



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Isabelle Therezinha Simão

UTILIZAÇÃO DE PEÇAS PADRÃO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS  
GEOMÉTRICOS GERADOS EM PROCESSOS DE FUSÃO SELETIVA A LASER

JOINVILLE

2019

Isabelle Therezinha Simão

UTILIZAÇÃO DE PEÇAS PADRÃO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS  
GEOMÉTRICOS GERADOS EM PROCESSOS DE FUSÃO SELETIVA A LASER

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

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Campos Porath

Joinville

2019

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

Simão, Isabelle Therezinha

Utilização de peças padrão para avaliação de erros geométricos gerados em processos de fusão seletiva a laser / Isabelle Therezinha Simão ; orientador, Maurício de Campos Porath, 2019.

81 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. manufatura aditiva. 3. fusão seletiva a laser. 4. erros geométricos. 5. peças padrão. I. Porath, Maurício de Campos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Isabelle Therezinha Simão

**Título:** Utilização de peças padrão para avaliação de erros geométricos gerados em processos de fusão seletiva a laser

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

Profa, Sueli Fischer Beckert, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Maurício Sacchelli, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Thiago Soares Pereira, Dr.  
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI – Santa Catarina

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

---

Prof. Dr. Regis Kovacs Scalice  
Coordenador do Programa

---

Prof. Dr. Maurício de Campos Porath  
Orientador

Joinville, 5 de agosto de 2019.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas e professores, em especial ao Professor Maurício de Campos Porath, pela dedicação, paciência e orientação neste trabalho, pelo incentivo para a realização do mestrado e por todo o apoio nesse período.

Aos amigos Dr. Edson Costa Santos, Msc Sabrina Marques e Tiago Carlos Guerra pela ajuda e dedicação na execução deste trabalho, desde o início.

A minha família, em especial ao meu anjo da guarda Daniel de Aviz que sempre me apoiou e ajudou durante esses dois anos de caminhada.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Laser pela disponibilidade dos laboratórios.

Aos colegas Gustavo Reis Ascensão, Saulo Melotti, Paulo Gaspar, Sabrina Bodziak, Bruno Zluhan, Luiz Fontanella, Henrique Rodrigues, Victor Chastinetti, Dinor Martins Junior.

Ao Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação – Fundes pela concessão de bolsa de mestrado

Se você quer ser bem sucedido na vida, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si. (Ayrton Senna)

## RESUMO

Ensaio geométricos são comumente realizados em máquinas-ferramenta para a garantia da qualidade dimensional de peças usinadas, pois permitem a tomada de ações preventivas e corretivas para otimizar a exatidão de trabalho destas máquinas. No entanto, em manufatura aditiva, esse assunto é muito pouco explorado visto que esta abrange técnicas que produzem componentes ou produtos definitivos por fabricação gradual ou por adição de matéria prima, diferente da usinagem que é denominada técnica subtrativa. Além disso, os ensaios necessários para determinar os erros deste tipo de máquina apresentam dificuldades operacionais e econômicas que desmotivam a prática de ensaios geométricos periódicos. Neste trabalho é proposto um procedimento para avaliação de processos de FSL utilizando peças padronizadas. Combinando a tecnologia de medição por coordenadas com a utilização destes padrões, um procedimento de teste é idealizado e implementado.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Fusão seletiva a laser. Peças padronizadas.

## **ABSTRACT**

Geometrical tests are commonly performed on machine tools to assure dimensional quality of machined parts, as they enable preventive and corrective actions to optimize the working accuracy of these machines. However, in additive manufacturing, this subject is very little explored since it covers techniques that produce definitive components or products by gradual manufacture or by addition of raw material, different from machining that is called subtractive technique. In addition, the tests necessary to determine the errors of this type of machine present operational and economic difficulties that discourage the practice of periodic geometric tests. In this work, a procedure will be proposed to evaluate SLM processes using standardized parts. By combining coordinate measurement technology with the use of these standards, a test procedure will be designed and implemented.

