização de uma tela de projeção digital para mapear a área em uma única imagem. Como a imagem é composta por pixels, a camada será formada por voxels. Dependendo da geometria da peça, o sistema DLP consegue imprimir mais rápido, se comparado ao SLA.



- **Processamento Contínuo de Luz Digital (CDLP):** método idêntico ao DPL com relação a produção das peças. Porém, o movimento da placa de construção no sentido vertical é contínuo, permitindo uma melhora nos tempos de fabricação, uma vez que a máquina não precisa separar a peça da placa de construção camada a camada (modelo bottom-up).

Figura 26: Características da fotopolimerização.

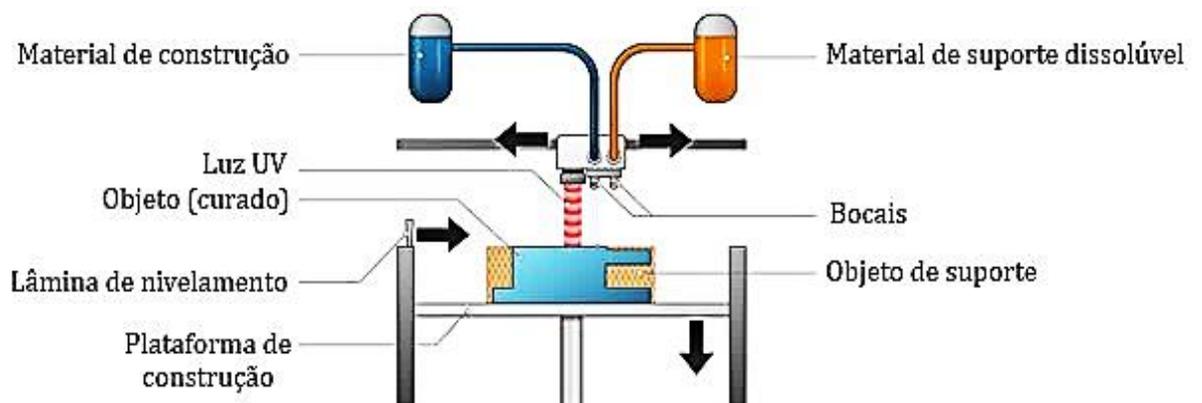


Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

2.4.3 Jateamento de material

Processo de fabricação onde pequenas gotas do material são depositadas de forma seletiva [58], figura 27. Permite a impressão de vários materiais e dependendo do objeto a ser fabricado, suportes solúveis são impressos durante a fase construtiva da peça. Frequentemente compara-se esta técnica ao processo de jateamento de tinta 2D. As características relevantes do processo são visualizadas na figura 28.

Figura 27: Jateamento de material.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.



- **Impressão por jateamento de material (MJP):** material é depositado por pequenos bocais de um cabeçote de maneira rápida se comparado à processos de deposição pontual, caracterizados por seguir um caminho de modo a completar a camada. As “gotículas” ao serem depositadas, são curadas e solidificadas por luz UV. Requerem suportes dissolúveis, removidos no pós-processamento.



- **Jateamento de nanopartículas (NJP):** composto de um líquido nanoparticulado de metal por exemplo, sendo depositado sobre a plataforma de construção em camadas extremamente finas. Devido as altas temperaturas dentro do “involucro” construtivo, tem-se que o liquido se evapora e o material metálico caracteriza a peça desejada.



- **“Gota sob demanda” (DOD):** semelhante as técnicas tradicionais, esta máquina segue um caminho pré-determinado, depositando o material de forma pontual. Possuem uma lâmina de nivelamento que percorre cada camada garantindo uma superfície plana. É utilizada para fabricação moldes, padrões de fundição por cera perdida, dentre outros.

Figura 28: Características do jateamento de material.

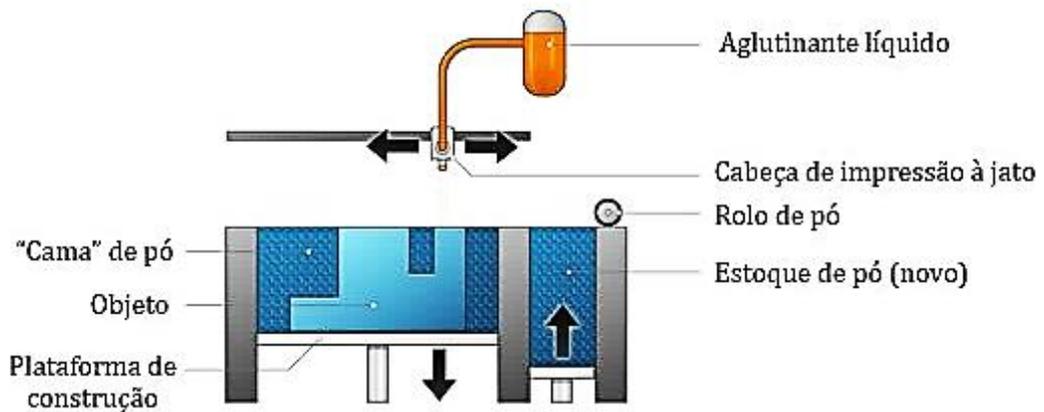


Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

2.4.4 Jateamento de aglutinante

Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó na construção das camadas [58], figura 29.

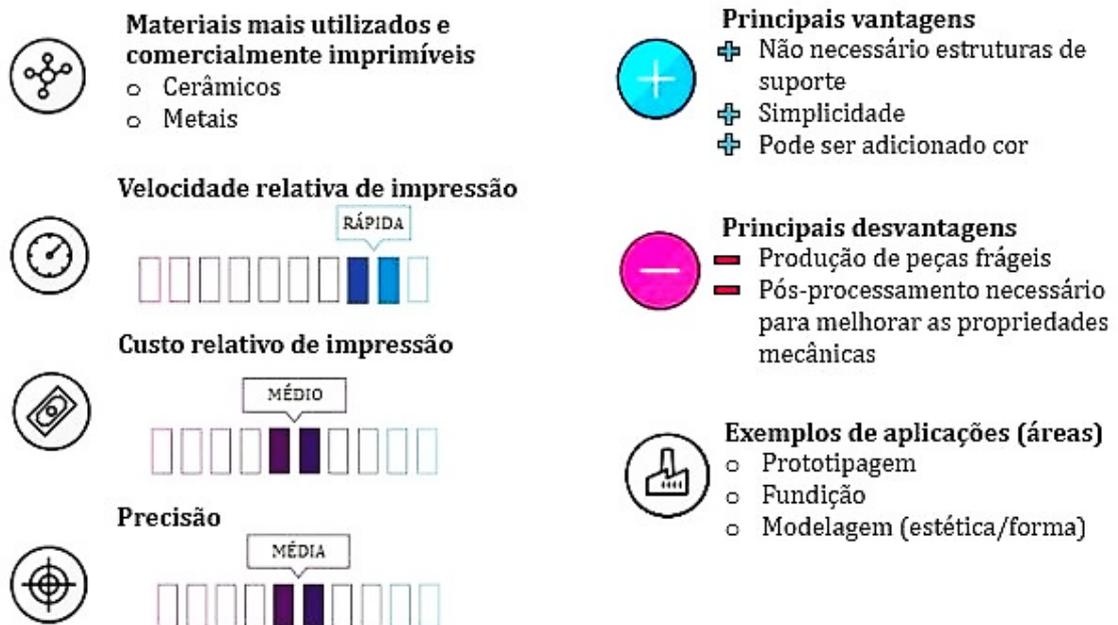
Figura 29: Jateamento de aglutinante.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.

- **Jateamento de aglutinante (BJ):** Os materiais em pó são a base de cerâmica ou metal. O cabeçote se move cartesianamente sobre a plataforma depositando as “gotículas” aglutinantes. Após conclusão de cada camada, a plataforma move-se para baixo e espalha-se material sobre a área. Após fabricação, as peças exigem pós-processamento adicional e em alguns casos adiciona-se outros aglutinantes visando melhores propriedades mecânicas. A figura 30 ressalta características relevantes do processo.

Figura 30: Características do jateamento de aglutinante.



Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

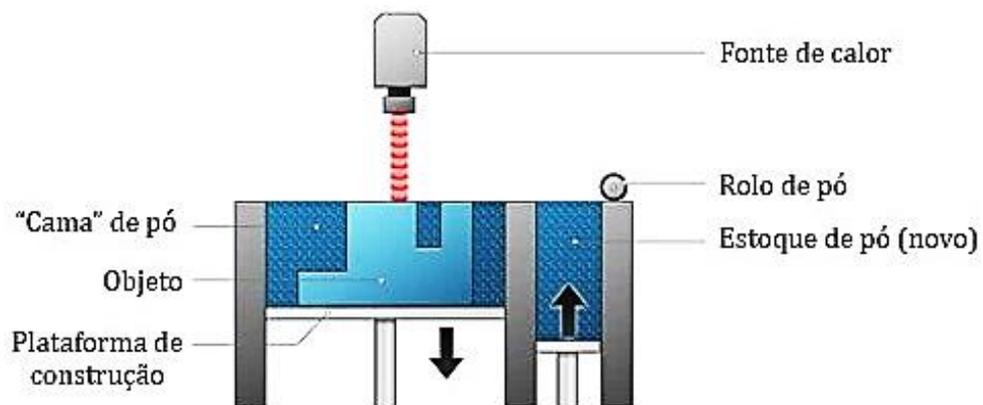
2.4.5 Fusão de leito de pó

A energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó [58], figura 31. Dentre as tecnologias pertencentes a esta categoria, maior parte possui mecanismos para espalhar o material. Cabe ressaltar que as principais variações encontradas nessas tecnologias são oriundas das diferentes fontes de energia e do material utilizado. Características gerais podem ser visualizadas na figura 32.

- **Sinterização seletiva a laser (SLS):** Produz peças plásticas ou metálicas por meio de um laser. Inicialmente espalha-se a primeira camada de pó sobre a plataforma, tal região é escaneada e sinterizada pelo laser, solidificando. A plataforma desloca-se de acordo com a espessura da camada requerida. O processo é repetido várias vezes até que o objeto sólido seja concretizado. Ao final, a peça encontra-se alojada em uma cama de pó não sinterizado. Após sua remoção da máquina e limpeza, pode-se utilizar ou realizar algum pós-processamento.



Figura 31: Fusão de leito de pó.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.

- **Fusão seletiva a laser (SLM) e Sinterização direta de metal a laser (DMLS):** ambos os processos são similares ao SLS, sendo que a principal aplicação no mercado se dá na fabricação de peças metálicas. O SLM apresenta como característica uma fusão completa do pó e pode utilizar materiais de uma única composição, como o alumínio por exemplo. Já o DMLS trabalha apenas com ligas do tipo níquel, titânio e outras, onde o material é aquecido até uma temperatura próxima de fusão para que haja interações químicas. Ambos os processos exigem estruturas de suporte, para compensar as altas tensões residuais geradas durante o processo de criação, limitando a probabilidade de deformações e distorções.



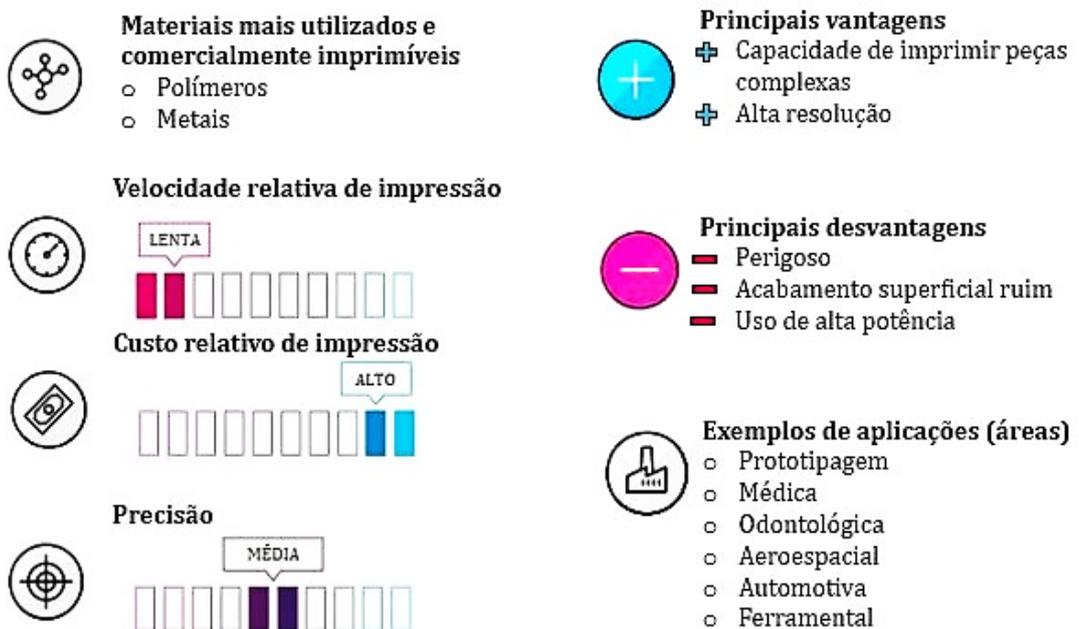


- **Fusão por feixe de elétrons (EBM):** utiliza um feixe de elétrons direcionado, de modo a varrer uma fina camada de pó, produzindo uma fusão localizada entre as partículas do pó metálico, solidificando-as. A vantagem em utilizar o feixe de elétrons se dá pela menor produção de tensões residuais nas peças, ocasionando menores deformações e distorções, reduzindo a necessidade de utilizar suportes. Cabe destacar que este processo consome menos energia, além de produzir em taxa de velocidades superiores aos processos SLM e DMLS. Entretanto, os tamanhos das partículas de pó, a espessura da camada e acabamento superficial possuem qualidade inferior.



- **Fusão de múltiplos jatos (MJF):** considerado uma combinação dos processos SLS e MJF. Primeiramente uma camada de pó é espalhada sobre a plataforma, aquecendo-a até a uma temperatura próxima à sinterização. Deposita-se um agente de fusão sobre o pó, por meio de bicos a jato de tinta e um “agente de detalhamento” que inibe a sinterização, próximo a borda da peça. Utiliza-se uma fonte de alta potência sobre o leito de construção, sinterizando apenas as áreas com o agente de fusão. Semelhante ao SLS, as peças impressas precisam esfriar antes de serem removidas.

Figura 32: Características da fusão de leito de pó.



Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

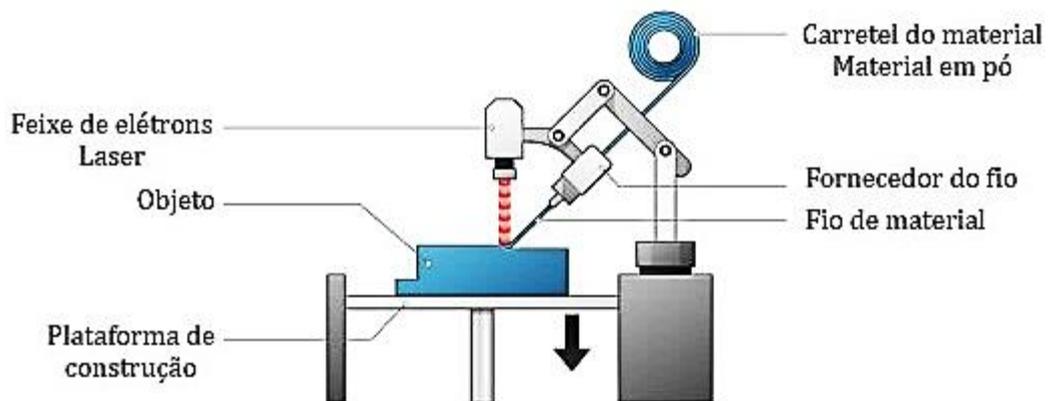
2.4.6 Deposição com energia direcionada

A energia térmica é usada para fundir materiais à medida que estes são depositados [58], figura 33. Predominantemente utiliza-se como material, pós metálicos ou fios de arames. Características relevantes do processo podem ser visualizadas na figura 34.

- **Forma final obtida com laser (LENS):** utiliza um cabeçote a laser, com bocais de distribuição de pó, além do uso de gás inerte. O laser cria uma poça de fusão sobre a área construtiva, sendo o pó “pulverizado” sobre a poça, derretendo-o e solidificando posteriormente. Tecnologia utilizada para reparos por exemplo.



Figura 33: Deposição com energia direcionada.

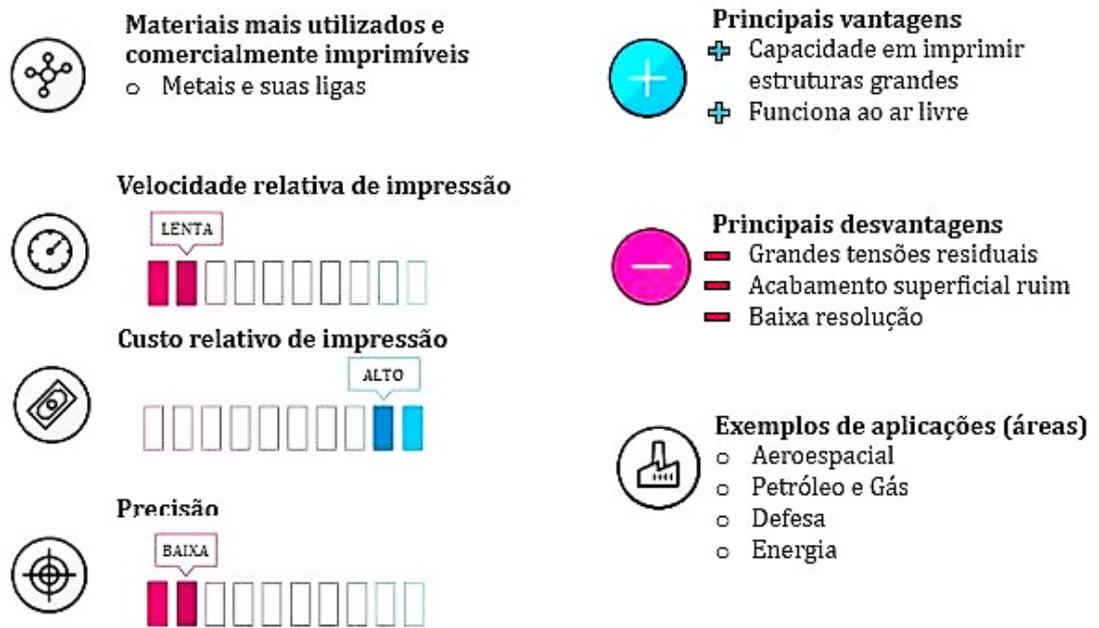


Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.

- **Fabricação aditiva por feixe de elétrons (EBAM):** utilizada para criação de peças metálicas, por meio de arames ou pós metálicos, através de um feixe de elétrons como fonte de calor. O processo de fabricação é semelhante ao LENS, porém o feixe de elétrons se comparados aos lasers são mais eficientes. Tecnologia projetada para utilização em ambientes que operam sob vácuo.



Figura 34: Características da deposição com energia direcionada.

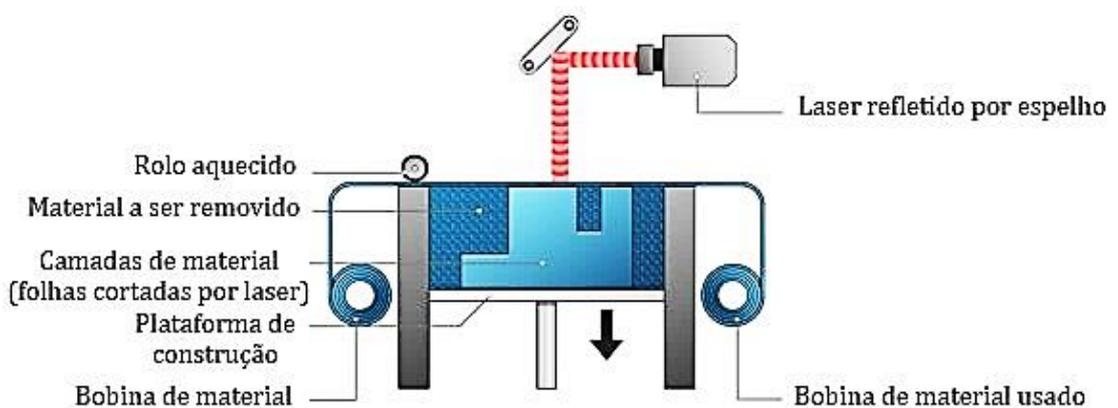


Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

2.4.7 Laminação de folhas

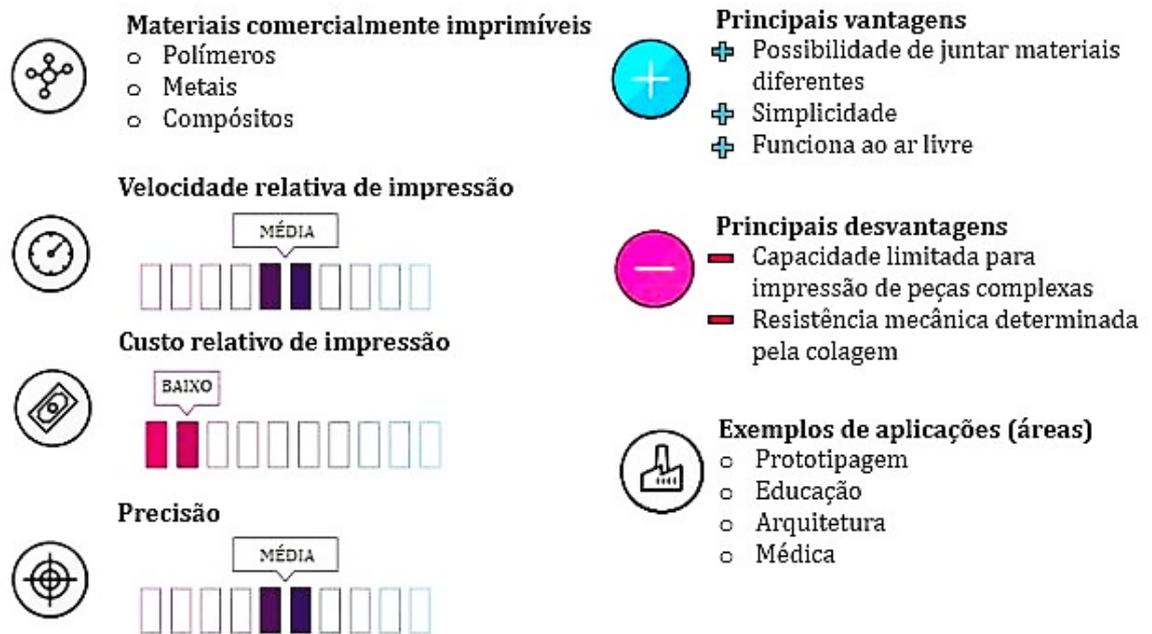
As lâminas recortadas são unidas “coladas” para formar um objeto [58], figura 35. A figura 36 mostra algumas características relevantes do processo.

Figura 35: Laminação de folhas.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.

Figura 36: Características da deposição com energia direcionada.



Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

- **Manufatura laminar de objetos (LOM):** inicialmente desenrola-se o material para que um rolo pré-aquecido comprima a lâmina depositada sobre a camada anterior, consolidando a “colagem”. Possui qualidade inferior ao processo SLA, porém custo semelhante. Geralmente aplica-se esta tecnologia na criação de moldes. Dentre alguns materiais disponíveis ressalta-se: polímeros, compósitos, folhas metálicas, dentre outras. Não necessita realizar processo de pós-cura, apenas tratamentos superficiais (lixamento por exemplo). O LOM apresenta alta velocidade construtiva, devido ao fato de o laser percorrer somente as bordas da superfície do objeto, ao invés de uma varredura completa. Não se recomenda a utilização desta técnica para peças, cujas geometrias apresentem características pequenas e de espessuras finas.