**Keywords:** Additive Manufacturing. Selective laser melting. Standard parts.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais etapas da manufatura aditiva. ....	18
Figura 2. Classificação dos métodos de MA para fabricação direta a laser de peças metálicas. ....	20
Figura 3. Representação da fabricação por fusão seletiva a laser. ....	21
Figura 4. Influência dos parâmetros FSL.....	22
Figura 5. Artefato de teste nomeado como "quadrado-diamante quadrado" para centros de usinagem. ....	26
Figura 6. Peça padrão para avaliação de diferentes técnicas de MA.....	28
Figura 7. Peça padrão apresentando diferentes características. ....	29
Figura 8. Peça padrão apresentando paredes finas e peça padrão caracterizada por cilindros inclinados, respectivamente. ....	29
Figura 9. Peça padrão apresentando superfícies planas e diferentes inclinações.....	30
Figura 10. a. Utilização de geometrias conhecidas – 10. b. Peça padrão utilizando método de Taguchi para otimização de parâmetros.....	30
Figura 11. Artefato proposto com dimensões de 50mm x 50mm x 9mm.....	31
Figura 12. Vistas do modelo proposto por Yasa et al. (2001). ....	32
Figura 13. Peça projetada por Castillo (2005) com dimensões de 60mm x 100mm x 81mm.....	32
Figura 14. Avaliação de geometria mínima e precisão dimensional.....	33
Figura 15. Avaliação de diâmetros e distâncias de elementos, respectivamente. ....	34
Figura 16. Avaliação de superfície utilizando o método de comparação entre modelo fabricado e modelo CAD. ....	35
Figura 17. Representação da fabricação por fusão seletiva a laser de um modelo não padronizado (a), comparação entre modelo fabricado e modelo digital (b). ....	36
Figura 18. Fluxograma de etapas do processo. ....	38
Figura 19. Conceito de peça padrão com detalhes nas faces superior e lateral. ....	44
Figura 20. Conceito de peça padrão com a representação de diferentes tamanhos de cilindros. ....	44
Figura 21. Modelo conceitual 3D. ....	45
Figura 22. Modelo conceitual.....	46
Figura 23. Software planejador com o posicionamento das peças no substrato de fabricação – equipamento A. ....	49

Figura 24. Software planejador com o posicionamento das peças no substrato de fabricação – equipamento B. ....	49
Figura 25. Remoção do pó após fabricação de peças – Equipamento A. ....	51
Figura 26. Remoção do pó após fabricação de peças – Equipamento B. ....	51
Figura 27. Fluxograma do procedimento para medição.....	52
Figura 28. Morsa para fixação da peça padrão. ....	53
Figura 29. Orientação da peça padrão. ....	53
Figura 30. Apalpador utilizado para medição das peças padrão.....	54
Figura 31. Iniciar qualificação. ....	55
Figura 32. Indicação da referência primária. ....	56
Figura 33. Indicação da referência secundária.....	56
Figura 34. Indicação da referência terciária. ....	57
Figura 35. Indicação da medição de diâmetros internos. ....	59
Figura 36. Indicação da medição de espessuras de parede.....	59
Figura 37. Indicação da medição de largura de rasgos. ....	60
Figura 38. Indicação da medição de cilindros.....	60
Figura 39. Indicação da medição de diâmetros na face lateral.....	61
Figura 40. Peças padrão fabricadas no Equipamento A.....	64
Figura 41. Peças padrão fabricadas no Equipamento B.....	64
Figura 42. Erros obtidos nos diâmetros fabricados na face superior.....	66
Figura 43. Erros obtidos nas medições das espessuras de parede. ....	67
Figura 44. Erros obtidos nas medições das larguras de rasgos.....	67
Figura 45. Erros obtidos nas medições dos diâmetros laterais. ....	68
Figura 46. Comparativo entre equipamentos.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos processos de MA. ....	19
Tabela 2. Resultado da comparação par a par. ....	42
Tabela 3. Resultado das interações entre função de requisito e princípio de solução. .....	43
Tabela 4. Parâmetros a serem preenchidos no software de planejamento.....	50
Tabela 5. Indicação das geometrias e ordem para medição.....	58
Tabela 6. Parâmetros de construção utilizados no equipamento A. ....	65
Tabela 7. Parâmetros de construção utilizados no equipamento B. ....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
AM	Additive manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer aided design
CNC	Comando numérico computadorizado
FSL	Fusão seletiva a laser
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SLM	Selective laser melting
STL	Stereolitografia
UV	Ultra Violeta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA .....	18
2.2	FUSÃO SELETIVA A LASER.....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Parâmetros do processo</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Matéria prima</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Aplicações do processo FSL</b> .....	<b>23</b>
2.3	AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DIMENSIONAL DE PROCESSOS PRODUTIVOS.....	24
2.4	EXATIDÃO GEOMÉTRICA DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA.....	26
2.5	RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DA PEÇA PEDRÃO</b> .....	<b>40</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO.....	40
4.2	LISTA DE REQUISITOS .....	40
4.3	PRINCÍPIO DE SOLUÇÕES .....	42
4.4	PROJETO CONCEITUAL.....	43
4.5	PROJETO DETALHADO .....	45
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO, MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO</b> .....	<b>48</b>
5.1	PROCEDIMENTO DE FABRICAÇÃO .....	48
5.2	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO .....	52
5.3	PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO .....	61
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>71</b>
	<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO – MMC</b> .....	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas de manufatura aditiva (MA), atualmente, têm atraído diversos setores da indústria moderna, principalmente quando se fala em fabricação aditiva de materiais metálicos.