3. EXTRUSÃO DE MATERIAL

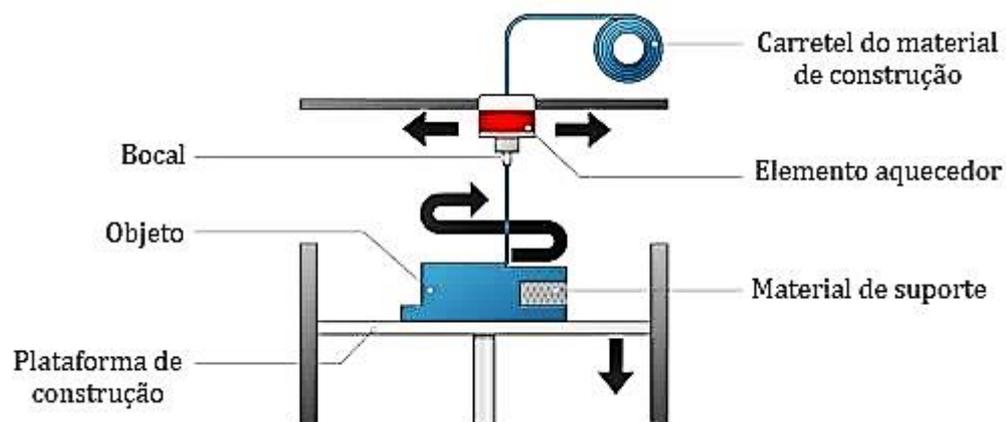
Processo de fabricação cujo material de construção é extrudado através de um “orifício”, sendo seletivamente depositado em um caminho pré-determinado [58], figura 37. Conforme figura 38, tem-se as características relevantes deste processo.



- **Modelagem por fusão e deposição (FDM):** conhecida também como fabricação por fusão de filamentos (FFF). Através de coordenadas de orientação espaciais, o material é aquecido e depositado por um bico extrusor que percorre o contorno da peça pretendida. Ao término de cada camada, a plataforma ou o cabeçote é deslocado na proporção de espessura da camada pretendida. Dependendo das características geométricas e de construção requeridas, outros filamentos são utilizados para construção de suportes.

Considerada a tecnologia MA mais difusa no mercado devido seu custo relativamente baixo, destaca-se a acessibilidade dos insumos para esta tecnologia. Se analisarmos os equipamentos FDM para o setor industrial, tem-se que para baixos volumes a MA mostra-se viável economicamente em substituir processos tradicionais, como por exemplo o processo de injeção.

Figura 37: Modelagem por fusão e deposição.



Fonte: Adaptado de Dassault Systèmes.

Prova deste questionamento foi que em meados do século XXI, os pesquisadores Hopkinson e Dickens, realizaram uma comparação entre os processos FDM, SLA e Injeção, por meio da produção de uma peça polimérica. A figura 39, mostra o resultado do estudo realizado.

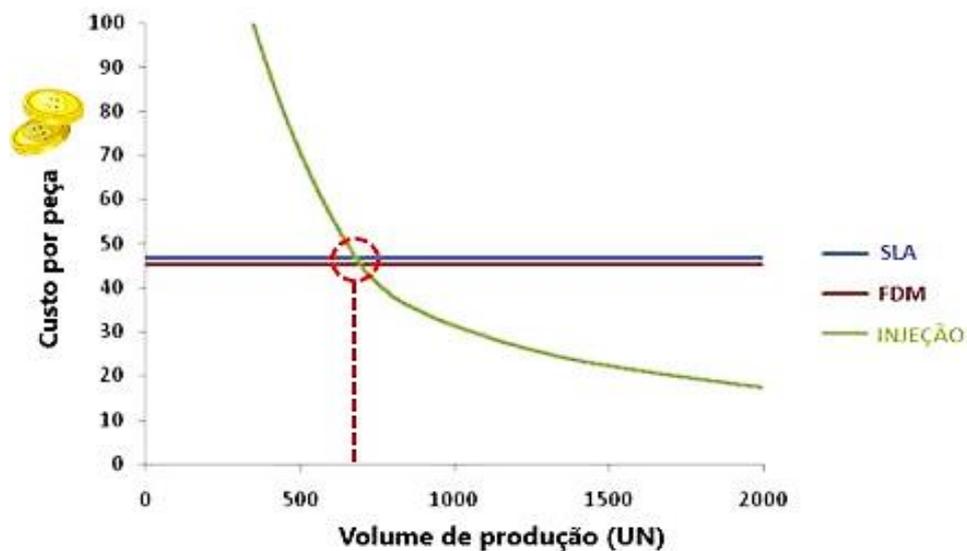
Figura 38: Características da deposição com energia direcionada.



Fonte: Adaptado de Wu, Myant e Weider (2017).

O gráfico mostra que para volumes de até 700 unidades, é viável a aplicação da MA. Já o processo de injeção possui um comportamento de maior eficiência com o aumento do volume, como já esperado. Além disso, toda peça injetada necessita de um molde para fabricação, custo este rateado pelas peças fabricadas. Em contrapartida, a MA possui uma vantagem pois adiciona-se apenas o custo do material por peça.

Figura 39: Comparação do custo x volume.

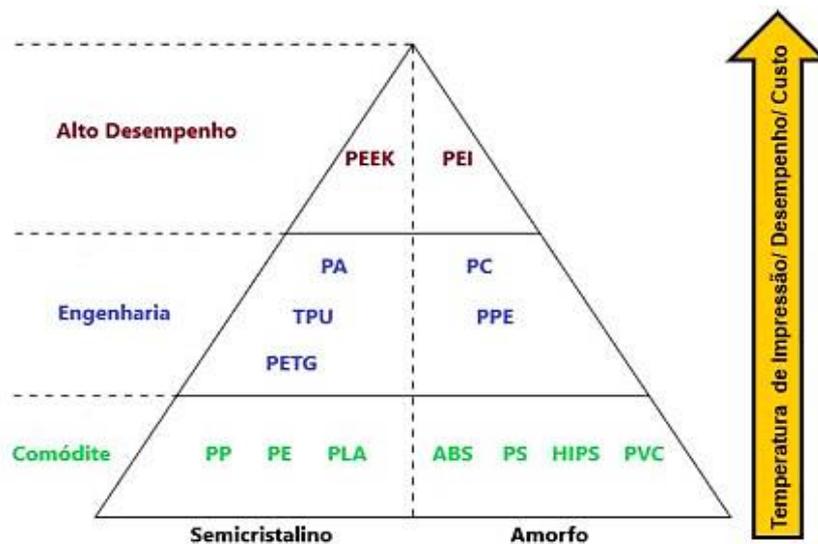


Fonte: Adaptado de Hopkinson e Dickens (2003).

3.1 Filamento

Um dos pontos fortes do processo FDM se dá pela ampla gama de materiais disponíveis. Geralmente são classificados em 3 grupos: comódite, engenharia e alto desempenho, vide figura 40. As propriedades mecânicas são melhores no sentido ascendente da pirâmide. Dentre estes materiais apresentados, os mais comuns são o PLA e ABS.

Figura 40: Pirâmide de materiais termoplásticos FDM.



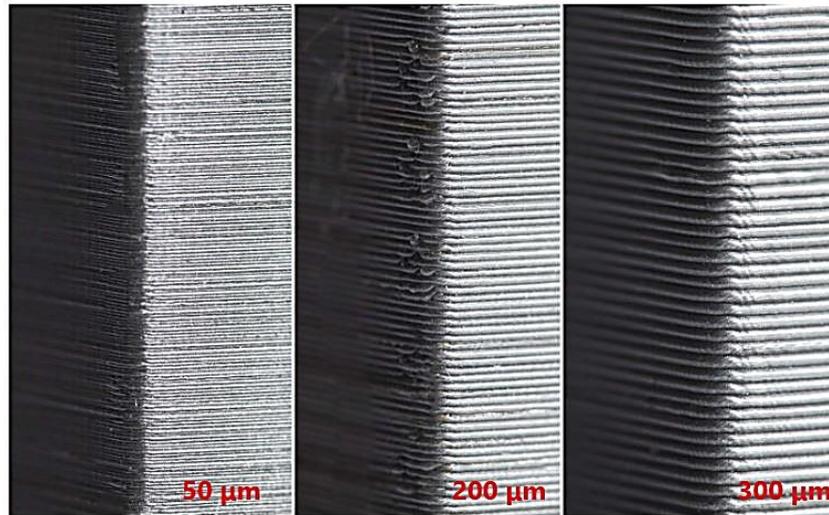
Fonte: Adaptado de 3D Hubs.

3.2 Parâmetros gerais de fabricação

A maioria das máquinas FDM permite o ajuste de diferentes parâmetros com o objetivo de melhorar a qualidade e acelerar o tempo de fabricação. Logo, as parametrizações determinam em que condições o software CAM definirá a trajetória a ser percorrida. Dentre alguns parâmetros importantes, tem-se:

- **Altura da camada:** notavelmente é a configuração mais conhecida, pois altera de maneira significativa a qualidade, aparência e resistência da peça, ou seja, ela determina a resolução da impressão. Quanto menor a camada, mais “lisa” será a superfície, em contrapartida o tempo total de impressão será maior. Segundo bibliografias a altura típica da camada encontrada geralmente varia de 50 a 400 μm , sendo mais comum utilizar 200 μm , vide figura 41 [63].

Figura 41: Visualização macro da altura da camada.



Fonte: Adaptado de 3D Hubs.

- **Perímetros:** parâmetro relacionado ao “contorno” das geometrias. Geralmente recomenda-se utilizar uma quantidade que dê uma margem de segurança para casos onde ocorra erros na impressão.
- **Camadas sólidas:** número de camadas a ser considerada na construção da superfície inferior e superior para que não haja camadas insuficientes, figura 42.

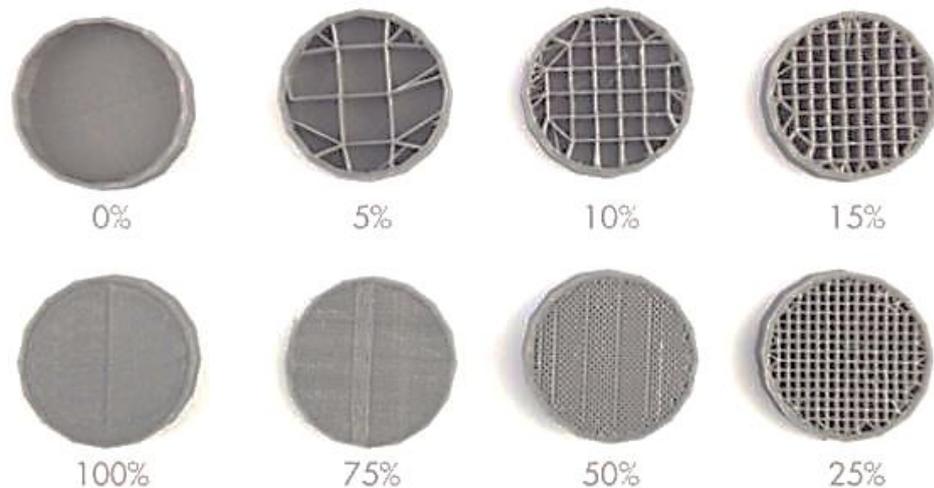
Figura 42: Camada superiores insuficientes.



Fonte: Manual Slic3r.

- **Densidade de preenchimento:** os modelos impressos na maioria dos casos não são totalmente sólidos, evitando desperdício e diminuindo o tempo de impressão. Em muitos casos, o *slicer* gera preenchimentos na ordem de 40% do volume a ser preenchida, para dar uma boa resistência mecânica, vide figura 43.

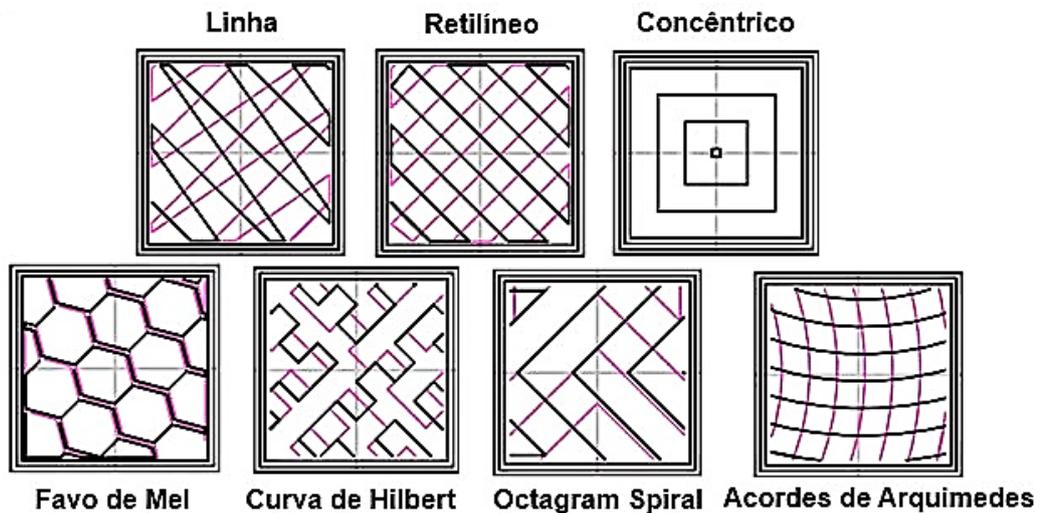
Figura 43: Porcentagens de preenchimento.



Fonte: Guia Medium.

- **Padrões de Preenchimento:** existem diferentes tipos de padrões para o preenchimento interno do volume, figura 44. Este parâmetro afeta diferentemente no tempo e resistência mecânica da peça.

Figura 44: Padrões de preenchimento.



Fonte: Adaptado de Manual Slic3r.

- **Velocidade de construção:** parâmetro responsável por configurar a velocidade de deslocamento do cabeçote extrusor, caracterizado em dois tipos de movimentos. O movimento de impressão pode ser configurado em diferentes velocidades (mm/s ou %) para determinadas características geométricas, por exemplo. Já o movimento de

não impressão, comumente conhecido como o de “viagem do cabeçote” deve ser configurado pela máxima velocidade da impressora, afim de minimizar problemas de vazamento de material do bocal sobre a peça, ou seja, são linhas, ou fios soltos no meio da impressão chamadas de strings. Para isso, deve-se parametrizar a configuração de retract.

- **Configurações de filamento:** geralmente os dados relevantes são o diâmetro do material e a temperatura do bico extrusor e plataforma de construção.
- **Configurações da máquina:** existem diferentes tipos de sistemas FDM, desde desktops até máquinas industriais. Dentre algumas configurações diversas, tem-se: tipo de bico utilizado, dimensões da área construtiva, configurações e referenciamentos de coordenadas, arrefecimento, dentre outros.

4. EXATIDÃO DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva como já descrito anteriormente, conquistou com o passar dos anos, uma significativa evolução devido aos avanços tecnológicos, migrando-se de um cenário de prototipagem de modelos que não exigiam uma precisão dimensional relevante para um novo cenário, cujas aplicações requerem que os processos MA utilizados, possuam exatidão suficiente para atender aos requisitos e funcionalidade, se comparados ao métodos tradicionais de usinagem, injeção e fundição. Porém, como qualquer processo de fabricação existente, a manufatura aditiva também possui suas limitações, sendo estas responsáveis por produzir os erros geométricos nas peças fabricadas. Desta forma, este capítulo tem por objetivo explanar alguns fatores que contribuem para os erros dimensionais e geométricos.

4.1 CAUSAS GERAIS DE ERROS GEOMÉTRICOS EM PEÇAS

Toda peça física ao ser fabricada, está sujeita a diversos tipos de defeitos, sejam estes menores sendo compensados ou maiores, cuja funcionalidade não pode ser atendida. Por consequência perde-se o tempo investido na fabricação, bem como o material utilizado (BAUMANN; ROLLER, 2016). Os fatores decorrentes de cada fase, descritas anteriormente por Gibson, podem ou não inserir desvios geométricos no produto final. Logo, o controle da precisão geométrica continua sendo um enorme gargalo para a aplicação da manufatura aditiva (ZHU et al., 2017). Dentre alguns erros, ressalta-se:

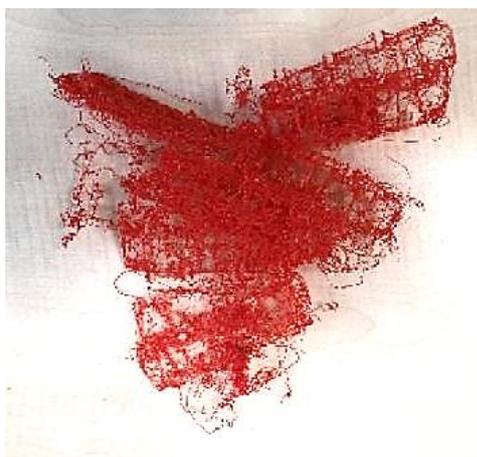
4.1.1 Deposição de matéria-prima

Segundo Armillota (2006), existem fatores que influenciam diretamente o processo de deposição do filamento. Por exemplo, a taxa de deposição, que não deve ultrapassar o limite mecânico do cabeçote extrusor (diâmetro do bico). Além disso, geometrias de aspecto deformado ou derretido são decorrentes da deposição, influenciadas pelo superaquecimento do bico extrusor.

4.1.2 Falta de adesão à plataforma de construção

O desalinhado da plataforma de construção ou sua falta de regulagem, pode influenciar diretamente na má adesão da primeira camada sobre a plataforma, bem como a aderência entre as camadas, figura 45 [69]. A falta de adesão da primeira camada acaba gerando o chamado *warping*, casualmente conhecido por empenamento, sendo este um dos defeitos mais comuns no processo FDM, figura 46.

Figura 45: Problema de adesão.



Fonte: Gunaydin e Türkmen (2018).

O empenamento da peça ocorre devido ao resfriamento nas diferentes seções do material, cujas taxas de arrefecimento se diferem. Logo, as dimensões também diminuem em velocidade distintas e, por consequência, tem-se um acúmulo de tensões internas que ocasionam distorções, figura 46.

Figura 46: Fenômeno de empenamento.



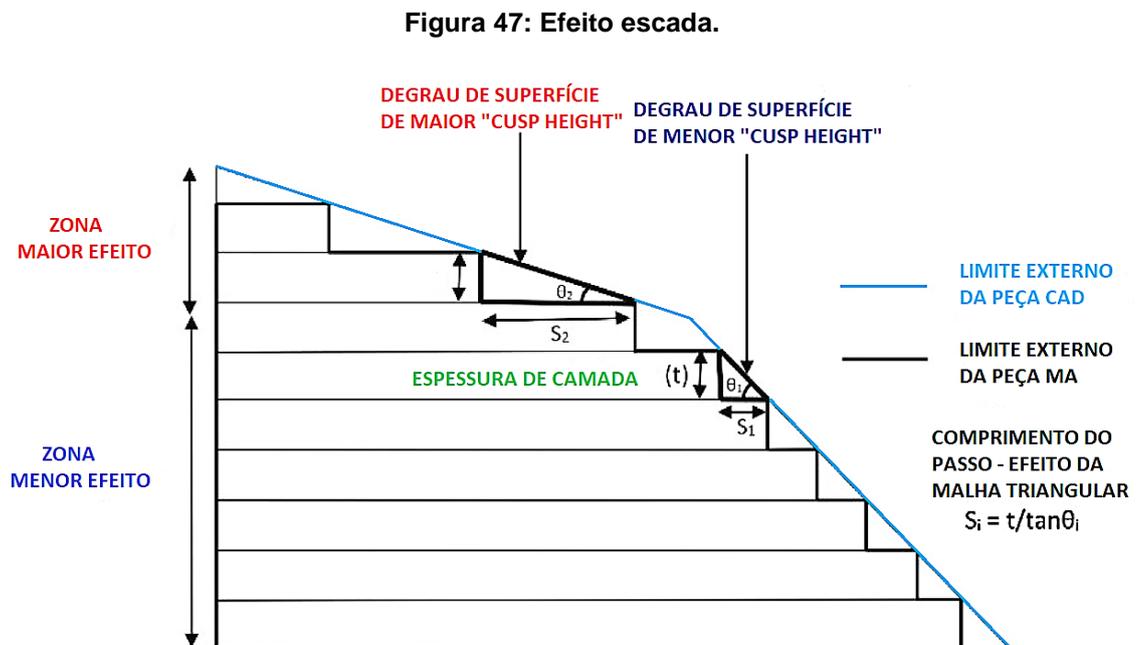
Fonte: Song e Telenko (2016).

Busca-se, como boas práticas, monitorar com eficiência a temperatura da plataforma e câmara; adicionar textura ou cola para melhorar aderência, além de respeitar uma

distância ideal entre bico extrusor e plataforma. Geralmente, o material ABS é mais suscetível ao fenômeno de *warping* do que os materiais PLA e PETG [63].

4.1.3 Efeito escada e erro de corda

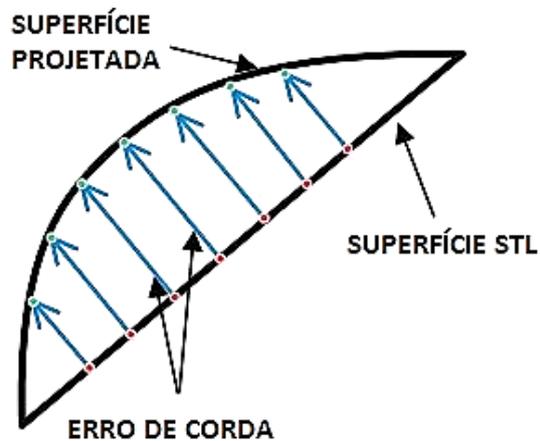
Dentre as tecnologias MA existentes e seus respectivos parâmetros, sabe-se que a espessura do material é um fator comum encontrado em todos os processos e que afeta diretamente em um fenômeno onipresente associado ao processo de manufatura aditiva, o chamado *staircase* ou efeito escada, cuja descontinuidade do material entre as camadas mostra-se visível sob a superfície da peça (WENBIN; TSUI; HAIQING, 2005). Tal desvio geométrico está relacionado ao processo de fatiamento do arquivo STL na construção layer-by-layer, figura 47.



Fonte: Adaptado de Taufik e Jain (2017).

Conforme explanado anteriormente a manufatura aditiva não funciona como uma representação geométrica exata do modelo CAD, tendo-se uma aproximação da superfície projetada via tradução para STL. Por conseguinte, essa distância euclidiana entre a seção de arco ideal e a faceta triangular gera o *chordal error* ou erro de corda, vide figura 48.

Figura 48: Erro de corda.

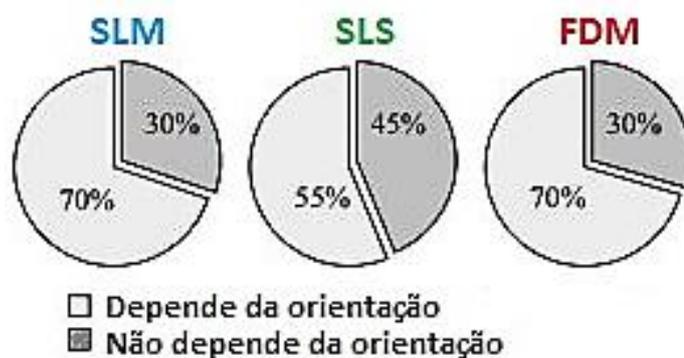


Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2017).

4.1.4 Orientação de construção

Geralmente, descreve-se a orientação da peça como sendo a rotação do objeto em relação ao sistema de coordenadas da máquina. Estudos mostram que a orientação impacta de forma significativa na geometria da peça final. Logo, tal importância refletiu-se em diversos desenvolvimentos, dentre eles ressalta-se a criação de aproximadamente 55 regras que visam auxiliar projetos de manufatura aditiva em processos do tipo SLS, SLM e FDM apud Lieneke et al. (2015). Segundo Leutenecker-Twelsiek, Klahn e Meboldt (2016), o processo de SLS mostrou uma dependência de 55% da orientação da peça, enquanto nos processos SLM e FDM a porcentagem aumenta para 70%, figura 49.

Figura 49: Resultados de análise em relação a dependência de orientação.



Fonte: Adaptado de Leutenecker-Twelsiek, Klahn e Meboldt (2016).

Para Danjou (2010), define-se a orientação da peça com base em diferentes recursos relacionados à qualidade, sendo eles: qualidade superficial, precisão dimensional e geométrica, custos e tempo de fabricação, empenamento, estabilidade, volume de suporte, utilização do espaço de fabricação, efeito pós-processamento e acesso as estruturas de suporte. Com o objetivo de visualizar o impacto referente a orientação tem-se a figura 50, cujas peças apresentam mesma funcionalidade.

Figura 50: Impacto da orientação.



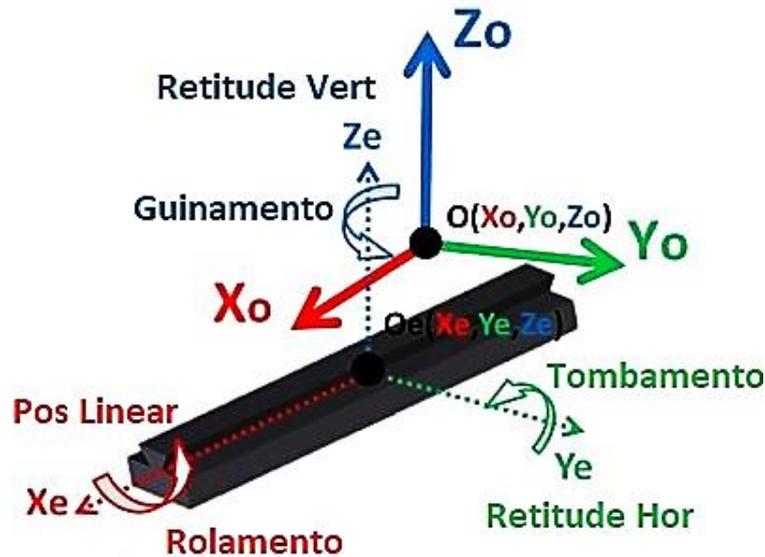
Fonte: Leutenecker-Twelsiek, Klahn e Meboldt (2016).

4.1.5 Erros geométricos de máquinas

Independentemente do tipo de equipamento MA, seja desktop ou industrial, sabe-se que mesmo utilizando sistemas CNC simplistas ou complexos, tem-se que a existência de fatores perturbadores geram alterações indesejáveis ao comportamento geométrico da máquina, resultando em erros de posição e trajetória, que consequentemente reflete-se na geometria da peça (SOUSA, 2000). O modelo cinemático descrito por Srivastava (apud KEAVENEY; CONNOLLY; O'CEARBHAILL, 2018), assume que cada eixo de movimentação linear de uma máquina possui 6 erros geométricos, vide figura 51.

Se analisarmos a natureza do processo MA, questões como precisão e exatidão dimensional são fundamentais para o processo em camadas. Logo, quaisquer erros podem ocasionar um impacto na funcionalidade do produto. Comparando-se ao processo convencional de usinagem, a MA possui vantagem pois apresenta baixas cargas mecânicas e por consequência a criticidade no quesito *rigidez finita* é baixo [77]. Logo, abre-se uma lacuna para pesquisas e desenvolvimentos de equipamentos MA de múltiplos eixos.

Figura 51: Erros geométricos para eixo de movimentação.



Fonte: Adaptado de Keaveney, Connolly, O'cearbhaill (2018).

4.2 DESENVOLVIMENTOS RECENTES NA EXATIDÃO DE PROCESSOS MA

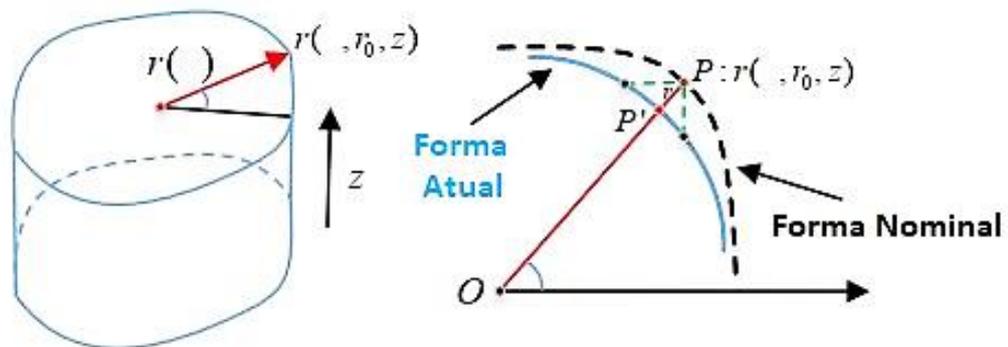
Nos últimos anos, estudos demonstram que diversos pesquisadores tem direcionado novas propostas de modelos e abordagens voltadas para avaliação de fontes de erros gerais e específicas de processos MA, objetivando-se o modelamento de desvios de forma e melhorias relacionadas a precisão geométrica [67]. Cabe ressaltar que este tópico possui apenas caráter exploratório devido a quantidade de assuntos e processos MA existentes. Desta forma, o subtópico abaixo visa aproximar o leitor de forma superficial, a um tema de grande relevância, uma vez que o processo FDM objeto deste estudo é destacado.

4.2.1 Compensação de desvios de forma

Geralmente, os modelos de compensação são enquadrados sob duas perspectivas, os relacionados aos erros de máquina e outros as deformações induzidas pelo processamento. Estudos desta magnitude estão sendo desenvolvidos por diversos pesquisadores, como por exemplo Song et al. (2014), que visam estabelecer um modelo genérico preditivo, capaz de aprender informações de desvios geométricos por meio de um número determinado de peças, independentemente da geometria.

Testes foram realizados com o processo FDM, adotando inicialmente o método de Kriging para modelar os desvios de forma característicos do processo, como por exemplo os erros de posicionamento do cabeçote extrusor. Com base nos resultados, faz-se uma previsão dos desvios, utilizando primeiramente o sistema de coordenadas polares a fim de representar a forma da peça, já suas deformações são oriundas de uma função paramétrica que mostra a diferença entre as formas nominal e atual, figura 52. Logo, com base na distribuição estatística, cria-se planos de compensação do erro dimensional para a peça final [67].

Figura 52: Modelo de contração no sistema de coordenada polar.



Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2017).

4.3 MANUFATURA ADITIVA NA PRODUÇÃO DE PEÇAS DIVERSAS

4.3.1 TIPOS DE APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA

Desde o surgimento da manufatura aditiva, pesquisadores caracterizavam esta tecnologia pela chamada prototipagem rápida, devido à sua principal aplicação [79]. Conforme explanado anteriormente, sabe-se que os custos da MA se comparados aos processos convencionais, são inferiores em relação à produção de pequenos lotes de peças. Esta vantagem econômica tem permitido que protótipos e mock-ups tenham mais espaço e representatividade na cadeia produtiva, devido a sua flexibilidade de alteração e agilidade de produção. A prototipagem rápida permite que os ciclos de desenvolvimento de novos produtos sejam mais eficientes, no entorno de 50 a 90% de redução de custos e de

80 a 95% de redução de lead time [80]. Logo, é possível analisar o impacto do produto mediante aos consumidores, bem como o planejamento do processo produtivo.

- ***Ferramental (Rapid Tooling): Case 1***

Os sistemas FDM, por serem economicamente mais viáveis na produção de protótipos, tem ganhado destaque em muitas empresas na produção de gabaritos, ferramentais, adaptações, dentre outros. Empresas como Lockheed Martin, têm investido capital em tecnologias digitais inovadoras como a manufatura aditiva, visando melhorias de seus produtos e processos. A figura 53, representa alguns mock-ups utilizados em testes e ajustes de componentes do setor aeroespacial.

Figura 53: Mock-ups e testes.



Fonte: PADT (2016).

- ***Ferramental (Rapid Tooling): Case 2***

Em solo nacional temos a empresa General Electric Aviation Celma, situada em Petrópolis/RJ, sendo esta considerada a maior empresa de revisão e manutenção de motores aeronáuticos na América Latina. Afirma-se que a unidade é capaz de revisar um motor em até 65 dias, desde a chegada até a devolução para o cliente [81]. Desde de 2015, a GE Celma tem utilizado a MA de maneira indireta através de dispositivos para mascaramento, jateamento, pintura, aplicação de lubrificantes, gabaritos e ferramentais de geometrias complexas, visando uma maior versatilidade nas revisões e manutenções dos motores aeronáuticos, figura 54. Diversas aplicações utilizam materiais de alta engenharia como ULTEM 9085, ULTEM 1010 e Nylon 12CF.

Figura 54: Cases de sucesso.



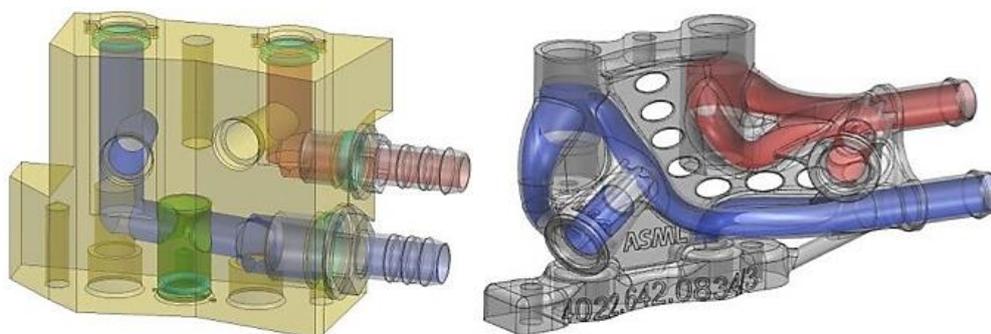
Fonte: GE Celma.

- ***Liberdade projeto (Design Freedom):***

Criar geometrias complexas com praticamente poucas restrições pode fornecer uma variedade de benefícios de acordo com a aplicação, como por exemplo, a criação de recurso internos, como dutos de arrefecimento e canais de fluxo otimizados. A figura 55, mostra uma peça de distribuição de água projetada com canais perpendiculares de material PEEK e uma nova versão otimizada impressa em titânio. Tal aplicação, obteve uma melhoria de vibração no entorno de 90%, devido a turbulência do fluxo existente.

A otimização topológica é uma área de grande destaque na manufatura aditiva e que permite reduzir os custos de materiais por meio de uma abordagem numérica que identifica a funcionalidade do componente. Para isso, retira-se o material de regiões de pouca solicitação, reorganizando a estrutura da peça em relação a regiões de maior carga aplicada, solicitação, rigidez, dentre outros.

Figura 55: Canais de fluxo otimizados.



Fonte: Thompson et al. (2016).

Geralmente encontra-se projetos de otimização topológica em setores como os automotivos e aeroespaciais, devido o fator *peso* ser de grande relevância para a economia e vida útil do produto. A figura 56, mostra algumas aplicações de suportes otimizados topologicamente pela Airbus, utilizando titânio e aço inoxidável impressos.

Figura 56: Otimização topológica de suportes.



Fonte: Adaptado de PADT e Thompson et al. (2016).

- ***Peças funcionais acabadas: Case 1***

Com a curva em crescimento ascendente da manufatura aditiva, muitas empresas tem buscado novos know-how, objetivando aproximar os processos produtivos industriais a esta tecnologia disruptiva. O efeito desta busca incessante, mostra que a produção de produtos mais resistentes, de melhor performance e melhor qualidade, já está sendo empregado em diversos setores, sobretudo os de maior valor agregado.

Neste campo, a empresa General Electric também chama a atenção por ser considerada uma das precursoras em utilizar a MA na produção em massa. Desde 2015 uma nova geração de injetores de combustível para a turbina aeronáutica LEAP™ [83] estão sendo impressas em MA. Cada motor possui 19 bicos injetores, figura 57, cuja geometria não seria possível pelos métodos convencionais. A empresa afirma, que a otimização possibilitou reduzir 1/4 do peso do componente anterior e deixar cinco vezes mais durável [84]. Se comparado as versões anteriores, os motores LEAP são 15% mais econômicos e atendem empresas como Airbus e Boeing.

Figura 57: Injetor de combustível LEAP.



Fonte: General Electric.

○ **Peças funcionais acabadas: Case 2**

Desde 2012 a empresa BMW começou a imprimir componentes finais em série por meio da manufatura aditiva, porém sua utilização é aplicada a aproximadamente 25 anos, iniciando-se pela prototipagem rápida, figura 58. Hoje, a empresa vem incorporando milhares de peças em modelos como o Rolls-Royce Phantom e espera expandir a aplicação da MA para toda a sua gama de veículos, devido principalmente a redução no tempo de produção de componentes com geometrias complexas [85].

Figura 58: Componentes impressos para o Rolls-Royce Phantom.



Fonte: BMW.

- **Peças funcionais acabadas: Case 3**

No setor de bens de consumo a empresa Adidas, tem-se se destacado desde 2016 com o lançamento de uma edição limitada chamada “3D Runner”, figura 59. Foi a precursora em fabricar um modelo de calçado em impressão 3D, mudando de forma radical este setor de consumo. Este modelo, trouxe desde a utilização de materiais biodegradáveis até recursos visando alto desempenho. Além disso, a manufatura aditiva possibilitará em um futuro próximo a capacidade de produzir produtos personalizados ao cliente, como calçados

Figura 59: Modelo de calçado adidas.

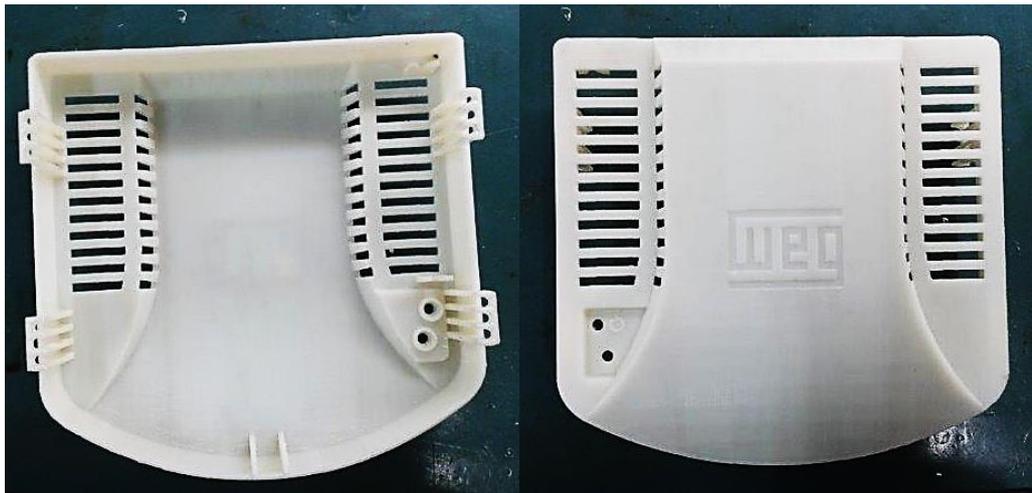


Fonte: Adidas Hypebeast (2016).

- **WEG Automação – Critical Power:**

A empresa WEG automação, possui alguns setores como o Critical Power, que utiliza a manufatura aditiva na concepção de mock-ups. Dentre uma gama de produtos WCP, os estabilizadores Power System utilizam a tecnologia SLS, figura 60, nas etapas iniciais do projeto, com o objetivo de avaliar o design do produto, realizar testes de funcionalidade de encaixes de componentes, averiguar questões de arrefecimento e sobretudo analisar possíveis alterações dos moldes de injeção, processo este utilizado para a concepção final do produto, figura 61.

Figura 60: Power System – SLS.



Fonte: Autoria própria.

Figura 61: Power System – Produto.



Fonte: WEG [88].

5. NORMAS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE PROCESSOS MA

5.1 COMITÊS NO ÂMBITO DA MA

Conforme destacado anteriormente, a Sociedade Americana de Teste e Materiais (ASTM) - F42, juntamente com a Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) Y14 e a Organização Internacional de Padronização (ISO) - TC/261, tem unido esforços para padronizar os processos de Manufatura Aditiva. Esses comitês são divididos em subcomitês responsáveis por abordar segmentos específicos dentro da área de assunto geral, sob o escopo do comitê técnico. Cabe ressaltar que no Brasil, a instituição normalizadora ABNT, possui duas comissões voltadas a manufatura aditiva, sendo elas:

- ABNT/CE-026.070.015 – Comissão de Estudo de Implantes para Cirurgia.
 - Norma ABNT 16627 (8 partes): Implantes para cirurgia e projetos de implantes fabricados em MA.
- ABNT/CEE-216 – Comissão de Estudo Especial de Manufatura Aditiva.
 - Espelho da ISO/TC 261 – Additive Manufacturing.

Segundo Bikas, Stavropoulos e Chryssolouris (2016), o principal fator que acarreta na baixa produtividade e qualidade de peças finais em MA por exemplo, são advindas de aspectos relacionados a não padronização dos processos de fabricação. Desta forma, a criação de normas faz-se necessária pois possuem elementos fundamentais para que indústrias e centros de pesquisas, possam se desenvolver no âmbito MA. Logo, para que um determinado produto possua requisitos de qualidade aceitos, seus parâmetros descritivos devem estar em conformidade à normas estabelecidas, bem como mecanismos que qualifiquem e certifiquem os procedimentos adotados, visando com que o produto final possua a qualidade exigida.

Para que a MA possa ser “aceita” de forma concreta em áreas altamente regulamentadas, como setores médicos e aeroespaciais, faz-se necessário a criação de controle e monitoramento de processos robustos, afim de garantir a qualidade do produto, através da redução de variações [90], cuja padronização é crucial. A figura 62, mostra em termos de porcentagem as normas que se encontram em desenvolvimento, onde 55% representa: projetos, fabricação e materiais. Já os 24% e 21%, representam respectivamente, procedimentos de teste e qualificação/certificação.

Segundo Rodríguez et al. (2018), relacionando-se aos tipos de tecnologia AM, tem-se que 50% das novas normas está voltada para fusão de leito de pó (PBF), 33% relacionadas a fabricação a base de extrusão (EBAM) e 17% à processos por deposição de energia (DED).

Figura 62: Normas em Desenvolvimento.



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2018).

Certamente a falta de normas acabam criando desafios para os “meios” que desejam utilizá-la, principalmente na comparação de processos, máquinas, materiais, dentre outros. Diante tal aspecto, este trabalho visa direcionar parte de sua pesquisa em relação as normas ISO/ASTM 52902 e ASTM WK55297, que se encontram em desenvolvimento. Estas normas descrevem respectivamente as diretrizes para avaliação da capacidade geométrica de sistemas MA e a descrição de geometrias para padrões de referência.

O presente estudo focou-se na concepção de um novo padrão de teste por meio de um estudo de benchmarking de artefatos já existentes, de modo a buscar características geométricas típicas para avaliar os erros geométricos de impressoras FDM.

Em decorrência do número de processos MA existentes, houve-se a necessidade de encontrar ferramentas e/ou procedimentos que possibilitassem avaliar as capacidades, bem como as limitações de um determinado processo ou máquina, surgindo os chamados padrões ou artefatos de teste. Segundo Jurrens (1999), os padrões de teste atuais não apresentam geralmente os diversos recursos de peças encontradas no mundo real. Além disso, o autor enfatiza que uma solução satisfatória ainda não foi criada, ou seja, um padrão de teste genérico ou comum.

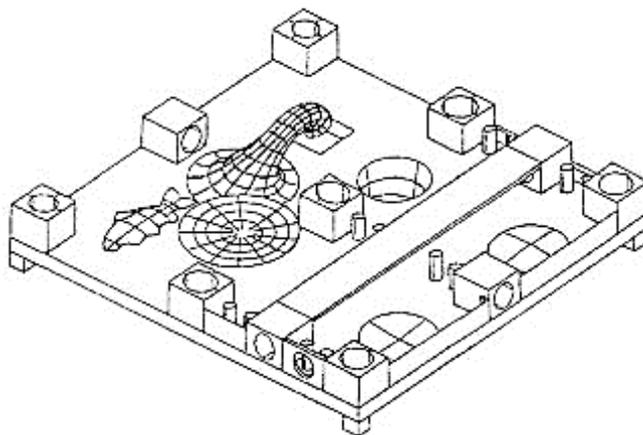
Para Mahesh (2004), estes padrões podem ser classificados em três grupos:

- Grupo 1: contém padrões que visam verificar e comparar o desempenho geométrico e dimensional de um ou mais processos. Os resultados desse tipo de avaliação são comumente explorados pelos usuários.

- Grupo 2: permitem a caracterização das propriedades mecânicas, como por exemplo resistência a tração, compressão, deformações e etc. São peças geralmente projetadas com base em testes das propriedades.
- Grupo 3: visa estabelecer os melhores parâmetros para o processo, ou seja, orientação da peça, estruturas de suporte, espessura de camadas, dentre outros.

Estes padrões de teste podem ser projetados para avaliar aspectos como: precisão dimensional e geométrica, repetibilidade e tamanhos mínimos de recursos (REBAIOLI; FASSI, 2017). Cabe ressaltar que maior parte dos padrões voltados ao aspecto de repetibilidade, permitem apenas avaliar a capacidade do sistema em produzir determinadas geometrias em diferentes regiões espaciais da plataforma de construção, ou seja, não corresponde a repetibilidade do processo. Segue abaixo alguns artefatos existentes na literatura, que foram utilizados para filtrar as características geométricas no padrão de teste criado.

Figura 63: Artefato de teste de precisão linear.

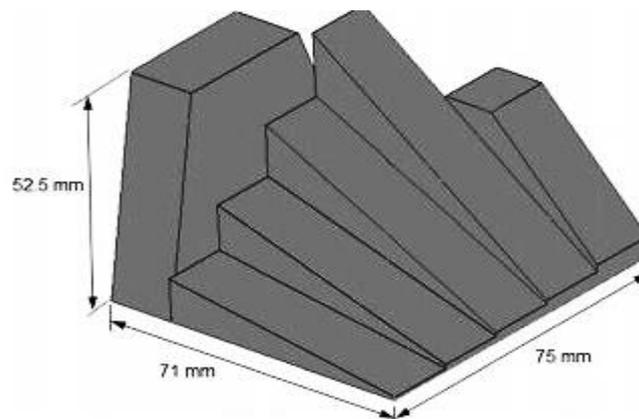


Fonte: Childs e Juster (1994).