A fabricação de um objeto inicia-se com a criação de um modelo tridimensional (3D) da peça, gerado em um programa CAD (computer aided design). A geometria CAD é convertida em uma malha triangular, conhecida como formato STL (stereolitografia) que posteriormente é enviado para o software da máquina que produzirá a peça através da deposição de material camada por camada (PRINZ, 1997; KRUTH et al., 2005; CHUA, LEONG e LIM, 2010).

Dentre as diversas tecnologias de manufatura aditiva, a fusão seletiva a laser - FSL (selective laser melting – SLM) vem se destacando. Esse processo consiste da fusão completa de um pó metálico a partir do escaneamento de um feixe de laser sobre a superfície de uma fina camada de pó previamente depositada sobre um substrato. O processo de formação continua ao longo da direção de varredura do feixe de laser. Cada camada da peça é sequencialmente preenchida com filetes alongados de pó fundido. Entre as tecnologias de MA, a FSL é uma tecnologia única para produzir objetos a partir de pó metálico com geometria complexa e propriedades mecânicas comparáveis às do material a granel (YADROITSEV e BERTRAND, 2010). Essa particularidade tem o objetivo de criar peças metálicas com características muito próximas de outros processos como por exemplo fundição ou forjamento, possibilitando a produção de geometrias complexas. (ABE et al., 2001; BADROSSAMAY e CHILDS, 2007; YADROITSEV e SMUROV, 2011). Desta forma, abrem-se novas perspectivas para o desenvolvimento de componentes metálicos, os quais seriam inviáveis ou de difícil fabricação por métodos convencionais.

Embora a tecnologia de FSL proporcione muitas vantagens, para que haja qualidade nas peças construídas, faz-se necessário o conhecimento da capacidade do equipamento de fabricação, sendo este um assunto muito pouco abordado pela comunidade científica (YADROITSEV, BERTRAND e SMUROV, 2007; COOKE e

SOONS, 2010). Segundo Groove, 2014, uma das principais limitações de diversos processos de manufatura aditiva está relacionada a baixa exatidão geométrica das peças fabricadas.

Muitos pesquisadores como Campanell, Contuzzi e Ludovico, 2010; Fahad e Hopkinson, 2012 e Keller e Mendricky, 2015 vêm adotando “peças padronizadas” para comparar a capacidade de diversas tecnologias, auxiliando assim na escolha do melhor processo para as respectivas aplicações. Grande parte dos fabricantes de máquinas de manufatura inclusive utilizam este tipo de procedimento, que não é normatizado, para identificar as limitações de seus processos antes mesmo de comercializá-los. No entanto, os diversos trabalhos encontrados na literatura sobre o assunto não abordam resultados quantitativos quanto ao processo de avaliação de erros geométricos gerados pelo sistema FSL.

Outra dificuldade percebida está relacionada às técnicas de medição utilizadas para verificação destas peças padronizadas, que podem até fornecer resultados completos e confiáveis, entretanto, de custo elevado. Portanto, a existência de uma ou mais técnicas de ensaios com características tais como praticidade, confiabilidade e custo acessível seria um grande motivador para a realização de ensaios de avaliação do desempenho geométrico de tecnologias de MA e portanto garantir a qualidade das peças fabricadas por estes processos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Propor e validar um processo de avaliação da exatidão de processos FSL através da fabricação e medição de uma ou mais peças padrão.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Visando o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar características geométricas usuais e erros geométricos típicos em peças fabricadas por fusão seletiva a laser;
- b) Desenvolver um novo modelo de peça padrão;

- c) Definir diretrizes para fabricação da peça padrão;
- d) Definir diretrizes para a medição da peça padrão;
- e) Estabelecer critérios para avaliação dos resultados;
- f) Validar o procedimento proposto através de um estudo de caso.