Childs e Juster no ano de 1994, projetaram um padrão de teste contendo recursos replicados, a fim de verificar a repetibilidade e precisão linear de quatro processos diferentes da MA, sendo eles: SLA, SLS, FDM e LOM, vide figura 63. Os autores optaram pela construção de uma base relativamente grande de 240x240x40 mm, mesmo havendo a possibilidade de distorção do material quando impresso. Além disso, as geometrias complexas de “forma livre”, dificultaram o processo de medição segundo testes realizados.

Posteriormente, Reeves e Cobb criaram um padrão simples voltado para a medição de superfícies em ângulos nas direções X, Y e Z, destacando-se a facilidade de medição das geometrias, vide figura 64.

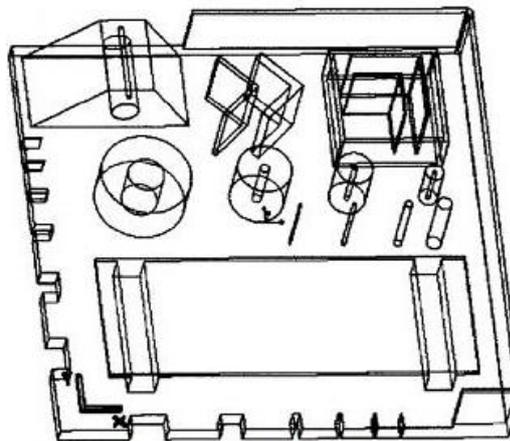
Figura 64: Artefato de teste em diferentes ângulos.



Fonte: Reeves e Cobb (1995).

No início do século XXI, Xu, Wong e Loh desenvolveram um artefato de teste específico para medição de recursos em diferentes dimensões, onde a capacidade de fabricação de pequenos orifícios, bem como a de paredes finas foram avaliadas, figura 65. Ao final, quatro processos foram abordados com o intuito de testar a precisão dos detalhes pós-impressão, sendo eles: SLA, SLS, FDM e LOM.

Figura 65: Artefato de teste de criação de pequenas geometrias.

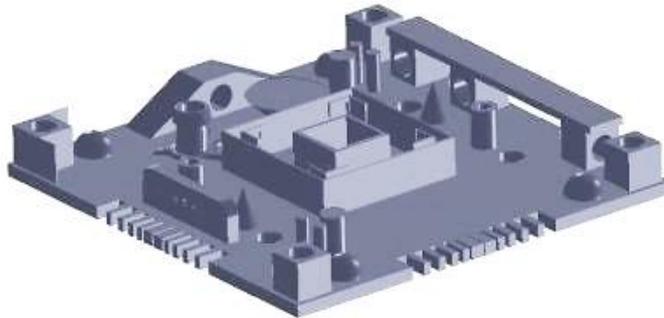


Fonte: Xu, Wong e Loh (2000).

Assim como os demais autores, Mahesh projetou seu padrão de teste baseando-se na vantagem e desvantagem de alguns artefatos anteriores, incorporando-se diversas características geométricas. Afirmou também, que tais artefatos devem tomar em conta as características de cada processo para posterior avaliação comparativa.

Segundo o autor, as técnicas de medição utilizadas devem estar em conformidade com as características geométricas pretendidas, para que haja uma fácil referência às normas relacionadas as tolerâncias geométricas existentes, como por exemplo a ISO e ASME. O padrão de teste proposto, figura 66, permitiu avaliar a repetibilidade do processo e a capacidade de fabricação de pequenos recursos de até 0,5 mm. Um extenso estudo foi realizado nos mesmos processos destacados anteriormente.

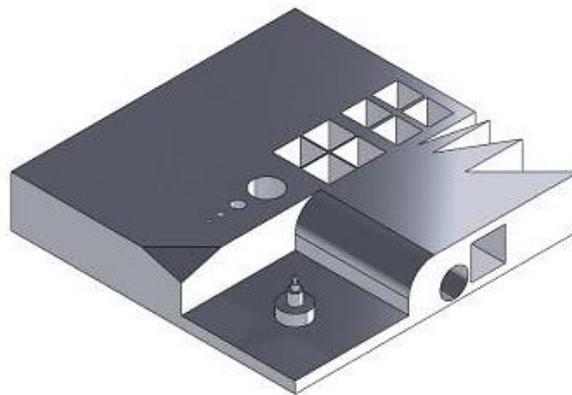
Figura 66: Artefato com características geométricas típicas.



Fonte: Mahesh (2004).

O artefato criado por Kruth, Vaerenbergh e Mercelis, focou-se em avaliar a precisão dimensional, a rugosidade superficial e as propriedades mecânicas para os processos SLS e SLM de pós metálicos. O padrão permitiu testar a resolução factível, por meio de características como: cilindros, furos, paredes finas, plano inclinado, dentre outros, vide figura 67.

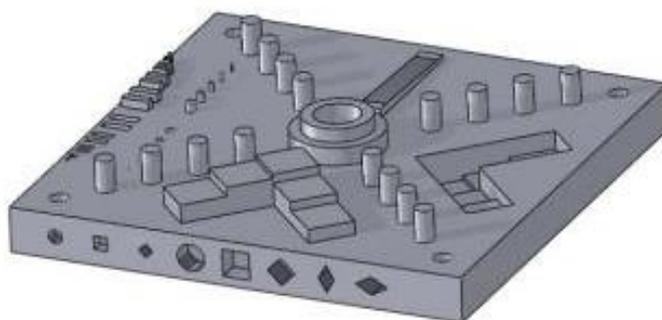
Figura 67: Artefato para teste de precisão dimensional.



Fonte: Kruth, Vaerenbergh e Mercelis (2005).

No ano de 2012 o engenheiro mecânico e líder de projetos, Shawn Moylan, do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos – NIST, juntamente com demais pesquisadores, realizaram um extenso estudo de padrões de teste já existentes desde a década de 90. Com base na pesquisa e com o conhecimento consolidado em padrões de teste para os processos de usinagem, os autores propuseram um novo artefato, figura 68. Questões como, caracterização das capacidades e limitações do processo, com o objetivo de vincular as fontes de erros específicos, foram abordados. Diversos materiais foram utilizados, bem como diferentes tecnologias, sendo elas: BJ, FDM, SLS, SLM e EBM.

Figura 68: Artefato proposto pelo NIST.

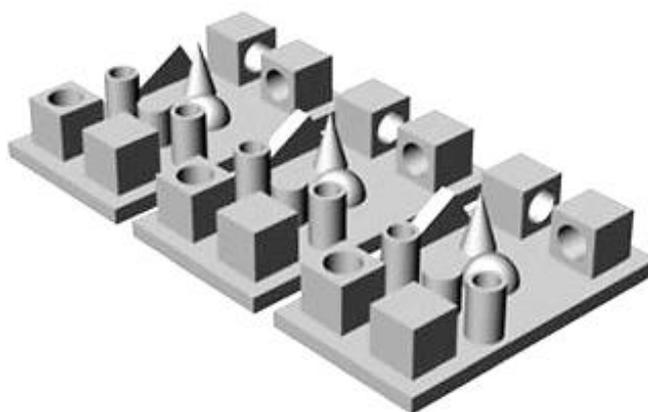


Fonte: Moylan et al. (2012).

Em 2015, Lanzotti destacou a necessidade de avaliar não apenas a precisão do processo, como também sua repetibilidade. Para isto, características simétricas foram pretendidas em três protótipos, permitindo a aquisição das geometrias impressas via scanner a laser, vide figura 69. Seus estudos permearam a avaliação de uma impressora 3D de código aberto.

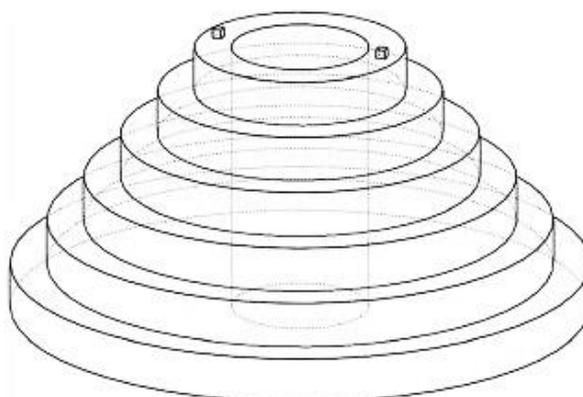
No ano seguinte, o pesquisador Islam propôs um artefato simplista, figura 70, que consiste em cilindros concêntricos sobrepostos entre si, com diâmetros decrescentes à medida que o padrão é impresso. Essa configuração permite diversas medições dimensionais em diferentes alturas, ou seja, foi avaliado por meio das posições espaciais, o degrau no eixo Z. Os processos utilizados foram o SLA e BJ.

Figura 69: Artefato de repetibilidade.



Fonte: Lanzotti (2015).

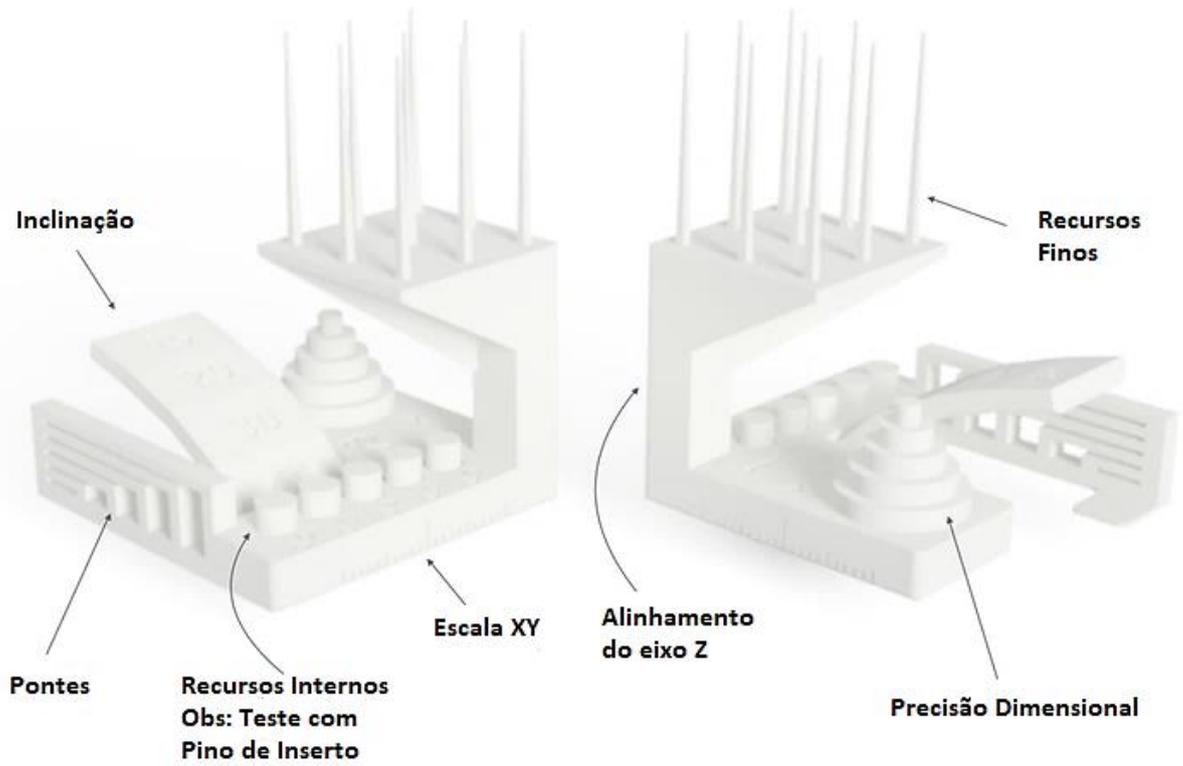
Figura 70: Artefato de teste para degrau em Z.



Fonte: Islam (2016).

Recentemente em 2018 a empresa Autodesk, por meio de seu pesquisador Andreas Bastian, desenvolveu um padrão de teste, figura 71, projetado para ajudar os “criadores” a calibrar suas máquinas e mostrar as capacidades de suas impressoras para os apoiadores da comunidade Kickstarter. Foi desenvolvido um arquivo STL único que testa a precisão dimensional, a resolução e o alinhamento de impressoras de processo FDM. Esse processo foi explorado inicialmente devido ser o modelo mais usual, porém a empresa enfatiza que ao longo do tempo deseja-se expandir esses padrões para outras tecnologias [102].

Figura 71: Artefato criado para Kickstarter.



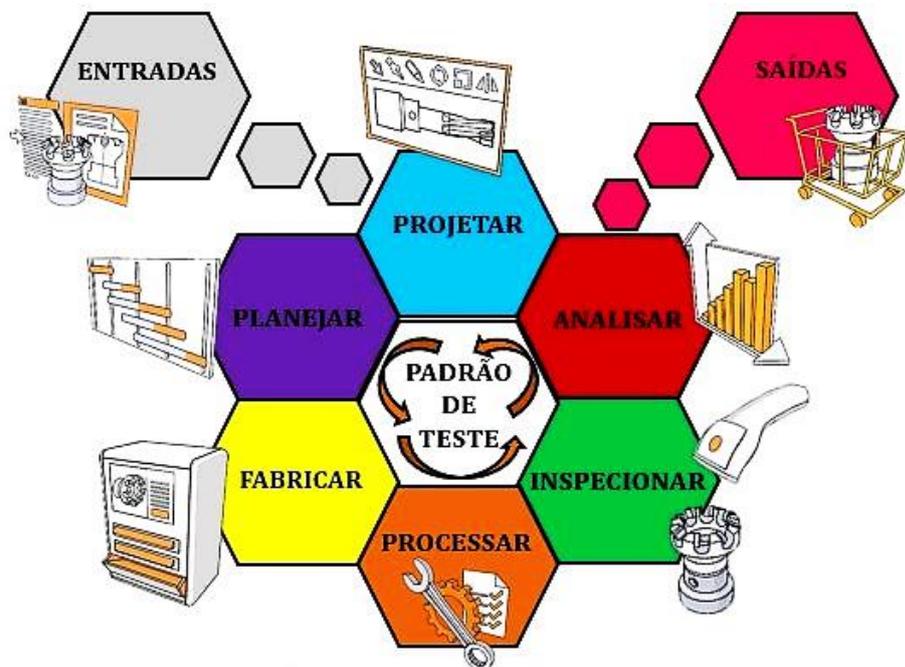
Fonte: Autodesk (2018).

6. AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA

O planejamento prático deste trabalho utilizou alguns conceitos da metodologia DOE, cuja técnica se resume em definir que tipos de dados serão coletados, qual a taxa de amostragem e em condições devem ser medidos, visando contribuir para um menor custo e uma maior precisão estatística possível (MARK; PATRICK, 2000). Sua aplicação no desenvolvimento de produtos faz-se necessária, pois quanto maior for a qualidade dos resultados, melhor será as características funcionais e de robustez. Cabe ressaltar que o princípio da repetição - DOE, será abordado através das características geométricas pretendidas, cujas respostas encontradas permitirá calcular a dispersão dos valores, em relação à média obtida.

Diante a definição da cadeia de processos por autores como Gibson, Rosen e Stucker citados anteriormente, criou-se uma nova cadeia de processos para o objeto de estudo, sendo esta também subdividida em oito etapas, figura 72, conforme a classificação abaixo:

Figura 72: Cadeia de processo adotada.



Fonte: Elaboração própria.

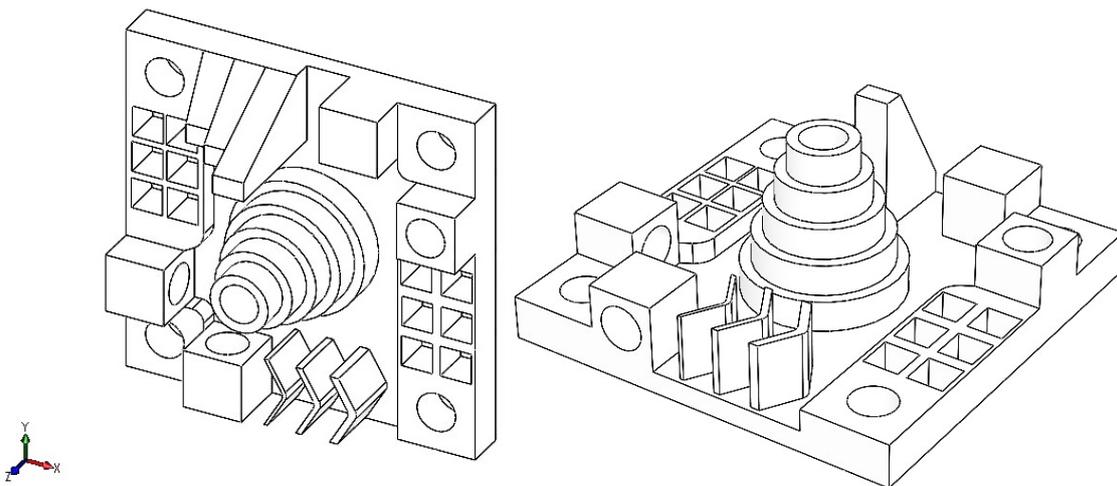
- ❖ Entradas: requisitos do projeto e expectativas;
- ❖ Projetar: modelamento CAD 3D e criação do arquivo STL;
- ❖ Planejar: orientação da peça, definição de parâmetros, fatiamento do modelo, transferência de dados para máquina;

- ❖ Fabricar: definição do processo, técnicas de impressão e máquina, seleção dos materiais, construção geométrica do padrão de teste;
- ❖ Processar: pós-processamento pela remoção de matéria-prima não consolidada, acabamentos superficiais;
- ❖ Inspecionar: estratégias de medição, inspeções e testes, integridade do material, controle geométrico do padrão de teste;
- ❖ Analisar: resultados gerados, avaliação dos erros, determinação e comparação de exatidão entre processos;
- ❖ Saídas: verificação do atendimento dos requisitos, melhorias no projeto e processo.

6.1 MODELAMENTO GEOMÉTRICO DO PADRÃO DE TESTE

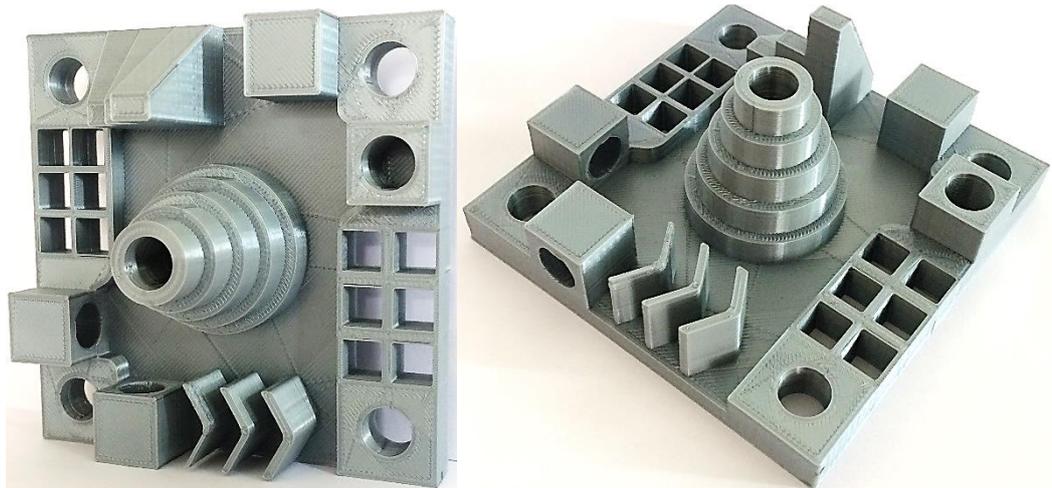
Após a revisão de padrões de teste existentes, levantou-se as características geométricas típicas relevantes para o estudo proposto. Logo, por meio das normas ISO 1101:2017 e ASME Y14.5, tais características foram selecionadas mediante as classes de tolerância mais usuais em projetos de produtos, tabela 1. Para isso, um novo modelo de padrão de teste foi modelado utilizando-se o software CAD SolidWorks, vide figura 73. Se comparado aos padrões classificados anteriormente, a geometria apresentada pelo artefato criado possui caráter intermediário, onde prima-se pela redução do tempo de fabricação, economia de matéria-prima, boa adequação para as medições e avaliação dos erros geométricos. Já a figura 74, mostra a peça real impressa em comparação com o modelamento 3D.

Figura 73: Padrão de teste modelado 3D.



Fonte: Autoria própria.

Figura 74: Novo padrão de teste.



Fonte: Autoria própria.

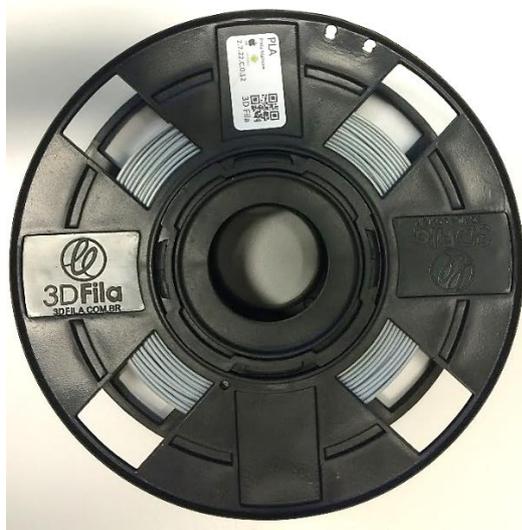
Tabela 1: Características geométrica típicas.

Geometrias	Características Geométricas (GD&T) – ISO 1101 / ASME Y14.5	
Base Quadrada	Forma:	
	○ Retitude	
	○ Planeza	
Conjunto de Furos	Orientação:	
	○ Paralelismo	
	Forma:	
Cubos	○ Circularidade	
	Localização:	
	○ Posição	
Furos Cilíndricos	Forma:	
	○ Planeza	
	Forma:	
Conjunto de Paredes	○ Circularidade	
	Orientação: Perpendicularidade	
	○ Perpendicularidade	
Conjunto de Nervuras – V	○ Cotas dimensionais	
	○ Cotas dimensionais	
Superfícies Inclinadas	Orientação:	
	○ Inclinação	
Cilindro Escalonado	Forma:	
	○ Circularidade	
	○ Cilindricidade	
	Orientação:	
	○ Perpendicularidade	
Localização:		
○ Concentricidade		

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O filamento utilizado na fabricação do padrão de teste foi o PLA prata machine da fabricante 3D FILA com diâmetro de $1,75 \pm 0,05$ mm, figura 75. Destaca-se uma boa relação custo/benefício deste material. Segundo fabricante, recomenda-se utilizar uma temperatura de impressão entre 185 e 210°C e com velocidade de impressão na ordem de 40 a 150 mm/s. Cabe ressaltar que o aquecimento da mesa não se faz necessário e orienta-se a utilização de ventilação forçada direcionada para a peça a ser fabricada.

Figura 75: Filamento PLA.



Fonte: Autoria própria.

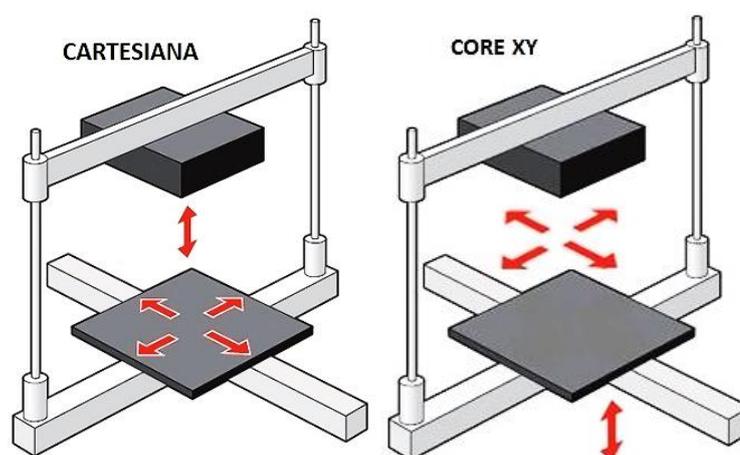
6.3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA PROCESSO FDM

As máquinas de impressão 3D utilizadas foram fornecidas pelo Grupo de Pesquisa em Processos de Fabricação e Tecnologia dos Materiais (PFBMAT) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Sabe-se que usualmente as impressoras de configuração cartesiana ainda são as mais utilizadas pelo mercado, porém impressoras de outras configurações, como por exemplo a delta, estão ganhando destaque devido algumas vantagens. Sabendo-se que os parâmetros de fabricação afetam diretamente a qualidade dimensional e geométricas das peças produzidas, tem-se que os experimentos em ambas as impressoras foram realizados utilizando suas respectivas configurações “*default*”, por serem usualmente utilizadas.

6.3.1 Caracterização da Máquina Cartesiana

A configuração cartesiana apresenta movimentos em relação aos três eixos ortogonais X, Y e Z, onde maior parte das impressoras do mercado realiza os deslocamentos XY por meio da mesa de construção, tendo o cabeçote extrusor deslocado pelo eixo Z. Porém, configurações cuja a plataforma de construção desloca-se no eixo Z, são usualmente encontradas em configurações industriais como a Fortus 380mc & 450mc da empresa Stratasys. No entanto, impressoras desktops chamadas de Core XY tem surgido no mercado e possuem a mesma funcionalidade, onde o cabeçote extrusor desloca-se nos eixos X e Y, figura 76.

Figura 76: Configurações cartesiana e core XY.



Fonte: Adaptado de Baya e Earls (2014).

Tabela 2: Especificações técnicas CR-20.

Diâmetro do filamento	1,75 mm
Cabeçote Extrusor / Diâmetro do bico	1 / 0,4 mm
Espessura da camada de impressão	0,1 mm ~ 0,3 mm
Temperatura do bico	250° C Máx.
Temperatura da mesa aquecida	110° C Máx.
Velocidade máxima de movimento	180 mm/s
Precisão de posição X/Y	0,012 mm
Precisão de posição Z	0,004 mm
Software "Fatiador"	Cura
Formatos de arquivo	STL, OBJ, G-Code

Os padrões de teste foram impressos na máquina Creality CR-20, figura 77. Dentre suas características, a impressora oferece um volume de construção de 220x220x250 mm. Considerada por criadores e hobistas uma das impressoras de entrada mais populares do mercado, devido ao seu custo e qualidade de impressão. É compatível com vários tipos de filamentos como: ABS, PLA, Nylon, PETG, TPU, dentre outros. Não apresenta nivelamento automático, porém permite atualizações por ser uma tecnologia de código aberto. A tabela 2 apresenta algumas especificações técnicas gerais da impressora.

Figura 77: Impressora CR-20.



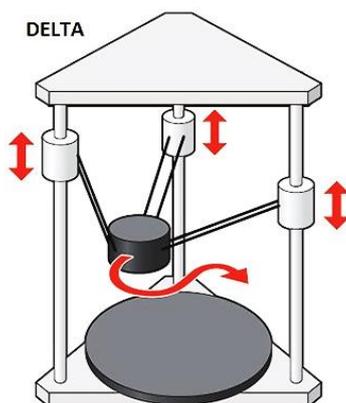
Fonte: Autoria própria.

6.3.2 Caracterização de Máquina Delta

As impressoras do tipo delta, figura 78, se baseiam em movimentos paralelos de maior complexidade se comparados a configuração cartesiana. A principal característica atribuída a esta configuração se dá pela maior velocidade e volume de construção.

A segunda impressora a ser avaliada, por meio da impressão dos padrões de teste foi a Rostock Max V2, figura 79. Segundo o fabricante, a máquina possui uma área máxima diametral XY de 280 mm com uma altura máxima de impressão de 375 mm. Os materiais encontrados para impressão são o PLA, ABS, Nylon, FLEX e PETG. A tabela 3, mostra algumas especificações técnicas.

Figura 78: Configuração delta.



Fonte: Adaptado de Baya e Earls (2014).

Tabela 3: Especificações técnicas Rostock Max V2.

Diâmetro do filamento	1,75 mm
Cabeçote extrusor / Diâmetro do bico	1 / 0,5 mm
Temperatura do bico	245° C Máx.
Temperatura da mesa aquecida	110° C Máx.
Velocidade máxima de movimento	300 mm/s
Precisão de posição X/Y	0,4 mm
Precisão de posição Z	0,0125 mm
Software “Fatiador”	MatterControl
Formatos de arquivo	STL, G-Code

Figura 79: Impressora Rostock Max V2.



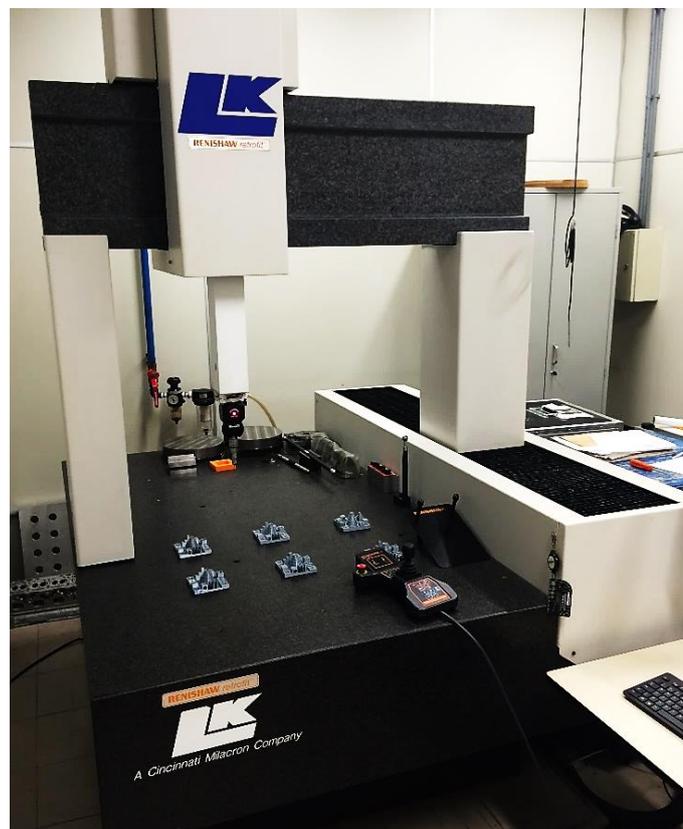
Fonte: Autoria própria.

6.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO PARA OS PADRÕES

Sabe-se que as especificações tanto geométricas quanto dimensionais são de suma importância para a concepção de um produto funcional. Logo, para atender os requisitos estipulados, os sistemas MA devem apresentar estabilidade no processo de fabricação. Segundo Albertazzi e Souza (2008), a avaliação do comportamento de qualquer máquina/sistema é realizado por meio de medições e análises executadas periodicamente por um único instrumento de medição.

Para a avaliação das características geométricas do padrão de teste criado, foi utilizada a máquina de medir por coordenadas, modelo LKG80-C com controlador Renishaw UCC e software MODUS do Laboratório de metrologia do Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC, vide figura 80. Para Valdés; Di Giacomo e Paziani (2005), as MMC's são equipamentos de grande relevância quando se deseja um controle de qualidade confiável, de maior flexibilidade e versatilidade.

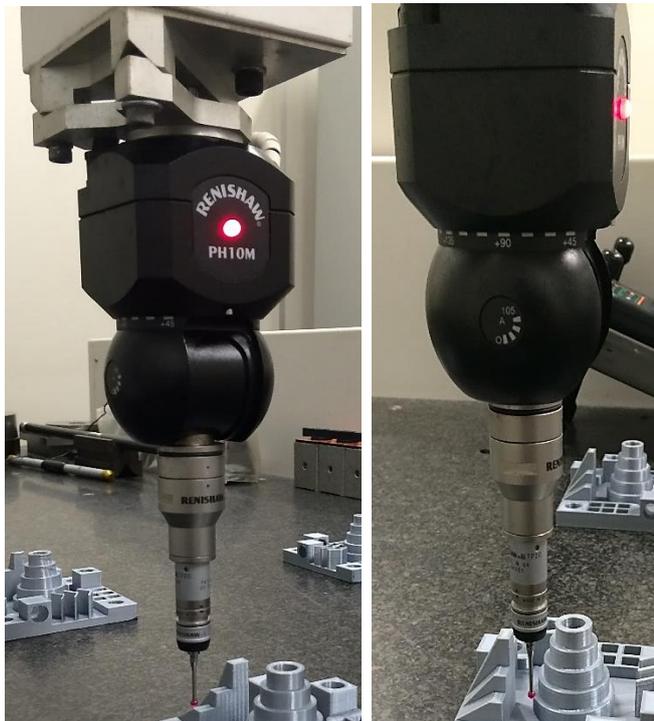
Figura 80: MMC LKG80-C.



Fonte: Autoria própria.

A configuração mecânica da LKG80-C é do tipo Portal, com mesa e trave em granito, tendo seu eixo Z de cerâmica. Os acionamentos de movimentação são realizados por servo motores de corrente contínua, cujo deslocamento do portal ocorre sobre mancais aerostáticos. A máquina possui um volume de medição de 1000 mm em X, 700 mm em Y e 600 mm em Z. De acordo com a norma ISO 10360-2, a incerteza de medição MPE da máquina é de $\pm (2,5 + L / 250) \mu\text{m}$. O sistema de apalpação contou com um cabeçote indexável PH10 e um apalpador por contato TP20, ambos da marca Renishaw, figura 81.

Figura 81: Sistema de apalpação Renishaw.

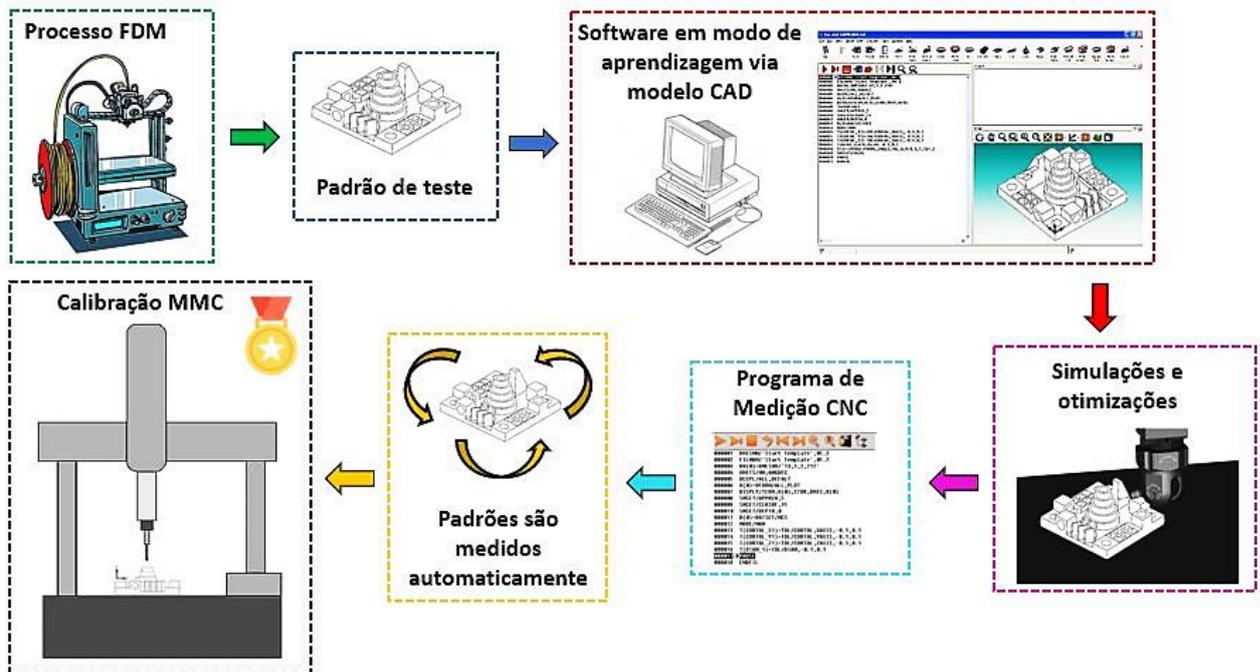


Fonte: Autoria própria.

6.4.1 Estratégia de medição

Dentre as formas de medição por coordenadas, optou-se pelo método *off-line com modelo CAD*, figura 82, cuja vantagem principal se dá pela facilidade e segurança na programação, uma vez que o aprendizado é realizado via geometria CAD modelada. Cabe ressaltar que para esta configuração de medição libera-se o tempo de trabalho da MMC, sendo oposta ao que ocorre na programação via *Touch In*.

Figura 82: Método off-line com modelo CAD.



Fonte: Autoria própria.

Segundo Maas (2001), a incerteza dos resultados está estritamente relacionada a estratégia de medição adotada, ou seja, os procedimentos determinam a confiabilidade dos resultados. Conforme a sequência de medição apresentada definiu-se o escopo da estratégia em relação as características geométricas avaliadas, onde algoritmos de ajuste baseados no método gaussiano de mínimos quadrados foram utilizados, bem como o número e a localização dos pontos a serem apalpados, vide tabela 4.

Tabela 4: Estratégia de medição MMC.

Quantidade de pontos coletados	Mínimo 8
Tipo apalpador	Ponto
Tipo de filtro	Nenhum, devido poucos pontos
Fator de extrapolados	Sem fator
Tipo de ajuste dos elementos	Mínimos quadrados
Diâmetro do apalpador	Ø 4 mm

6.4.2 Linguagem GD&T aplicada ao padrão de teste

O GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerance), é uma linguagem técnica que utiliza símbolos geométricos, com o objetivo de expressar os requisitos funcionais do produto, cuja forma de escrita se diferencia do sistema típico cartesiano, comumente conhecido de CD&T (Classical Dimensioning and Tolerancing). Logo, o CD&T não possui restrições quando aplicado ao toleranciamento de dimensões nominais, porém são incapazes de definir o sistema de referência, bem como as características geométricas. Desta forma, a linguagem GD&T faz-se necessária por ser a forma correta e padronizada de representação e controle de características geométricas e funcionais [108].

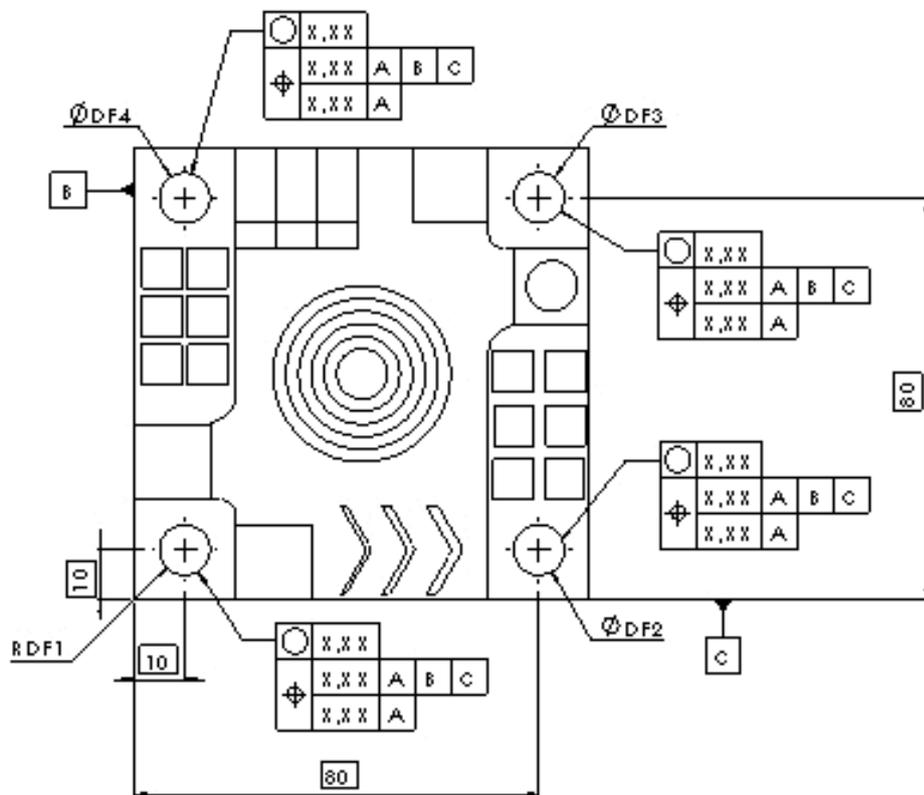
Com o objetivo de expressar as características geométricas e dimensionais, a linguagem GD&T foi utilizada para a verificação e validação dos padrões impressos. As anotações referentes ao padrão criado podem ser visualizadas na tabela 5, onde 69 características foram definidas no plano de medição, visando avaliar os erros geométricos das impressoras utilizadas.

Tabela 5: Características geométricas e dimensionais.

Geometrias	Sigla	Descrição	Tamanho (mm)	Medidas
Base Quadrada	[BQ]	Base de construção inicial para os demais recursos	90 x 90 x 5	1) Planeza: Datum B 2) Planeza: Datum C 3) Retitude: PLX2 4) Retitude: PLY2 5) Paralelismo: Datum B - PLX2 6) Paralelismo: Datum C - PLY2 7) LX1X2 8) LY1Y2
Conjunto de Furos	[CF]	Cadeia de furos circulares passantes	Ø 10	9) Circularidade: DF1 10) Circularidade: DF2 11) Circularidade: DF3 12) Circularidade: DF4 13) Desvio Posição: DF1 14) Desvio Posição: DF2 15) Desvio Posição: DF3 16) Desvio Posição: DF4 17)DF1 18) DF2 19) DF3 20) DF4

Cubos	[CB]	Extrusão de cubos alinhados a peça	15 x 15 x 15	21) Planeza: Cubo 1 22) Planeza: Cubo 2 23) Planeza: Cubo 3 24) Planeza: Cubo 4 25) L1X 26) L1Y 27) L2X 28) L2Y 29) L3X 30) L3Y 31) L4X 32) L4Y
Furos Cilíndricos	[FC]	Furos dispostos na orientação dos eixos X, Y, Z	Ø 10	33) Circularidade: FC1 34) Circularidade: FC2 35) Circularidade: FC3 36) Perpendicularidade: Datum A - FC1 37) Perpendicularidade: Datum B - FC2 38) Perpendicularidade: Datum C - FC3
Conjunto de Paredes	[CP]	Paredes finas por meio de rasgos quadrados passantes	0,75 a 3 Variação de: 0,25	39) LP1 40) LP2 41) LP3 42) LP4 43) LP5 44) LP6 45) LP7 46) LP8 47) LP9 48) LP10
Conjunto de Nervuras – V	[CN]	Paredes finas por meio da extrusão de nervuras em V	0,75 a 2 Variação de: 0,25	49) EP1 50) EP2 51) EP3 52) EP4 53) EP5 54) EP6
Superfícies Inclinadas	[SI]	Extrusão de superfícies para estudo de ângulos convencionais	30°, 45°, 60° graus	55) Inclinação: Datum A - SI1 56) Inclinação: Datum A - SI2 57) Inclinação: Datum A - SI3

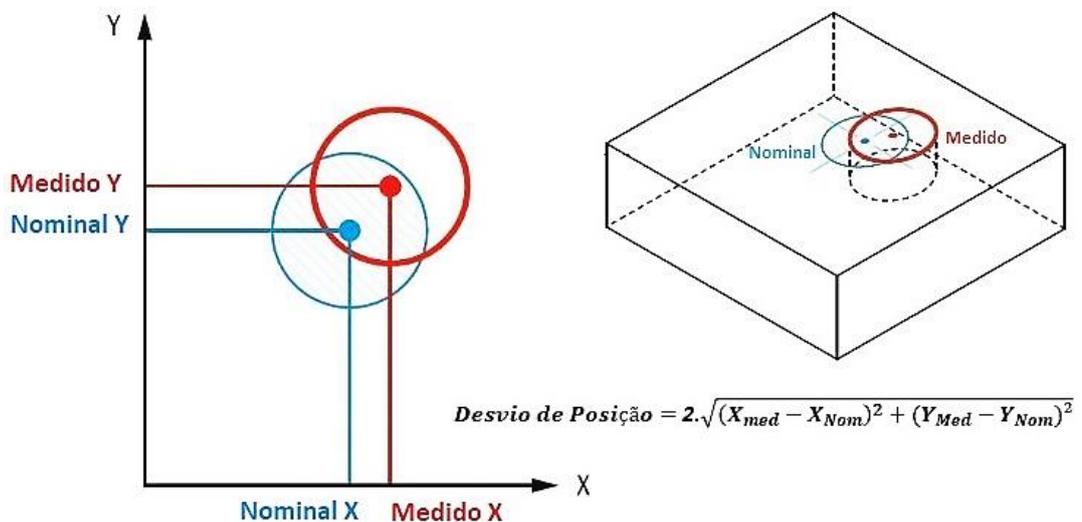
Figura 84: Características referentes à [CF].



Fonte: Autoria própria.

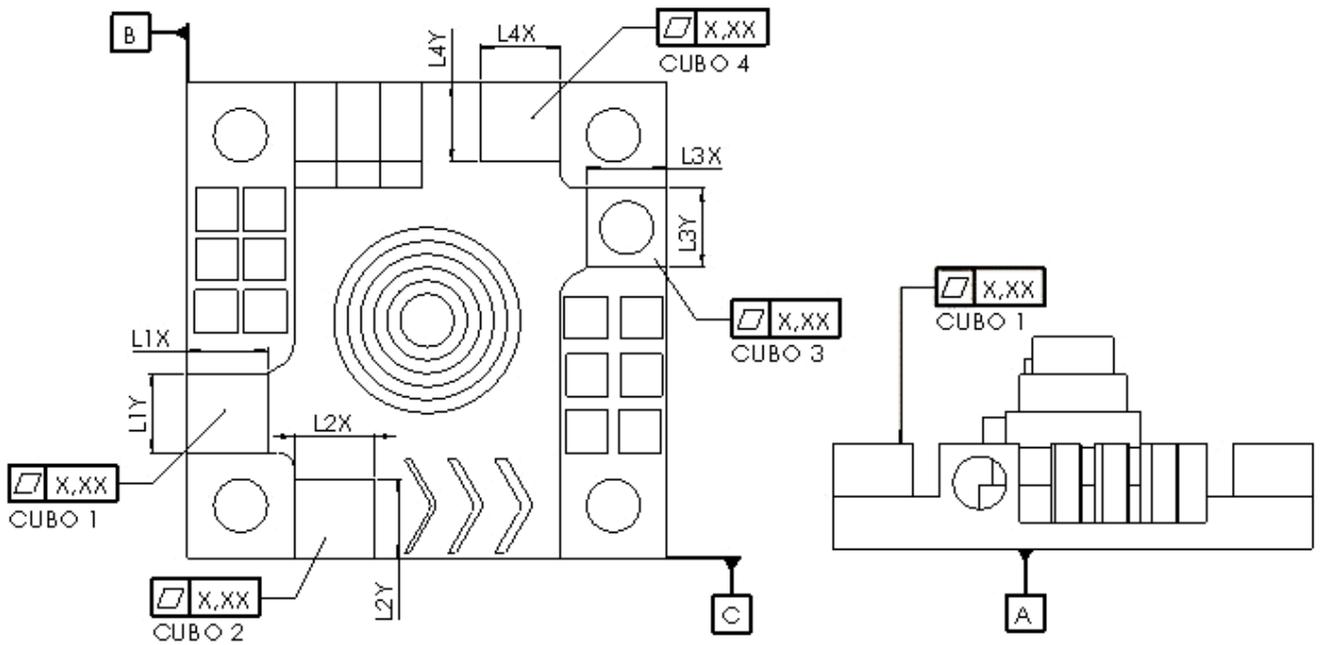
Dentre as características apresentadas na figura 84, tem-se a tolerância de posição. Segundo a norma ASME Y14.5M-2009, o cálculo do desvio de posição pode ser realizado considerando-se a chamada “posição verdadeira”, figura 85.