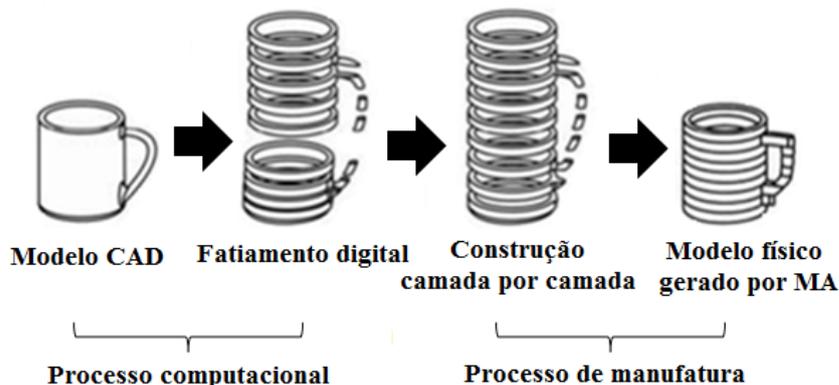
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as principais teorias que fundamentam a pesquisa apresentada nesta dissertação de mestrado. São descritas informações a respeito do processo de manufatura aditiva bem como à técnica de fusão seletiva a laser, materiais, aplicações e estudos relacionados ao tema específico dessa dissertação.

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

De acordo com a Sociedade Americana de Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials – ASTM), a MA é definida como um processo de união de materiais, camada por camada, a partir de dados de modelos 3D a fim de gerar novos objetos (EVERTON et al., 2016; ISO ASTM 52900, 2015). Inicialmente, os modelos digitais são fatiados em seções transversais e posteriormente reproduzidos camada a camada em processos automatizados de manufatura, conforme adaptação na Figura 1 abaixo (MELLOR et al., 2013).

Figura 1. Principais etapas da manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Volpato, 2007.

A espessura das camadas variam conforme pré-estabelecido via software, dentro de uma faixa específica para cada tecnologia. Em seguida, o modelo é enviado para a máquina e inicia-se o processo de fabricação. A MA permite a fabricação de modelos livres e com geometrias complexas, reduzindo significativamente o tempo de espera. Além disso são vantajosas economicamente quando se tratando de peças individuais ou lotes pequenos (GUO e LEU, 2013; WATERMAN e DICKENS, 1994). Observa-se aplicações nos segmentos

aeroespacial, automotivo, biomédico, design e arquitetura e até mesmo na fabricação de ferramentas, moldes e matrizes (GUO e LEU, 2013; PHAM e DIMOV, 2003).

Ainda, de acordo com a ASTM, a MA é classificada em sete categorias, conforme apresentado na Tabela 1. A diferença entre estes processos é a tecnologia utilizada para fabricação bem como a forma como cada camada é adicionada (Tabela 1).

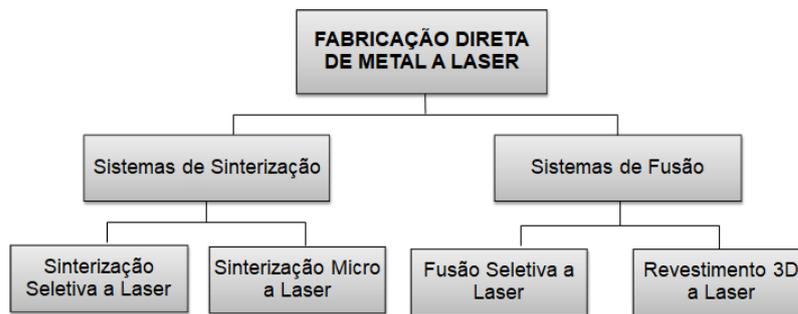
Tabela 1. Classificação dos processos de MA.

<b>Categoria</b>	<b>Processo/Tecnologia</b>	<b>Material</b>
Fotopolimerização	Estereolitografia	Resinas curáveis por laser ultra violeta (UV), ceras, materiais cerâmicos
Jato de Material	Modelação por Jato Múltiplo	Resinas curáveis por UV, ceras
Jato ligante	3D Printing	Compósitos, polímeros, cerâmicos, metais
Extrusão de material	Modelagem por extrusão de Plástico	Termoplásticos e ceras
Fusão em camadas de pó	Sinterização Seletiva a Laser	Termoplásticos e metais
	Fusão Seletiva a Laser	Metais
	Fusão por Feixe de Elétrons	Metais
Laminação de Folhas	Fabricação de Objetos por camadas	Papel, metais e termoplásticos
Deposição de energia direta	Deposição de Metal a Laser	Metais
	Fabrico Aditivo por Feixe de Elétrons	Metais

Fonte: Adaptado de MONTEIRO, 2015

A Figura 2 mostra a classificação da MA para a fabricação direta de peças a base de pó metálico. Os métodos principais da manufatura aditiva de metais podem ser divididos em: processos em que o pó é apenas sinterizado e processos em que o pó é totalmente fundido (LEVY, SCHINDEL e KRUTH, 2003; SANTOS et al. 2006).