Figura 85: Desvio de posição de furos em [CB].



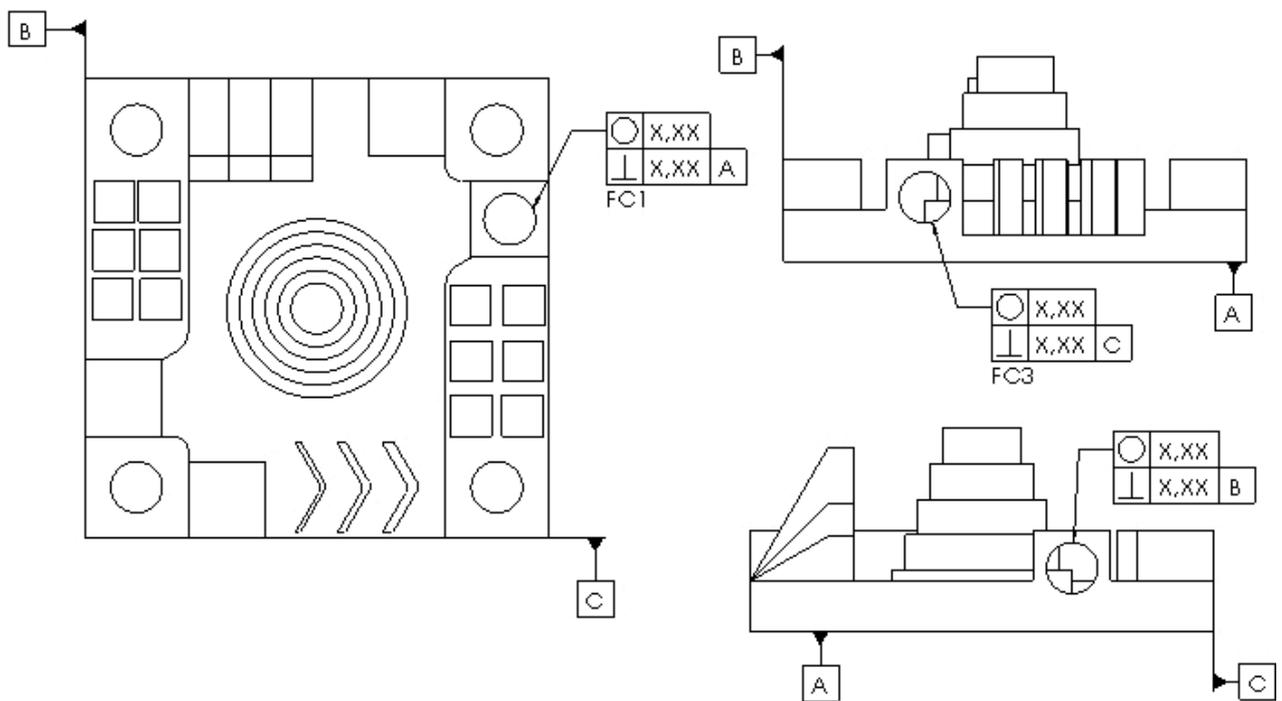
Fonte: Adaptado de GD&TBASICS.

Figura 86: Características referentes à [CB].



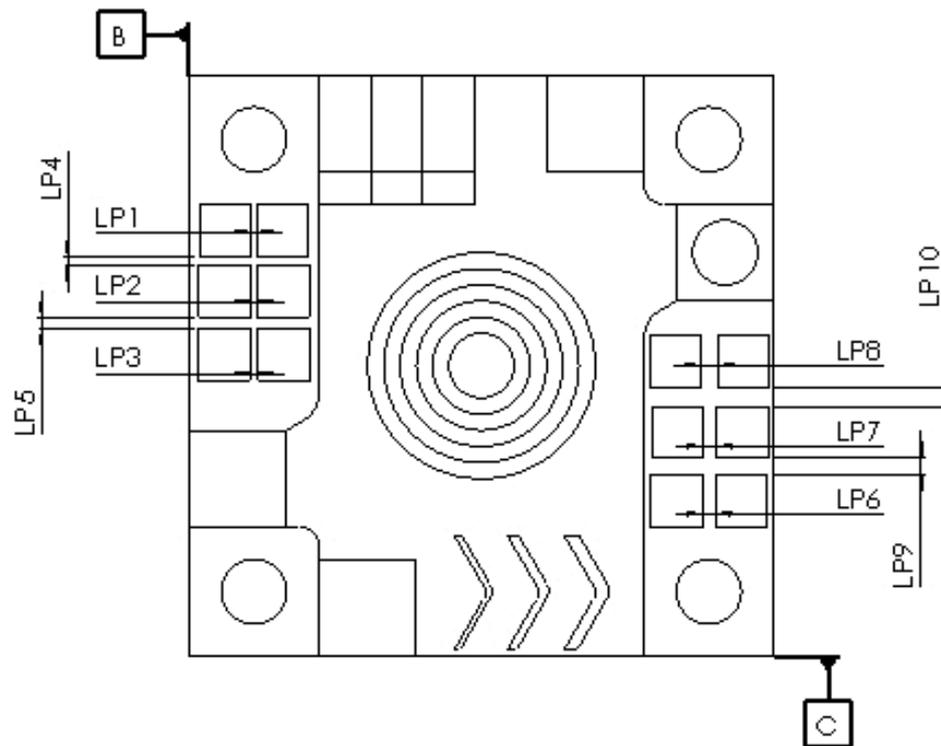
Fonte: Autoria própria.

Figura 87: Características referentes à [FC].



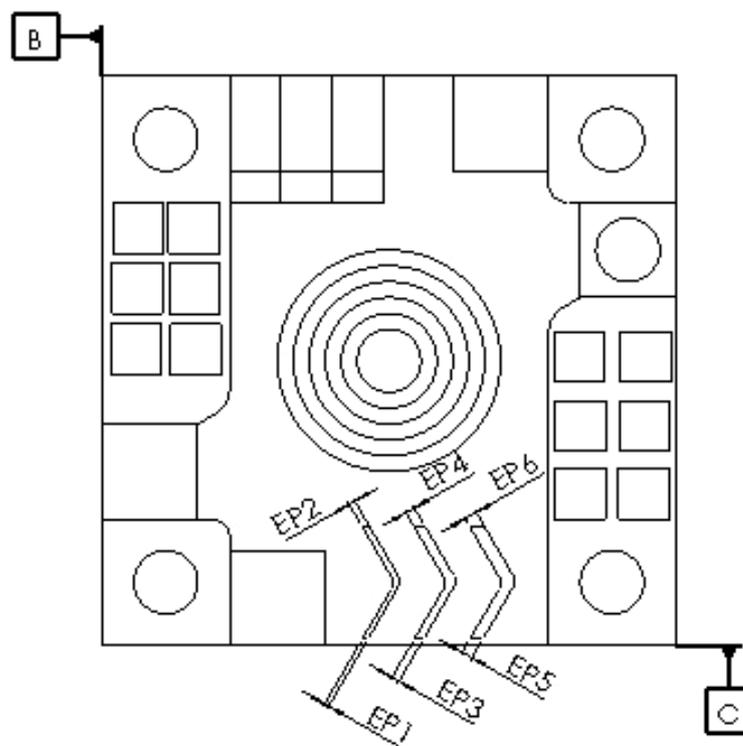
Fonte: Autoria própria.

Figura 88: Características referentes à [CP].



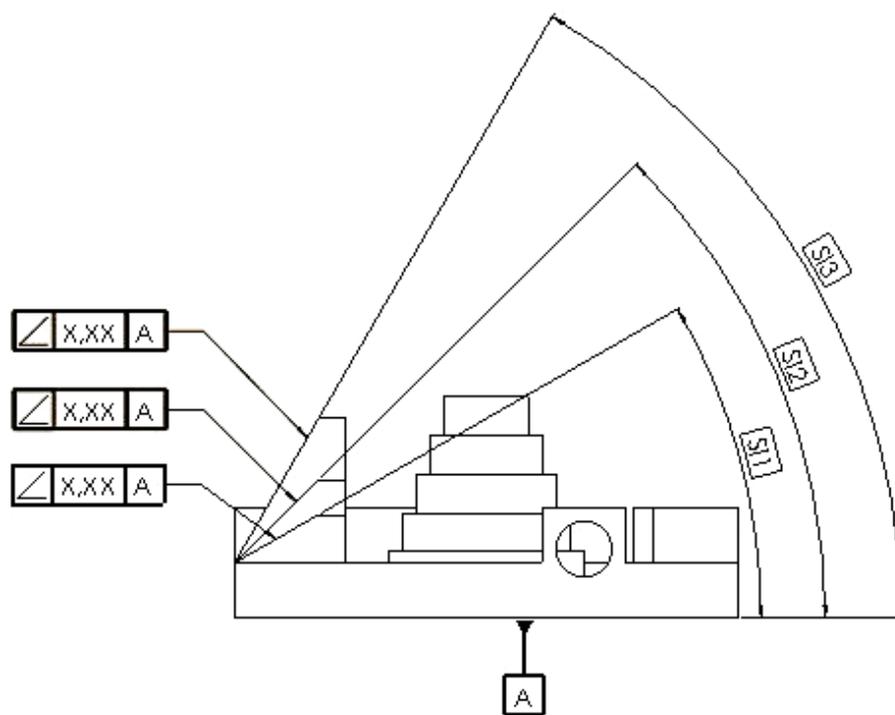
Fonte: Autoria própria.

Figura 89: Características referentes à [CN].



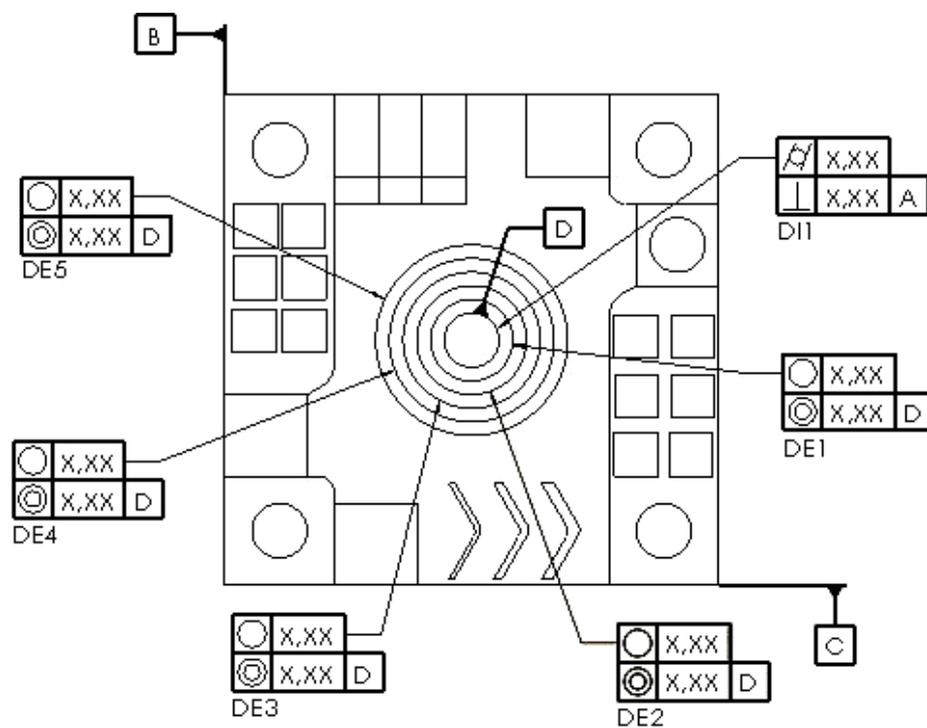
Fonte: Autoria própria.

Figura 90: Características referentes à [SI].



Fonte: Autoria própria.

Figura 91: Características referentes à [CE].



Fonte: Autoria própria.

7. APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE TESTE

As variações tanto dimensionais quanto geométricas são naturais em qualquer tipo de processo de fabricação. Elas podem ocorrer por meio de causas do tipo aleatória ou sistemática. Logo, todo processo cuja tratativa se dá em conhecer sua precisão bem como exatidão, deve-se determinar a capacidade do processo. Ao relacionar os valores de média e desvio padrão com o nominal e seus limites de tolerância, tem-se que é possível prever se determinado processo está se comportando, conforme solicitação.

O índice de capacidade (C_p) pode ser expresso pela equação 7.1, onde “ σ ” corresponde ao desvio padrão amostral. Já o LSE e LIE, referem-se aos limites superior e inferior, respectivamente especificados. Geralmente classifica-se o processo capaz, quando o $C_p \geq 1$, porém considera-se como critério comumente aceito um valor de 1,33 para que seja classificado como “Bom”.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (7.1)$$

Já o índice de não conformidade (CP_k), equação 7.2, relaciona a média da distribuição ao valor alvo (nominal), ou seja, o quão distante encontra-se. O coeficiente “ μ ” refere-se a média amostral. Para $CP_k > 1$ considera-se uma distribuição gaussiana centralizada, onde abaixo de 1 o processo nunca será capaz. Geralmente se considera um CP_k maior que 1,33 para que seja capaz.

$$CP_k = \text{Min} \left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right) \quad (7.2)$$

7.1 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO PROCESSO FDM CARTESIANA

7.1.1 Medições e Análise de Erros Encontrados

Com o objetivo de avaliar as características dimensionais e geométricas das peças cartesianas os resultados de medição foram listados na tabela 6, sendo estas relacionadas as geometrias BQ, CF, CB, FC, CP, CN, SI e CE. Já a tabela 7, mostra os valores das maiores médias amostrais com relação a classe de tolerâncias. Por fim, a tabela 8 mostra os índices de capacidade relacionados a especificidade de cada característica, para um intervalo de $\pm 0,1$ mm.

Tabela 6: Resultados de medição CR-20.

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Amplitude
			(mm)	(mm)	(mm)		
Base Quadrada [BQ]	Planeza: Datum B	/	0,052	0,053	0,036	0,047	0,017
	Planeza: Datum C	/	0,213	0,093	0,158	0,155	0,120
	Retitude: PLX2	/	0,051	0,048	0,054	0,051	0,006
	Retitude: PLY2	/	0,137	0,179	0,105	0,140	0,074
	Paralelismo: Datum B - PLX2	/	0,054	0,056	0,052	0,054	0,004
	Paralelismo: Datum C - PLY2	/	0,419	0,240	0,112	0,257	0,307
	/	LX1X2	90,018	90,032	90,036	90,029	0,018
	/	LY1Y2	89,736	89,511	89,547	89,598	0,225

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Amplitude	Desvio Padrão
			(mm)	(mm)	(mm)			
Cubos [CB]	Planeza: Cubo 1	/	0,082	0,076	0,090	0,083	0,014	/
	Planeza: Cubo 2	/	0,017	0,019	0,014	0,017	0,005	/
	Planeza: Cubo 3	/	0,001	0,017	0,022	0,013	0,021	/
	Planeza: Cubo 4	/	0,022	0,024	0,026	0,024	0,004	/
	/	L1X	15,112	15,084	15,117	15,104	0,033	0,0178
	/	L1Y	14,979	15,003	15,012	14,998	0,033	0,0171
	/	L2X	15,109	15,096	15,098	15,101	0,013	0,0070
	/	L2Y	15,021	15,009	15,025	15,018	0,016	0,0083
	/	L3X	15,123	15,122	15,156	15,134	0,034	0,0193
	/	L3Y	15,100	15,069	15,096	15,088	0,031	0,0169
/	L4X	15,137	15,110	15,139	15,129	0,029	0,0162	
/	L4Y	15,134	15,151	15,138	15,141	0,017	0,0089	

Geometrias	Caract. Geo.	Caract. Dimens.			Peça C1 (mm)		Peça C2 (mm)		Peça C3 (mm)		Média	Ampl.	Desvio Padrão	
		Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio				
Conjunto de Furos [CF]	Circularidade: DF1	/			0,140		0,155		0,156		0,150	0,016	/	
	Circularidade: DF2	/			0,062		0,056		0,056		0,058	0,006	/	
	Circularidade: DF3	/			0,058		0,063		0,073		0,065	0,015	/	
	Circularidade: DF4	/			0,037		0,062		0,066		0,055	0,029	/	
	Dist. Medição: 7,5 mm		Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	*	*	*
	Posição: DF1	10,065	10,445	0,899	10,065	10,226	0,470	10,070	10,256	0,531	0,634	0,429	0,2323	
	Posição: DF2	80,008	9,914	0,173	80,035	9,071	1,859	79,996	9,711	0,578	0,870	1,686	0,8803	
	Posição: DF3	80,022	79,708	0,586	80,044	79,515	0,974	80,014	79,488	1,024	0,861	0,439	0,2401	
	Posição: DF4	10,086	80,183	0,404	10,091	79,977	0,188	10,092	79,985	0,186	0,260	0,218	0,1255	
	/		DF1	9,671			9,663			9,649	9,661	0,022	0,0111	
	/		DF2	9,721			9,691			9,683	9,698	0,038	0,0200	
	/		DF3	9,803			9,805			9,777	9,795	0,028	0,0156	
	/		DF4	9,750			9,694			9,656	9,700	0,094	0,0473	

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Amplitude
			(mm)	(mm)	(mm)		
Furos Cilíndricos [FC]	Circularidade: FC1	/	0,087	0,096	0,108	0,097	0,0210
	Circularidade: FC2	/	0,038	0,016	0,019	0,024	0,0220
	Circularidade: FC3	/	0,077	0,040	0,083	0,067	0,0430
	Perpendicularidade: Datum A - FC1	/	0,191	0,204	0,156	0,184	0,0480
	Perpendicularidade: Datum B - FC2	/	0,074	0,090	0,072	0,079	0,0180
	Perpendicularidade: Datum C - FC3	/	0,221	0,160	0,187	0,189	0,0610

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Amplitude	Desvio Padrão
			(mm)	(mm)	(mm)			
Conjunto de Paredes [CP]	/	LP1	0,828	0,824	0,807	0,820	0,021	0,0112
	/	LP2	1,037	1,060	1,047	1,048	0,023	0,0115
	/	LP3	1,277	1,318	1,276	1,290	0,042	0,0240
	/	LP4	1,540	1,508	1,515	1,521	0,032	0,0168
	/	LP5	1,778	1,802	1,796	1,792	0,024	0,0125
	/	LP6	2,128	2,121	2,139	2,129	0,018	0,0091
	/	LP7	2,377	2,313	2,346	2,345	0,064	0,0320
	/	LP8	2,550	2,545	2,588	2,561	0,043	0,0235
	/	LP9	2,866	2,838	2,886	2,863	0,048	0,0241
	/	LP10	3,111	3,099	3,086	3,099	0,025	0,0125

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Amplitude	Desvio Padrão
			(mm)	(mm)	(mm)			
Conjunto de Nervuras – V [CN]	/	EP1	0,825	0,817	0,831	0,824	0,014	0,0070
	/	EP2	1,288	1,255	1,271	1,271	0,033	0,0165
	/	EP3	1,374	1,382	1,411	1,389	0,037	0,0195
	/	EP4	1,548	1,574	1,583	1,568	0,035	0,0182
	/	EP5	1,918	1,906	1,930	1,918	0,024	0,0120
	/	EP6	2,151	2,132	2,170	2,151	0,038	0,0190

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Ampl.	Desv.
			(mm)	(mm)	(mm)			
Superfícies Inclinadas [SI]	Inclinação: Datum A - SI1	/	30,700°	30,720°	30,560°	30,660°	0,160°	0,0872
	Inclinação: Datum A - SI2	/	45,655°	45,548°	45,414°	45,539°	0,241°	0,1208
	Inclinação: Datum A - SI3	/	60,591°	60,627°	60,500°	60,573°	0,127°	0,0655

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça C1	Peça C2	Peça C3	Média Amostral	Amplitude
			(mm)	(mm)	(mm)		
Cilindro Escalonado [CE]	Cilindricidade: DI1	/	0,098	0,069	0,099	0,089	0,030
	Perpendicularidade: Datum A - DI1	/	0,008	0,013	0,031	0,017	0,023
	Circularidade: DE1	/	0,108	0,106	0,094	0,103	0,014
	Circularidade: DE2	/	0,107	0,117	0,098	0,107	0,019
	Circularidade: DE3	/	0,126	0,138	0,127	0,130	0,012
	Circularidade: DE4	/	0,143	0,167	0,146	0,152	0,024
	Circularidade: DE5	/	0,166	0,155	0,163	0,161	0,011
	Concentricidade: Datum D - DE1	/	0,013	0,031	0,030	0,025	0,018
	Concentricidade: Datum D - DE2	/	0,096	0,078	0,067	0,080	0,029
	Concentricidade: Datum D - DE3	/	0,126	0,108	0,089	0,108	0,037
	Concentricidade: Datum D - DE4	/	0,154	0,151	0,092	0,132	0,062
	Concentricidade: Datum D - DE5	/	0,220	0,222	0,119	0,187	0,103

De modo a facilitar as interpretações dos valores dimensionais e geométricos coletados via MMC para os padrões impressos na máquina CR-20, tem-se as seguintes subdivisões:

- Base Quadrada [BQ]: Ao analisar os erros de forma e orientação presentes, como planeza, retitude e paralelismo, o valor de desvio máximo encontrado foi de 0,419 mm referente ao paralelismo entre Datum C – PLY2. Já com relação as medidas de tamanhos externos, teve-se um desvio máximo de 90,036 mm e mínimo de 89,511 mm. Percebe-se um maior desvio no eixo Y.
- Cubos [CB]: O maior erro de planicidade encontrado foi de 0,090 mm no Cubo1. Já os valores referentes a construção dimensional de largura nas direções XY, obtiveram erros consideráveis. Os valores da abcissa de 15,156 mm e 15,084 mm, possuem menor desvio se comparados aos valores das ordenadas Y, 15,151 mm e 14,979 mm. Logo, ocorre-se um erro maior em Y.
- Conjunto de Furos [CF]: Em relação ao conjunto de furos verticais, o desvio máximo encontrado referente a circularidade foi de 0,156 mm. Ao analisarmos os desvios de posição, tem-se que o maior valor encontrado foi no furo DF2 com o valor de 1,859 mm, artefato 2 e um menor desvio de valor 0,173 mm no mesmo furo DF2, no primeiro artefato. O maior diâmetro apresentou valor de 9,805 no furo DF3 e menor

diâmetro no furo DF1, com o valor de 9,649, mostrando-se o efeito da deposição de camadas devido à compactação do bico sobre a camada recém-impresa, ou seja, os furos são subdimensionados. Cabe ressaltar, que ao analisarmos as coordenadas XY do “centro medido”, percebe uma maior variação nos valores em Y em relação aos valores das cotas básicas, vide figura 84.