Figura 2. Classificação dos métodos de MA para fabricação direta a laser de peças metálicas.



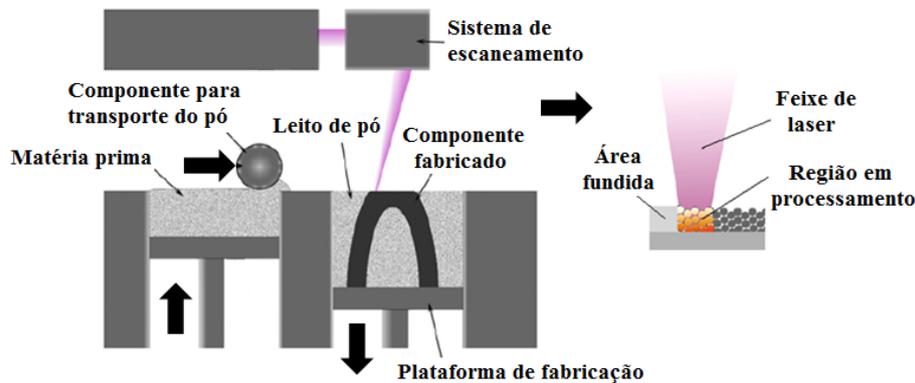
Fonte: Adaptado de SANTOS et al. 2006

Um grande número de tecnologias de MA foram sendo aperfeiçoadas nos últimos 20 anos, afim de melhorar e otimizar os processos industriais. Os mesmos podem ser classificados conforme os seus respectivos métodos de fabricação, tais como a base de laser (polimerização e fusão), via extrusão, jateamento de material e até mesmo através de feixe de elétrons (BIKAS et al., 2016). Atualmente os métodos que envolvem materiais metálicos estão ganhando destaque perante aos demais, em especial a Fusão Seletiva a Laser, por possibilitar a fabricação de peças definitivas customizadas, com alta complexidade e diferentes possibilidades de materiais (MARQUES, 2014).

## 2.2 FUSÃO SELETIVA A LASER

Dentre as técnicas de MA existentes, a fusão seletiva a laser – FSL baseia-se no princípio de fabricação de peças complexas a partir da varredura de um feixe de laser de estado sólido (diodo de Nd:YAG) sobre a superfície de uma fina camada de pó previamente depositada sobre um substrato. Cada camada da peça é preenchida com filetes de pó fundido e este processo de formação continua ao longo da direção de varredura do laser até a finalização da peça (YANG et al., 2016; PUDEK e RAPACZ-KMITA, 2016; OSAKADA e SHIOMI, 2006).

Figura 3. Representação da fabricação por fusão seletiva a laser.



Fonte: Adaptado de YADROITSEV e SMUROV, 2011

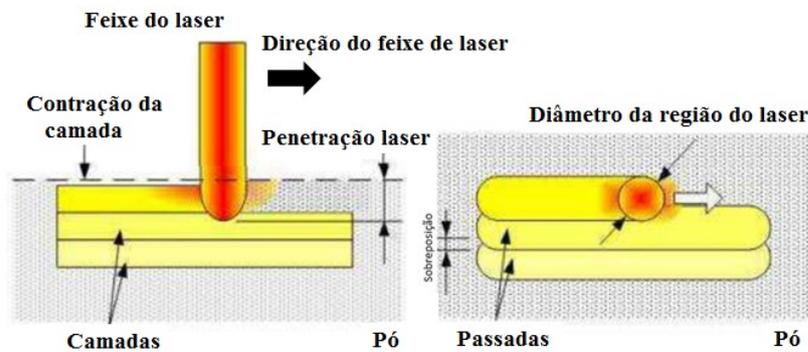
Uma vez que os objetos fabricados via FSL são construídos camada por camada, sequencialmente preenchidos com filetes alongados de pó fundido, a morfologia desta camada determinará as propriedades do produto final, principalmente da geometria do modelo. (YADROITSEV e SMUROV, 2011).

Este tipo de processo de fabricação requer a presença de estruturas de suporte externo e muitas vezes de suporte interno, dependendo da geometria definida. Isso ocorre com o próprio material do modelo, a fim de corrigir a peça de qualquer erro da plataforma de construção e impedir empenamentos ou defeito de camadas, principalmente em casos de detalhes internos ou peças em ângulos (CALIGNANO et al., 2016 e BAEL et al., 2011). Esses fenômenos ocorrem justamente por tratar-se de uma tecnologia que opera sob altas temperaturas, fazendo com que ocorra a expansão e contração dos modelos fabricados, podendo provocar assim gradientes de tensões que, conseqüentemente, empenarão a peça. Diferentes estruturas de suporte podem ser desenvolvidas, dependendo da geometria das peças, de modo que alcancem a melhor combinação entre tamanho do modelo e volume do suporte, afim de obter rápida fabricação e facilidade de remoção (CALIGNANO, 2016; STRANO et al., 2013 e YANG et al., 2012).

### 2.2.1 Parâmetros do processo

Segundo Yadroitsev e Smurov, 2011, o processo de FSL é definido por parâmetros de processamento de grande efeito sob as propriedades mecânicas do modelo a ser originado, tais como: potência do laser, diâmetro do feixe do laser, velocidade de varredura, espessura da camada, estratégia de movimentação (orientação dos filetes formadores das camadas), sobreposição dos filetes e a atmosfera protetora. A figura 4 ilustra alguns dos parâmetros citados.

Figura 4. Influência dos parâmetros FSL.



Fonte: Adaptado de YADROITSEV e SMUROV, 2011

Zhang, Dembinski e Coddet (2013) investigaram a formação dos filetes com diferentes parâmetros, os efeitos dos parâmetros da câmara de fabricação sobre a densidade e a precisão das peças fabricadas ao estudarem peças de aço inoxidável 316L fabricadas por FSL. Através de amostras fabricadas em diferentes orientações, analisaram as curvas tensão-deformação para produzir peças com alta densidade e com propriedades mecânicas desejadas.

A análise dos filetes individuais indicou que uma alta potência do laser e baixa velocidade de escaneamento podem conduzir para um baixo ângulo de contato com a camada anterior e fraca ligação entre os filetes (ZHANG, DEMBINSKI e CODDER, 2013). Os autores não apresentaram conclusões sobre a influência do acabamento superficial do substrato e espessura da camada de pó na qualidade dos filetes.

### **2.2.2 Matéria prima**

Quanto aos materiais a serem processados, todos devem ser transformados em pó com formato esférico que devem exibir determinadas características de escoamento. O pó metálico para processamento por FSL é normalmente fabricado por atomização gasosa ou processo a plasma por eletrodo rotativo (PREP). Durante o processo de atomização a gás, o material fundido é atomizado em gotas finas de metal, por meio de jatos de gás inerte, que resfriam durante a sua queda. Esse processo permite a fabricação de metal em pó de alta qualidade (ERASTEEL, 2014). No processo a plasma, o pó é formado a partir de um tarugo ou fio que é rotacionado e fundido em alto vácuo por um arco de plasma. Como exemplo de matéria prima utilizada, pode-se citar os aços inoxidáveis, aços ferramenta, ligas cobalto-cromo, alumínio, cobre e também ligas de titânio (FISCHER et al., 2003).

Materiais com partículas menores sinterizam ou fundem mais rápido. Assim, a variação no tamanho das partículas pode influenciar nas dimensões, densidade (porosidade) e propriedades mecânicas da peça. A falta de homogeneidade do tamanho das partículas pode influenciar na viscosidade, taxa de fluxo e deposição do pó na camada. Além disso, o pó com partículas esféricas tem uma alta densidade de empacotamento, o que é favorável para a sinterização e fusão a laser. O formato das partículas também pode influenciar na fluidez de deposição do pó durante o processo de fabricação e é, portanto, importante para a qualidade de formação das camadas.

### **2.2.3 Aplicações do processo FSL**

A principal vantagem do processo de fabricação por FSL é a possibilidade de produzir peças muito complexas, impossíveis de serem fabricadas por técnicas convencionais (YASA e KRUTH, 2011).

Na indústria médica e odontológica a FSL é utilizada para a fabricação de próteses, implantes e ossos, em materiais biocompatíveis com alta exatidão e de acordo com os dados (tomografia) do paciente.