- Furos Cilíndricos [FC]: O maior valor de cilindridade encontrado foi de 0,108 mm no CF1. Já o furo que apresentou maior erro de perpendicularidade, foi em relação ao Datum C com o valor de 0,221 mm.
- Conjunto de Paredes [CP]: Dentre os valores de espessuras propostos ao padrão de teste, tem-se que a LP7 obteve um maior desvio padrão no valor de 0,032 mm. O menor desvio ocorreu na parede LP6 com o valor de 0,009 mm.
- Conjunto de Nervuras – V [CN]: A espessura EP3 obteve o maior desvio padrão, em contrapartida a EP1 obteve o menor desvio.
- Superfícies Inclinadas [SI]: Dentre os valores de ângulos encontrados de melhor média, o de 45° obteve valor mais próximo do nominal, porém apresentou maior dispersão. Já o ângulo de 30° obteve menor desvio padrão.
- Cilindro Escalonado [CE]: Com relação ao diâmetro interno, o maior valor de cilindridade encontrado foi de 0,099. A ortogonalidade deste furo em relação ao Datum A, obteve um maior valor de 0,031 mm. Já os diâmetros externos escalonados, obtiveram um erro de circularidade de 0,167 mm no DE4 e 0,222 no DE5 em relação a concentricidade do Datum D.

Tabela 7: Valor máximo das médias amostrais CR-20.

FORMA +0,1 mm				ORIENTAÇÃO +0,1 mm		LOCALIZAÇÃO +0,1 mm
Retitude	Planeza	Circularidade	Cilindridade	Paralelismo	Perpendicularidade	Concentricidade
0,140	0,155	0,161	0,089	0,257	0,189	0,187

Com relação aos erros de *Forma* analisados, tem-se que os desvios relativos ao processo de fabricação FDM, não apresentaram grandes variações se comparados à precisão dimensional do equipamento de $\pm 0,1$ mm. Cabe ressaltar, que dependendo das especificações técnicas desejadas, tais valores podem ou não satisfazer a funcionalidade requerida. Já os maiores valores das médias amostrais obtidas, referem-se a classe de *Orientação*, onde o paralelismo e a perpendicularidade foram avaliados. Esses tipos de erros, principalmente o de perpendicularidade, possui influência significativa na construção da peça e conseqüentemente nos resultados coletados. Logo, para a melhoria dos erros

gerados, pode-se se atentar a todo e quaisquer tipos de ajustes mecânicos, seja de fixação ou alinhamento dos eixos.

Tabela 8: Índices CP e CPk para características isoladas – Cartesiana.

Características Dimensionais	Nominal	LIE -0,1	LSE +0,1	Média Amostrai	Desvio Padrão	CP	CPk
						$\geq 1,33$	$> 1,33$
LX1X2	90	89,9	90,1	90,029	0,0095	3,509	2,491
LY1Y2	90	89,9	90,1	89,598	0,1209	0,276	-0,833*
L1X	15	14,9	15,1	15,104	0,0178	1,873	-0,075*
L1Y	15	14,9	15,1	14,998	0,0171	1,949	1,910
L2X	15	14,9	15,1	15,101	0,007	4,762	-0,048*
L2Y	15	14,9	15,1	15,018	0,0083	4,016	3,293
L3X	15	14,9	15,1	15,134	0,0193	1,727	-0,587*
L3Y	15	14,9	15,1	15,088	0,0169	1,972	0,237
L4X	15	14,9	15,1	15,129	0,0162	2,058	-0,597*
L4Y	15	14,9	15,1	15,141	0,0089	3,745	-1,536*
DF1	10	9,9	10,1	9,661	0,0111	3,003	-7,177*
DF2	10	9,9	10,1	9,698	0,02	1,667	-3,367*
DF3	10	9,9	10,1	9,795	0,0156	2,137	-2,244*
DF4	10	9,9	10,1	9,7	0,0473	0,705	-1,409*
LP1	0,75	0,65	0,85	0,8197	0,0112	2,976	0,902
LP2	1	0,9	1,1	1,048	0,0115	2,899	1,507
LP3	1,25	1,15	1,35	1,2903	0,024	1,389	0,829
LP4	1,5	1,4	1,6	1,521	0,0168	1,984	1,567
LP5	1,75	1,65	1,85	1,792	0,0125	2,667	1,547
LP6	2	1,9	2,1	2,1293	0,0091	3,663	-1,073*
LP7	2,25	2,15	2,35	2,3453	0,032	1,042	0,049
LP8	2,5	2,4	2,6	2,561	0,0235	1,418	0,553
LP9	2,75	2,65	2,85	2,8633	0,0241	1,383	-0,184*
LP10	3	2,9	3,1	3,0987	0,0125	2,667	0,035
EP1	0,75	0,65	0,85	0,824	0,007	4,762	1,238
EP2	1	0,9	1,1	1,271	0,0165	2,020	-3,455*
EP3	1,25	1,15	1,35	1,389	0,0195	1,709	-0,667*
EP4	1,5	1,4	1,6	1,568	0,0182	1,832	0,586
EP5	1,75	1,65	1,85	1,918	0,012	2,778	-1,889*
EP6	2	1,9	2,1	2,151	0,019	1,754	-0,895*
Inclinação: Datum A - SI1	30,0	29,9	30,1	30,660	0,087	0,382	0,382
Inclinação: Datum A - SI2	45,0	44,9	45,1	45,539	0,121	0,276	0,276
Inclinação: Datum A - SI3	60,0	59,9	60,1	60,573	0,065	0,509	0,509

* Considerar "zero" para valor negativo.

Efeitos do tipo dinâmico podem acarretar distorções na estrutura da impressora, embora possuam baixa rigidez mecânica. Tal efeito pode surgir em decorrência da aceleração e desaceleração dos eixos, bem como na construção de geometrias cuja velocidade encontra-se em variação.

Conforme tabela 8, os índices de CP e CPk foram levantados isoladamente, com o objetivo de avaliar as características dimensionais semelhantes. Logo, considerando-se um

CP \geq 1,33 tem-se que somente os tamanhos LY1LY2, DF4, LP7 e os 3 ângulos, não atendem o requisito. São valores cujo desvio padrão apresentam uma grande dispersão se comparados aos limites máximos e mínimos estabelecidos, com isso tem-se um CP baixo.

Já os valores de CPk possuem mais de 80% cujo requisito não é atendido. Para os valores que assumiram sinal negativo, tem-se que a média está situada fora do campo de tolerância, ou seja, quanto maior o valor em módulo do CPk, mais distante está a média do limite de tolerância considerado. Diversos autores, igualam o valor de CPk à zero, para os casos onde o valor encontrado é negativo, pois argumentasse que não faz sentido ter uma capacidade negativa. Por fim, para que o processo seja considerado capaz, os dois índices devem atender suas especificidades. Logo, se a média se encontrar no “centro”, os valores de CP e CPk são iguais, caso contrário quanto maior a diferença entre os valores, mais deslocado em relação ao centro a dispersão gaussiana estará. Por fim, em apenas 18% das características dimensionais, o processo foi capaz de realizar.

7.2 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DOS PROCESSIONS FDM DELTA

7.2.1 Medições e Análise de Erros Encontrados

Os resultados dimensionais e geométricos das peças na máquina delta foram listadas na tabela 9, conforme explicitado para a máquina cartesiana. Para visualizar os valores das médias com relação as classes de tolerâncias, vide tabela 10. Já a tabela 11 mostras os índices de capacidade relacionados a cada característica.

Tabela 9: Resultados de medição Rostock Max V2.

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1 (mm)	Peça D2 (mm)	Peça D3 (mm)	Média Amostral	Amplitude
Base Quadrada [BQ]	Planeza: Datum B	/	0,144	0,157	0,102	0,134	0,055
	Planeza: Datum C	/	0,179	0,197	0,205	0,194	0,026
	Retitude: PLX2	/	0,056	0,055	0,063	0,058	0,008
	Retitude: PLY2	/	0,131	0,132	0,127	0,130	0,005
	Paralelismo: Datum B - PLX2	/	0,212	0,223	0,169	0,201	0,054
	Paralelismo: Datum C - PLY2	/	0,167	0,147	0,150	0,155	0,020
	/	LX1X2	89,877	90,082	90,093	90,017	0,216
	/	LY1Y2	89,385	89,584	89,550	89,506	0,199

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1	Peça D2	Peça D3	Média Amostral	Faixa de Desvio	Amplitude
			(mm)	(mm)	(mm)			
Cubos [CB]	Planeza: Cubo 1	/	0,096	0,055	0,055	0,069	0,041	/
	Planeza: Cubo 2	/	0,048	0,027	0,026	0,034	0,022	/
	Planeza: Cubo 3	/	0,073	0,079	0,103	0,085	0,030	/
	Planeza: Cubo 4	/	0,056	0,102	0,085	0,081	0,046	/
	/	L1X	15,042	15,078	15,061	15,060	0,036	0,0180
	/	L1Y	14,966	15,024	15,013	15,001	0,058	0,0308
	/	L2X	15,056	15,094	15,052	15,067	0,042	0,0232
	/	L2Y	14,932	15,050	14,962	14,981	0,118	0,0613
	/	L3X	14,967	15,005	14,992	14,988	0,038	0,0193
	/	L3Y	14,875	14,931	14,911	14,906	0,056	0,0284
/	L4X	15,031	15,010	15,023	15,021	0,021	0,0106	
/	L4Y	14,910	14,911	14,912	14,911	0,002	0,0010	

Geometrias	Caract. Geom.	Caract. Dimen.		Peça D1 (mm)			Peça D2 (mm)			Peça D3 (mm)			Média	Ampl.	Desvio Padrão
		Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	*	*			
Conjunto de Furos [CF]	Circularidade: DF1	/		0,111			0,216			0,379	0,235	0,268	/		
	Circularidade: DF2	/		0,091			0,071			0,119	0,094	0,048	/		
	Circularidade: DF3	/		0,073			0,745			0,663	0,494	0,672	/		
	Circularidade: DF4	/		0,219			0,259			0,133	0,204	0,126	/		
	Dist. Medição: 7,5 mm	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	Eixo-X	Eixo-Y	Desvio	*	*	*		
	Posição: DF1	9,953	9,972	0,109	10,051	9,972	0,116	10,008	9,955	0,091	0,106	0,025	0,0129		
	Posição: DF2	79,898	9,868	0,334	80,091	9,920	0,242	80,029	9,921	0,168	0,248	0,165	0,0828		
	Posição: DF3	80,090	79,599	0,822	80,150	79,405	1,227	80,173	79,469	1,117	1,055	0,405	0,2095		
	Posição: DF4	10,032	79,547	0,908	9,997	79,608	0,784	10,005	79,681	0,638	0,777	0,270	0,1352		
	/		DF1	9,775			9,743			9,726	9,748	0,049	0,0249		
/		DF2	9,670			9,736			9,662	9,689	0,074	0,0406			
/		DF3	9,763			9,459			9,616	9,613	0,304	0,1520			
/		DF4	9,804			9,690			9,797	9,764	0,114	0,0639			

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1	Peça D2	Peça D3	Média Amostral	Ampl.
			(mm)	(mm)	(mm)		
Furos Cilíndricos [FC]	Circularidade: FC1	/	0,073	0,511	0,522	0,369	0,4490
	Circularidade: FC2	/	0,204	0,151	0,126	0,160	0,0780
	Circularidade: FC3	/	0,252	0,225	0,202	0,226	0,0500
	Perpendicularidade: Datum A - FC1	/	0,137	0,417	0,462	0,339	0,3250
	Perpendicularidade: Datum B - FC2	/	0,201	0,053	0,035	0,096	0,1660
	Perpendicularidade: Datum C - FC3	/	0,402	0,225	0,564	0,397	0,3390

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1	Peça D2	Peça D3	Média Amostral	Amplitude	Desvio Padrão
			(mm)	(mm)	(mm)			
Conjunto de Paredes [CP]	/	LP1	0,949	0,988	0,984	0,974	0,039	0,0215
	/	LP2	1,011	1,016	1,015	1,014	0,005	0,0026
	/	LP3	1,346	1,337	1,352	1,345	0,015	0,0075
	/	LP4	1,535	1,537	1,572	1,548	0,037	0,0208
	/	LP5	1,837	1,871	1,881	1,863	0,044	0,0231
	/	LP6	2,206	2,171	2,178	2,185	0,035	0,0185
	/	LP7	2,450	2,342	2,370	2,387	0,108	0,0560
	/	LP8	2,623	2,632	2,685	2,647	0,062	0,0335
	/	LP9	2,867	2,995	3,396	3,086	0,529	0,2760
	/	LP10	3,053	3,300	3,895	3,416	0,842	0,4328

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1	Peça D2	Peça D3	Média Amostral	Amplitude	Desvio Padrão
			(mm)	(mm)	(mm)			
Conjunto de Nervuras – V [CN]	/	EP1	0,630	0,638	0,668	0,645	0,038	0,0200
	/	EP2	1,066	1,079	1,065	1,070	0,014	0,0078
	/	EP3	1,256	1,277	1,299	1,277	0,043	0,0215
	/	EP4	1,623	1,666	1,674	1,654	0,051	0,0274
	/	EP5	1,702	1,715	1,697	1,705	0,018	0,0093
	/	EP6	2,068	2,082	2,070	2,073	0,014	0,0076

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1	Peça D2	Peça D3	Média Amostral	Amplitude	Desvio Padrão
			(mm)	(mm)	(mm)			
Superfícies Inclinadas [SI]	Inclinação: Datum A - SI1	/	30,242°	30,116°	30,229°	30,196°	0,126°	0,0693
	Inclinação: Datum A - SI2	/	45,289°	45,050°	45,152°	45,164°	0,239°	0,1199
	Inclinação: Datum A - SI3	/	59,930°	59,900°	60,013°	59,948°	0,113°	0,0585

Geometrias	Características Geométricas	Características Dimensionais	Peça D1	Peça D2	Peça D3	Média Amostral	Amplitude
			(mm)	(mm)	(mm)		
Cilindro Escalonado [CE]	Cilindricidade: DI1	/	0,330	0,639	0,592	0,520	0,309
	Perpendicularidade: Datum A - DI1	/	0,083	0,458	5,595	2,045	5,512
	Circularidade: DE1	/	0,231	0,146	0,159	0,179	0,085
	Circularidade: DE2	/	0,186	0,252	0,114	0,184	0,138
	Circularidade: DE3	/	0,145	0,113	0,103	0,120	0,042
	Circularidade: DE4	/	0,099	0,100	0,080	0,093	0,020
	Circularidade: DE5	/	0,097	0,084	0,085	0,089	0,013
	Concentricidade: Datum D - DE1	/	0,364	0,258	5,042	1,888	4,784

Concentricidade: Datum D - DE2	/	0,456	0,586	6,024	2,355	5,568
Concentricidade: Datum D - DE3	/	0,272	1,285	19,999	7,185	19,727
Concentricidade: Datum D - DE4	/	0,172	2,015	33,992	12,060	33,820
Concentricidade: Datum D - DE5	/	0,295	2,487	47,877	16,886	47,582

Da mesma forma que as interpretações foram realizadas anteriormente, tem-se as seguintes subdivisões referentes à impressora Rostock Max V2:

- Base Quadrada [BQ]: Com relação aos erros de forma e orientação presentes, o valor de desvio máximo encontrado foi de 0,223 mm referente ao paralelismo entre Datum B – PLX2. As medidas de tamanhos externos apresentaram um desvio máximo de 90,093 mm e mínimo de 89,385 mm. Maior desvio encontrado na coordenada cartesiana X.
- Cubos [CB]: O maior erro de planicidade encontrado foi de 0,103 mm no Cubo 3. Já os valores da largura nas direções do plano XY, obtiveram variações próximas tanto para os valores máximos e mínimos. Diferença de 0,127 mm no eixo da abcissa e 0,175 mm no eixo da ordenada. Maior desvio em Y.
- Conjunto de Furos [CF]: O desvio máximo encontrado referente a circularidade foi de 0,745 mm em DF3, presume-se a existência de rebarbas devido o correto pós-processamento. Ao analisarmos os desvios de posição, tem-se que o maior desvio encontrado foi no furo DF3 com o valor de 1,117 mm e um menor desvio no furo DF1 de valor 0,091 mm, onde as maiores variações ocorrem em Y. Com relação ao maior diâmetro encontrado tem-se 9,804 mm em DF4 e um menor diâmetro em DF3, com o valor de 9,459 mm. Percebe-se como característica, furos subdimensionados.
- Furos Cilíndricos [FC]: O maior valor de cilíndricidade encontrado foi de 0,522 mm em CF1. Já o maior erro de perpendicularidade se deu em relação ao Datum C, cujo valor foi de 0,564 mm.
- Conjunto de Paredes [CP]: Dentre os valores de espessuras proposto ao padrão de teste, tem-se que a LP10 obteve maior desvio padrão no valor de 0,4328 mm e menor desvio padrão na parede LP2 com valor de 0,0026 mm.
- Conjunto de Nervuras – V [CN]: A espessura EP4 obteve o maior desvio padrão com valor de 0,0274 mm. Já o de menor desvio foi o EP6, valor de 0,0076 mm.
- Superfícies Inclinadas [SI]: Dentre os valores de ângulos o de 60° obteve melhor média e menor dispersão.

- Cilindro Escalonado [CE]: O maior valor de cilindridade encontrado no diâmetro interno foi de 0,639. A perpendicularidade em relação ao Datum A, obteve um maior valor de 5,595 mm. Já o menor erro de circularidade obtido foi de 0,252 mm no DE2 e maior valor de 47,877 no DE5 em relação a concentricidade do Datum D. Conforme pode ser visualizado na tabela, os valores medidos de concentricidade deram expressivos se comparados ao processo cartesiano. Ao analisar os padrões, questões como deformação e acabamento superficial da peça são notados visualmente. Presume-se também que os valores elevados do terceiro padrão, pode estar relacionado à erros de medição. Desta forma, algumas médias amostrais não foram utilizadas, em prol de desvios não tendenciosos, como por exemplo a perpendicularidade e concentricidade. Com isso, criou-se a tabela 10, para posterior comparação com a máquina cartesiana.

Tabela 10: Valor máximo das médias amostrais Rostock Max V2.

FORMA +0,1 mm				ORIENTAÇÃO +0,1 mm		LOCALIZAÇÃO +0,1mm
Retitude	Planeza	Circularidade	Cilindridade	Paralelismo	Perpendicularidade	Concentricidade
0,130	0,194	0,494	0,485	0,201	0,397	1,391

Os desvios de formas encontrados, obtiveram valores significativos em relação ao sistema cartesiano, onde as características de circularidade e cilindridade, foram aproximadamente três e cinco vezes maiores, respectivamente. Estes valores são decorrentes da deformação de camadas no cilindro escalonado, bem como nos furos cilíndricos orientados pelos eixos cartesianos XYZ.

Devido as imperfeições do processo em relação ao cilindro escalonado, gerando um aspecto do tipo deformado/derretido, o valor concentricidade obteve um desvio mais elevado, acarretando no valor de 1,391 mm, sendo este sete vezes maior que o processo cartesiano. Já a perpendicularidade obteve um valor em dobro, devido tais imperfeições.

Embora os filamentos do tipo PLA sejam resistentes em relação a maior parte das impressoras, tem-se que os derretimentos ocasionados são provenientes do superaquecimento do bico extrusor. Uma forma de correção para este problema, seria o controle de temperatura do bico.

Diferentemente dos valores obtido pela máquina cartesiana, tem-se que aproximadamente 50% das dimensões da configuração delta, não atenderam o requisito de $CP \geq 1,33$. Aproximadamente 85% dos valores de CPk não atenderam a especificação de $> 1,33$. Desta forma, apenas 15% das características dimensionais, foram realizadas dentro dos limites estipulados.

Tabela 11: Índices CP e CPk para características isoladas – Delta.

Características Dimensionais	Nominal	LIE -0,1	LSE +0,1	Média Amostrai	Desvio Padrão	CP	CPk
						$\geq 1,33$	$> 1,33$
LX1X2	90	89,9	90,1	90,017	0,216	0,154	0,128
LY1Y2	90	89,9	90,1	89,506	0,199	0,168	-0,660*
L1X	15	14,9	15,1	15,06	0,018	1,852	0,741
L1Y	15	14,9	15,1	15,001	0,0308	1,082	1,071
L2X	15	14,9	15,1	15,067	0,0232	1,437	0,474
L2Y	15	14,9	15,1	14,981	0,0613	0,544	0,440
L3X	15	14,9	15,1	14,988	0,0193	1,727	1,520
L3Y	15	14,9	15,1	14,906	0,0284	1,174	0,070
L4X	15	14,9	15,1	15,021	0,0106	3,145	2,484
L4Y	15	14,9	15,1	14,911	0,001	33,333	3,667
DF1	10	9,9	10,1	9,748	0,0249	1,339	-2,035*
DF2	10	9,9	10,1	9,689	0,0406	0,821	-1,732*
DF3	10	9,9	10,1	9,613	0,152	0,219	-0,629*
DF4	10	9,9	10,1	9,764	0,0639	0,522	-0,709*
LP1	0,75	0,65	0,85	0,974	0,0215	1,550	-1,922*
LP2	1	0,9	1,1	1,014	0,0026	12,821	11,026
LP3	1,25	1,15	1,35	1,345	0,0075	4,444	0,222
LP4	1,5	1,4	1,6	1,548	0,0208	1,603	0,833
LP5	1,75	1,65	1,85	1,863	0,0231	1,443	-0,188*
LP6	2	1,9	2,1	2,185	0,0185	1,802	-1,532*
LP7	2,25	2,15	2,35	2,387	0,056	0,595	-0,220*
LP8	2,5	2,4	2,6	2,647	0,0335	0,995	-0,468*
LP9	2,75	2,65	2,85	3,086	0,276	0,121	-0,285*
LP10	3	2,9	3,1	3,416	0,4328	0,077	-0,243*
EP1	0,75	0,65	0,85	0,645	0,02	1,667	-0,083*
EP2	1	0,9	1,1	1,07	0,0078	4,274	1,282
EP3	1,25	1,15	1,35	1,277	0,0215	1,550	1,132
EP4	1,5	1,4	1,6	1,654	0,0274	1,217	-0,657*
EP5	1,75	1,65	1,85	1,705	0,0093	3,584	1,971
EP6	2	1,9	2,1	2,073	0,0076	4,386	1,184
Inclinação: Datum A - SI1	30	29,9	30,1	30,196	0,0693	0,481	-0,462*
Inclinação: Datum A - SI2	45	44,9	45,1	45,164	0,1199	0,278	-0,178*
Inclinação: Datum A - SI3	60	59,9	60,1	59,948	0,0585	0,570	0,274

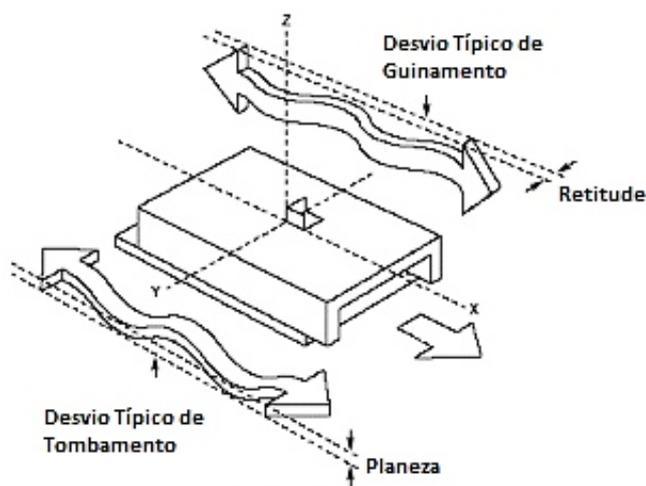
* Considerar zero para valor negativo.

8. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi analisada a precisão geométrica e dimensional de 6 peças denominadas no escopo deste trabalho como sendo padrões de teste. Tal padrão surgiu em relação à necessidade de avaliar a capacidade do processo FDM de duas impressoras com cinemáticas distintas. Para isso, realizou-se um estudo preliminar dos padrões de teste já existentes, com o objetivo de filtrar as características geométricas típicas que pudessem fornecer informações relevantes aos erros encontrados.

Por meio das medições realizadas, constatou-se que o processo FDM da máquina cartesiana, apresentou menores variações em relação a maioria das características geométricas relacionadas a classe de tolerância de *Forma*. Logo, se comparados à precisão do equipamento, tem-se que os valores se encontraram próximos ou dentro da especificação técnica. Já para as características de *Orientação* e *Localização*, o erro de Paralelismo obteve maior média na direção construtiva do eixo X, devido ao erro geométrico de retitude horizontal, sendo este vinculado ao desvio típico de guinamento, figura 92.

Figura 92: Desvios típicos.



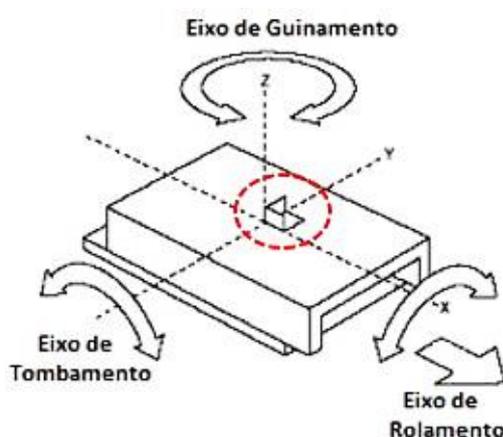
Fonte: Adaptado de ISO 230-2.

Ao analisar a máquina de cinemática delta, teve-se que apenas os erros de retitude e o de paralelismo foram inferiores ao da máquina cartesiana. Valores como o de circularidade, cilindridade e concentricidade foram aproximadamente 3, 5 e 7 vezes maiores, respectivamente que os encontrados na CR-20. Cabe ressaltar que grande parte da variabilidade existente nesses tipos de erros, são decorrentes das médias obtidas na medição da geometria referente ao cilindro escalonado [CE].

Por serem geometrias de aspecto circular, a construção das camadas ocorre por meio de uma variação do gradiente de velocidade, sendo esta aumentada de forma proporcional à medida que os diâmetros escalonados são obtidos. Logo, tais deformações podem ser oriundas do não sincronismo entre as velocidades dos eixos, que atuam de forma simultânea. Além disso, as deformações de aspecto derretido, podem ter ocorrido em função do superaquecimento do bico extrusor.

Já o erro de perpendicularidade, possui influência significativa na construção da peça e são gerados devido a não ortogonalidade dos eixos e/ou sistemas, figura 93. Para a impressora delta, faz-se necessário atentar-se aos alinhamentos das guias em relação à base de construção.

Figura 93: Perpendicularidade entre eixos.

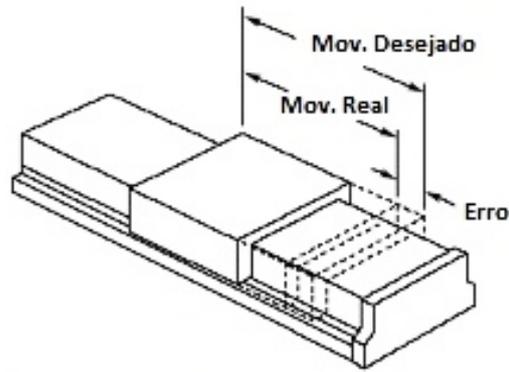


Fonte: Adaptado de ISO 230-2.

Por meio de análises de capacidade das características dimensionais, tem-se que a faixa de tolerância estipulada para ambas impressoras, se deu em relação a precisão dimensional da máquina cartesiana, sendo $\pm 0,1$ mm. A impressora CR-20, obteve influências significativas, advindas da coordenada Y. Em contrapartida, a impressora Rostock Max V2, apresentou influências das coordenadas XY. Logo, esses desvios podem estar relacionados com a precisão de posicionamento linear, por meio de folgas, figura 94.

Desta forma, em apenas 18% das características dimensionais a impressora CR-20 foi capaz de realizar, em relação aos valores de $CP \geq 1,33$ e $CPk > 1,33$. Já para a impressora Rostock Max V2, apenas 15% das características dimensionais, foram realizadas dentro das capacidades estipuladas.

Figura 94: Posicionamento linear.



Fonte: Adaptado de ISO 230-2.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se que os padrões de teste possuem grande importância na investigação do desempenho dos processos MA. Tem-se que a caracterização primária do sistema investigado ocorre por meio da construção e investigação do mesmo, onde uma das formas de aplicação é utilizando-a como uma peça de aceitação de contrato entre empresas e compradores de sistema MA. Além disso, pode ser utilizado na avaliação periódica dos processos, afim de auxiliar na realização de manutenção ou recalibração, conforme requisitos de qualidade, por exemplo. Diante as vantagens explicitadas, algumas recomendações são sugeridas, como:

- Aumento da taxa de amostragem das peças avaliadas.
- Utilização de outros métodos de medição como por exemplo: braço articulado de medição, scanner 3D, tomógrafo computadorizado, dentre outros.
- Aplicação do conceito de gestão dimensional, de modo a realizar ajustes em um padrão previamente criado. Desta forma, um segundo padrão é desenvolvido por meio de engenharia reversa, onde as regiões de maior criticidade estabelecerão a linguagem GD&T a ser adotada no plano de medição.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Giordano, M., Denimal, D., Germain, F., *A Method for three Dimensional Tolerance Analysis and Synthesis Applied to Complex and Precise Assemblies*, in: IFIP – International Federation for Information Processing, Vol. 260, Micro-Assembly Technologies and Applications, eds. Ratchev, S., Koelemeijer, S., Springer, Boston, pp. 55-65, 2008.
- [2] Wise, R., & Baumgartner, P. Go downstream: *the new profit imperative in manufacturing*. *Harvard Business Review*, 77(5), 133–141, 1999.
- [3] VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D* – São Paulo: Blucher, 2017.
- [4] VOLPATO, N.; COSTA, A. C. *Competências e recursos da Rede de Manufatura Aditiva (RMA) no Brasil*. Anais: VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Penedo-Itatiaia, 2013.
- [5] ASTM, F2792 – 12a. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, 2012.
- [6] BUENO, André. *Contribuições ao desenvolvimento de produtos sob medida utilizando engenharia reversa e Manufatura Aditiva*. 2012. 157 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, UFSC, 2012.
- [7] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens and M. Donmez, "Proposal for a Standardized Test Artifact for Additive Manufacturing Machines and Processes," in *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 2012.
- [8] Wohlers (Wohler's Associates). *3D Printing and additive manufacturing state of the industry: Annual worldwide progress report*. Fort Collins, CO, USA: Wohler's Associates, 2017.
- [9] H. E. Quinlan, T. Hasan, J. Jaddou, and A. J. Hart, *Journal of Industrial Ecology* 21, S15–S20, 2017.
- [10] Van Putte DA. *A brief benchmarking study of rapid prototyping processes*. Proceedings of the 3rd International Conference on Rapid Prototyping, Dayton (OH), USA, 1992.
- [11] Saqib S, Urbanic J. *An experimental study to determine geometric and dimensional accuracy impact factors for fused deposition modelled parts*. Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Springer Berlin, pp 293–298, 2012.

- [12] Williams CB, Seepersad CC. *Design for additive manufacturing curriculum: a problem-and project-based approach*. Proceedings of the 23rd Annual international solid freeform fabrication Symposium, Austin (TX), USA, pp 81–92, 2012.
- [13] Rodríguez-Prieto, Álvaro & Camacho, Ana & Aragón, Ana & Sebastián, Miguel & Yanguas-Gil, Angel. *Analysis of the current scenario of additive manufacturing standardization and certification*, 2018.
- [14] ISO/TC 261 and ASTM F42 AM. “*Joint plan for additive manufacturing standards development*”. International Standards Organization and American Society for Testing of Materials, West Conshohocken-PA (USA), 2013.
- [15] ISO – International Organization for Standardization. Available on: <https://www.iso.org/standard/67287.html>.
- [16] ASTM – American Society for Testing and Materials. Available on: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK55297.htm>.
- [17] Kelvin K. Jurens, “*Standards for Rapid Prototyping Industry*”, Rapid Prototyping Journal, MCB Volume 5, Issue 4, 1999.
- [18] Lara Rebaioli, Irene Fassi. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 93, Number 5-8, Page 2571, 2017.
- [19] SKA – Available on: <https://www.ska.com.br/ska/sobre-ska>.
- [20] Davidson, Gillian, and T.V. Narendran. *World Economic Forum Digital Transformation Initiative: Mining and Metals Industry*, 2017.
- [21] SKA – Available on: <https://www.ska.com.br/ska/blog/conheca-os-speakers-rodolpho-pereira>.
- [22] *Worldwide Manufacturing GDP*. World Economic. Available on: www.imf.org/en/Data#data.
- [23] David L. Bourell, Joseph J. Beaman, Jr, Ming C. Leu and David W. Rosen. *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*. Available on: www.rapidtech.itu.edu.tr.
- [24] J.E. Blather, “*Manufacture of Contour Relief Maps*”, US Patent 473,901, 1892.
- [25] B.V. Perera, “*Process of Making Relief Maps*”, US Patent 2,189,592, 1940.
- [26] E.E. Zang, “*Vitavue Relief Model Technique*”, US Patent 3,137,080, 1964.
- [27] T.A. Gaskin, “*Earth Science Teaching Device*”, US Patent 3,751,827, 1973.
- [28] K. Matsubara, “*Molding Method of Casting Using Photocurable Substance*”, Japanese Kokai Patent Application, Sho 51 [1976]-10813, 1974.

- [29] P.L. DiMatteo, "*Method of Generating and Constructing Three-Dimensional Bodies*", US Patent 3,932,923, 1976.
- [30] T. Nakagawa, et al, "*Blanking Tool by Stacked Bainite Steel Plates*", Press Technique, pp. 93-101, 1979.
- [31] F. Willème, "Photo-Sculpture", US Patent 43,822,1864.
- [32] C. Baese, "*Photographic Process for the Reproduction of Plastic Objects*", US Patent 774,549, 1904.
- [33] F.H. Monteah, "*Photochemical Process for Producing BAS Reliefs*", US Patent 1,516,199, 1924.
- [34] I. Morioka, "*Process for Manufacturing a Relief by the Aid of Photography*", US Patent 2,015,457, 1935.
- [35] O.J. Munz, "*Photo-Glyph Recording*", US Patent 2,775,758, 1956.
- [36] W.K. Swainson, "*Method, Medium and Apparatus for Producing Three-Dimensional Figure Product*", US Patent 4,041,476, 1977.
- [37] P.A. Ciraud, "*Process and Device for the Manufacture of any Objects Desired from any Meltable Material*", FRG Disclosure Publication 2263777, 1972.
- [38] R.F. Housholder, "*Molding Process*", US Patent 4,247,508, 1981.
- [39] H. Kodama, "*Automatic Method for Fabricating a Three-Dimensional Plastic Model with Photo Hardening Polymer*", Rev Sci Instrum, pp.1770-73, 1981.
- [40] A.J. Herbert, "Solid Object Generation", *Jour Appl Photo Eng.*, pag. 185-88, 1982.
- [41] MONTEIRO, Marco T. F. *A IMPRESSÃO 3D NO MEIO PRODUTIVO E O DESIGN: um estudo na fabricação de joias*. 2015.
- [42] HOPKINSON, N.; HAGUE, R. J. M.; DICKENS, P. M. *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.
- [43] GUO, N.; LEU, M. C. *Additive manufacturing: technology, applications and research needs*. Frontiers of Mechanical Engineering, v. 8, n. 3, p. 215-243. 2013.
- [44] RAYNA, Thierry; STRIUKOVA, Ludmila. *From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation*. Technological Forecasting & Social Change, Amsterdam, v.102, n. 1, p. 214-224, Jan. 2016.
- [45] A.T. Kearney – Global Management Consulting Firm. Available on: www.atkearney.com/operations-performance-transformation/article/?/a/3d-printing-and-the-future-of-the-us-economy-article.

- [46] HOPKINSON, N.; DICKENS, P. M. *Analysis of rapid manufacturing – Using layer manufacturing processes for production*. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, London, p.31–39, 2003.
- [47] Wohlers Report - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. ISBN 978-0-9913332-4-0, 2018.
- [48] T. Wohlers, Tracking Global Growth in Industrial-Scale Additive Manufacturing, Mary Ann Liebert, Inc., 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, Mar. 2014
- [49] HP - Hewlett-Packard. *3D Printing: ensuring manufacturing leadership in the 21st century*. Public/private partnerships pave the way to become the next global design and manufacturing leader, 2017.
- [50] GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer Heidelberg Dordrecht London, 2010.
- [51] Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. Available on: <https://blogs.solidworks.com/tech/2015/05/preparing-solidworks-models-3d-printing.html>.
- [52] USP São Carlos. Prof. Assoc. Mário Luiz Tronco. Available on: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3459951/mod_resource/content/1/Aula_Manufatura_Aditiva.pdf.
- [53] MA, D., LIN, F., CHUA, C., “*Rapid prototyping applications in medicine. Part 2: STL file generation and case studies*”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 18, n. 2, pp. 118–127, 2001.
- [54] Rodrigues, Vinícius & Zancul, Eduardo & Mançaneres, Cauê & Giordano, Caio & Salerno, Mario Sergio. *Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações*. GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas. 12. 1-34. 10.15675/gepros.v12i3.1657, 2017.
- [55] Hague, R., Campbell, I., & Dickens, P. Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Journal of Mechanical Engineering Science, 217(1), 25–30, 2003.
- [56] Atzeni, E., & Salmi, A. *Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62 (9-12), 1147–1155, 2012.

- [57] Garrett, B. *3D Printing: New Economic Paradigms and Strategic Shifts*. *Global Policy*, 5(1), 70–75, 2014.
- [58] ASTM F2792-12a, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies* (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. Available on: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>.
- [59] 3D Hubs. *Additive Manufacturing Technologies: An Overview*. Available on: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>.
- [60] Dassault Systèmes. *3DEXPERIENCE Marketplace*. Available on: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/3D-printing>.
- [61] Billy Wu, Connor Myant and Shoshana Z. Weider. *The value of additive manufacturing: future opportunities*. Briefing paper, No 2 September 2017. Available on: www.imperial.ac.uk/additive-manufacturing.
- [62] HOPKINSON, N.; DICKENS, P. M. *Analysis of rapid manufacturing – Using layer manufacturing processes for production*. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, London, p.31–39, 2003.
- [63] 3D Hubs. *Introduction FDM 3D Printing*. Available on: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>.
- [64] *Manual do Slic3r*. Available on: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings#infill-patterns>.
- [65] Medium. *GUIA: A tecnologia de impressão 3D*. Available on: <https://medium.com/bsbfablab/guia-a-tecnologia-de-impress%C3%A3o-3d-2d8b6b8cb5e5>.
- [66] F. Baumann and D. Roller, “*Vision based error detection for 3D printing processes*”, 2016 Int. Conf. Front. Sensors Technol. (ICFST 2016), vol. 3, pp. 1–9, 2016.
- [67] Zhu Z, Keimasi S, Anwer N, Mathieu L, Lihong Q. *Review of Shape Deviation Modeling for Additive Manufacturing*. In: *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. Springer International Publishing, p. 241-250, 2017.
- [68] ARMILLOTTA, A. *Assessment of surface quality on textured FDM prototypes*. *Rapid Prototyping Journal*, v. 12, n. 1, p. 35-41, 2006.
- [69] Gunaydin, Kadir & S. Türkmen, Halit. *Common FDM 3D Printing Defects*, 2018.
- [70] R. Song and C. Telenko, “*Material Waste of Commercial FDM Printers under Realistic Conditions*,” in *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, Austin, TX, USA, 2016.

- [71] WENBIN, H.; TSUI, L. Y.; HAIQING, G. *A study of the staircase effect induced by material shrinkage in rapid prototyping*. Rapid Prototyping Journal, v. 11, n. 2, p. 82-89, 2005.
- [72] Taufik, Mohammad & Jain, Prashant. *Laser assisted finishing process for improved surface finish of fused deposition modelled parts*. Journal of Manufacturing Processes. 30. 10.1016/j.jmapro.2017.09.020, 2017.
- [73] Lieneke, Tobias & Adam, Guido & Leuders, Stefan & Knoop, Frederick & Josupeit, Stefan & Delfs, Patrick & Funke, Nils & Zimmer, Detmar. *Systematical Determination of Tolerances for Additive Manufacturing by Measuring Linear Dimensions*, 2015.
- [74] LEUTENECKER-TWELSIEK, Bastian; KLAHN, Christoph; MEBOLDT, Mirko. *Considering part orientation in design for additive manufacturing*. Procedia CIRP, v. 50, p. 408-413, 2016.
- [75] S. Danjou, *Mehrzieloptimierung der Bauteilorientierung für Anwendungen der Rapid-Technologie*, 1st Edition, Cuvillier, Göttingen, 2010.
- [76] SOUSA, A.R. *Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica de Centros de Usinagem*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- [77] KEAVENEY, Shane; CONNOLLY, Pat; O'CEARBHAILL, Eoin D. *Kinematic error modeling and error compensation of desktop 3D printer*. Nanotechnology and Precision Engineering, v. 1, n. 3, p. 180-186, 2018.
- [78] S. Song, A. Wang, Q. Huang and F. Tsung, "Shape deviation modeling for fused deposition modeling processes," *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Taipei, pp. 758-763, 2014.
- [79] CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. *Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age*. Rapid Prototyping Journal, v. 18, n. 4, p. 255-258, 2012.
- [80] PADT 2016. Introduction to Additive Manufacturing (AM). July 2016. Dhruv Bhate, Ph.D. Senior Technologist, PADT Inc. Available on: http://www.padtinc.com/blog/wp-content/uploads/2016/08/PADT-Introduction-to-Additive-Manufacturing-2016_07_29-1.pdf.
- [81] AEROFLAP – Available on: <https://www.aeroflap.com.br/ge-celma-da-manutencao-aos-motores-made-brazil/>.
- [82] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Martina, F. *Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints*. C I R P Annals, 24, 2016.

- [83] The LEAP Engine. Available on: www.cfmaeroengines.com/engines/leap.
- [84] 3D printing creates new parts for aircraft engines. Available on: www.geglobalresearch.com/innovation/3d-printingcreates-new-parts-aircraft-engines.
- [85] Grunewald, S. J., The Rolls-Royce Phantom now has more than 10,000 3D printed parts, BMW looks to expand use across entire line of cars. Available on: www.3dprint.com/142364/3d-printed-parts-bmw.
- [86] Molitch-Hou, M., 6 industries changed forever by 3D printing. Available on: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13689>.
- [87] HYPEBEAST - The Sneaker Lab by Andy Chiu: Dissecting the adidas 3D Runner. Available on: <https://hypebeast.com/2016/12/the-sneaker-lab-dissecting-the-adidas-3d-runner>.
- [88] WEG AUTOMAÇÃO – Critical Power. Available on: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Critical-Power/c/BR_WDC_CP.
- [89] Bikas H., Stavropoulos P. and Chryssolouris G. "*Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*". International journal of advanced manufacturing technology, 83 (1-4), 389-405, 2016.
- [90] Spears T.G., Gold, S.A. "*In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing*". Integrating materials and manufacturing innovation, 2016.
- [91] Rodríguez-Prieto, Álvaro & Camacho, Ana & Aragón, Ana & Sebastián, Miguel & Yanguas-Gil, Ángel. Analysis of the current scenario of additive manufacturing standardization and certification, 2018.
- [92] Kelvin K. Jurrens, 'Standards for Rapid Prototyping Industry', Rapid Prototyping Journal, MCB Volume 5, Issue 4, 1999.
- [93] Mahesh M. *Rapid prototyping and manufacturing benchmarking*. PhD Thesis, National University of Singapore, 2004.
- [94] Rebaioli, Lara & Fassi, Irene. *A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 10.1007/s00170-017-0570-0, 2017.
- [95] Childs THC, Juster NP. Linear and geometric accuracies from layer manufacturing. CIRP Ann - Manuf Technol 43(1): 163–166, 1994.
- [96] Reeves PE, Cobb RC. Surface deviation modeling of LMT processes—a comparative analysis. Proceedings of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Helsinki, Finland, pp 59–77, 1995.

- [97] F. Xu, Y. S. Wong, H. T. Loh. Toward Generic Models for Comparative Evaluation and Process Selection in Rapid Prototyping and Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 5: 283-296, 2000.
- [98] J.-P. V. Kruth, B.; Van Vaerenbergh, J.; Mercelis, P., Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques, *Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI)*, Gent, Belgium, April 20-23, 2005.
- [99] Moylan S, Slotwinski J, Cooke A, Jurrens K, Donmez MA. Proposal for a standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes *Proceedings of the 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin (TX), USA, pp 902-920, 2012.
- [100] Lanzotti A, Del Giudice DM, Lepore A, Staiano G, Martorelli M. On the geometric accuracy of RepRap open-source three-dimensional printer. *J Mech Des* 137(10):101703. doi:10.1115/1.4031298, 2015.
- [101] Islam MN, Sacks S. An experimental investigation into the dimensional error of powder-binder three-dimensional printing. *Int J Adv Manuf Technol* 82(5–8):1371–1380. doi:10.1007/s00170-015-7482-7, 2016.
- [102] Zach Dunham. Toward Better 3D Printers: A New Test From Autodesk and Kickstarter. Available on: <https://www.kickstarter.com/blog/toward-better-3d-printers-a-new-test-from-autodesk-and-kickstart?ref=section-design-tech-promo-improving-our-3d-printer-community>.
- [103] Mark J. Anderson, Patrick J. Whitcomb, “DOE Simplified”, Productivity Inc., 2000.
- [104] Baya, V. and Earls, A. (2014). The Road ahead for 3-D Printers. Available on: <https://usblogs.pwc.com/emerging-technology/the-road-ahead-for-3d-printing/>.
- [105] ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André Roberto de. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*.1. Ed. Barueri: MANOLE, 2008.
- [106] VALDÉS, R. A.; DI GIACOMO, B.; PAZIANI, F. T. *Synthesization of thermally induced errors in coordinate measuring machines*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 27, n. 2, p. 170-177, 2005.
- [107] MAAS, GLÁUCIO A. *A tecnologia de medição por coordenadas na solução de problemas da indústria: sistematização de informações e do processo metrológico do laboratório prestador de serviços*. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial – UFSC. Florianópolis, 2001.
- [108] Neto, Gilberto Strafacci. *GD&T: Por quê?* Available on: https://www.setecnet.com.br/includes/GDeT_Porque.pdf

[109] GD&TBASICS. Available on: <https://www.gdandtbasics.com/true-position/>.

[110] ESSS. Introdução à Manufatura Aditiva. Descubra como otimizar produtos por meio da Manufatura Aditiva. Available on: <https://www.esss.co/biblioteca-tecnica/webinar-introducao-a-manufatura-aditiva/>.

[110] ESSS. Introdução à Manufatura Aditiva. Descubra como otimizar produtos por meio da Manufatura Aditiva. Available on: <https://www.esss.co/biblioteca-tecnica/webinar-introducao-a-manufatura-aditiva/>.

[111] NUTEC Mechatronic Systems. Available on: <https://nutec1.com/resources/accuracy-repeatability-and-iso-230-2/>.