Segundo a Agência Aeroespacial Americana (NASA) apud Rabelo (2016) foram testados com grande sucesso os motores de foguete mais complexos já concebidos até então, fabricados através da manufatura aditiva. De acordo com a direção de engenharia deste órgão, utilizando os métodos convencionais de fabricação seriam necessárias 163 peças individuais com montagens posteriores, enquanto que ao usar a manufatura aditiva necessitou-se apenas duas peças, economizando assim tempo e custos. A possibilidade de criar modelos com formas livres auxilia diretamente à indústria aeronáutica, aeroespacial e nuclear na criação de nervuras com grandes vazios para alívio de massa (otimização topológica), sem prejuízo para a resistência mecânica das peças.

Nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e nuclear ainda existe possibilidade de criar modelos com formas que auxiliam diretamente na criação de nervuras com grandes vazios para alívio de massa (otimização topológica) sem danos para a resistência mecânica das peças. Em um estudo desenvolvido na aeronave A380, pela Airbus, foi possível reduzir cerca de 10 kg, resultando na redução da emissão de CO<sub>2</sub> em quase 40% sobre o seu ciclo de vida (3D PRINTER AND 3D PRINTING NEWS, 2013). Além disso, o processo FSL possibilita o desenvolvimento de peças com menos montagens (peças monolíticas) com redução no desperdício de matéria-prima.

### 2.3 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DIMENSIONAL DE PROCESSOS PRODUTIVOS

Existem diversas técnicas de avaliação de erros geométricos de máquinas e processos que contribuem para a garantia da exatidão de processos de manufatura. No entanto, para que os mesmo sejam eficazes, é necessário que apresentem elevada confiabilidade metrológica, produzam resultados úteis e de fácil entendimento, que sejam de rapidez e que tenham custo igual ou inferior ao benefício (MELO, 2016 apud MOREIRA, 2014).

Souza (2000) comenta em sua tese que máquinas-ferramentas podem ser avaliadas empregando-se vários métodos, os quais podem ser classificados como: métodos de qualificação e métodos de avaliação. Os métodos de qualificação permitem obter resultados confiáveis e completos sobre o estado da máquina, mas são de difícil aplicação, exigindo pessoal altamente qualificado para a tarefa e

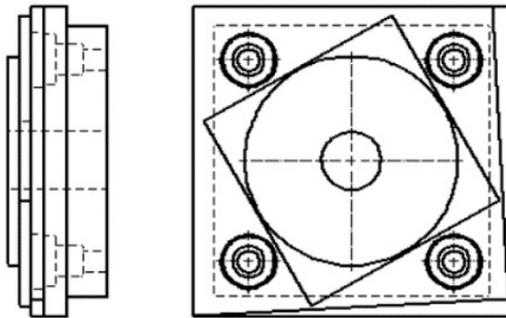
envolvendo longos tempos de ensaio e alto custo dos equipamentos. Os resultados destes ensaios podem ser empregados para atualizar os fatores de compensação de erros no CNC da máquina. Como exemplos de métodos de qualificação têm-se o laser interferométrico, o laser de alinhamento e as réguas/esquadros.

Já os métodos de avaliação normalmente empregam equipamentos de menor custo e a sua aplicação se dá de maneira fácil e rápida. No entanto, fornecem apenas uma avaliação geral sobre o estado da máquina. Estes métodos destinam-se a uma avaliação mais rápida e frequente da máquina. O ball-bar e a peça padrão usinada são exemplos de métodos de avaliação (SOUZA, 2000; TULLAR, 1996; PELLIN et al., 2007).

Na metrologia de processos de fabricação, existem duas formas principais de avaliar erros geométricos de uma máquina e/ou processo: através de uma série de medidas diretas das características da máquina e do processo, e através de medições de peças de teste fabricadas pela respectiva máquina estudada. A fabricação de uma peça de teste permite um teste composto, pois a maioria dos erros presentes na máquina e o processo, contribuem para erros na peça (ASTM F2792, 2010).

O primeiro artefato padrão para caracterização de desempenho foi na área de usinagem, difundido nos EUA em 1969. A peça conhecida coloquialmente por quadrado-diamante-quadrado (100mm x 100mm) foi criada para auxiliar os fabricantes de máquinas de usinagem do país naquela época, conforme Figura 5 (NAS 979, 1969).

Figura 5. Artefato de teste nomeado como "quadrado-diamante quadrado" para centros de usinagem.



Fonte: Adaptado de NAS 979 (1969).

Segundo Pellin et al., (2007) a usinagem é um processo de larga utilização na geração de componentes mecânicos, sendo que a verificação das máquinas-ferramentas quanto ao comportamento geométrico é importante para o estabelecimento de seu desempenho. Diversas não idealidades presentes nas máquinas-ferramentas provocam alterações indesejadas na trajetória relativa entre a peça e a ferramenta de corte que se transferem de forma direta à geometria das peças usinadas, por exemplo, comprometendo sua exatidão.

Em manufatura aditiva uma série de fatores relacionados aos parâmetros de fabricação afetam o produto final (TAYLOR CHILDS e HAUSER, 2002; KLOCKE, WAGNER e ADER, 2003; YADROITSEV, BERTRAND, SMUROV, 2007). Em processos FSL, por exemplo, os principais parâmetros são potência do laser, comprimento de onda, o diâmetro do feixe do laser, a velocidade de varredura do laser, distância entre filetes que formam uma camada e a espessura da camada de pó (CHILDS, HAUSER e BADROSSAMAY, 2004), sendo estes os principais influenciadores da qualidade (dimensional e superficial) da peça final (YANG e EVANS, 2005 e KRÓL et al., 2013).

## 2.4 EXATIDÃO GEOMÉTRICA DE PEÇAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA

Afim de comparar parâmetros influenciadores do resultado final de uma peça, diferentes autores vêm utilizando peças padrão ou *benchmark parts* não somente para avaliação de desempenho de tecnologias de MA, mas também para

entendimento de fontes de erros e/ou defeitos (MOYLAN et al., 2012 apud ABREU, 2015). O *benchmarking* é baseado em um processo contínuo e sistemático que permite a comparação do desempenho de diferentes sistemas similares (processos, organizações, máquinas), de maneira a estabelecer padrões de desempenho. Seu objetivo está relacionado com a identificação de melhores práticas e processos em uma determinada aplicação. Em MA sua utilização permite a avaliação de pontos fortes e fracos nas diferentes tecnologias (SANCHEZ et al., 2014 apud ABREU, 2015).

Chen et. al. realizaram um estudo de otimização dos parâmetros do processo de FSL, onde foram enumeradas cinco limitações, que quando acumuladas, podem levar a discrepâncias dimensionais na ordem de 250 a 500  $\mu\text{m}$ . Essas cinco limitações citadas são: erros induzidos por CAD/CAM, erros induzidos pelo feixe de laser, contração da peça, parâmetros da máquina mal escolhidos e erros no pós-processo.

Davis (2003) classifica a maioria dos defeitos que ocorrem no processo de FSL de acordo com sua natureza: erros sistemáticos, distorções pré-fusão e as distorções pós-fusão. Os erros sistemáticos são considerados erros que são inerentes ao processo e, nessa categoria, pode-se citar o efeito escada, sobreimpressão (*print through*) e quantização da construção. As distorções de pré-fusão são consideradas as imperfeições que ocorrem no momento de fabricação da peça, ou seja, antes da realização do pós-processo. Davis (2003) cita três erros que podem ocorrer nessa fase que são: dilatação, distorções em placas horizontais e empenamento em partes salientes da peça. No momento de pós-fusão as imprecisões mais comuns são a contração da peça, e distorções em placas horizontais e verticais.

A partir da bibliografia estudada, percebe-se que contração, dilatação, sobreimpressão e distorção em partes em balanço são as imprecisões mais comuns no processo de FSL. Por conseguinte, esses defeitos, que implicam principalmente na exatidão geométrica nas peças produzidas, serão detalhados a seguir. Na sequência, serão abordados os fatores principais de influência de qualidade na peça fabricada por FSL.

A exatidão é um dos principais fatores, especialmente em casos de peças funcionais, que afetam a usabilidade de uma peça fabricada por MA (GORSKI et al., 2013 e ZAWORA, 2007). Nos últimos anos, a MA vem atendendo grandes setores industriais como aeroespacial, automotivo, odontologia, próteses, implantes, joias entre outros, os quais exigem cada vez mais designs específicos, tolerâncias geométricas estreitas, baixa rugosidade da superfície, e propriedades mecânicas específicas (CALIGNANO et al., 2016 e KRANZ et al., 2015). Segundo estudos realizados por diversos pesquisadores, os resultados obtidos das peças fabricadas por fusão seletiva a laser, possibilitam o estabelecimento de novos parâmetros para melhor desempenho destes processos (FAHAD e HOPKINSON, 2012; ILCIK et al., 2014; CALIGNANO et al., 2016).

Para demonstrar o desempenho global de alguns processos de MA, Kruth (1991) utilizou uma peça padrão ou *benchmarking part*, conforme Figura 6.

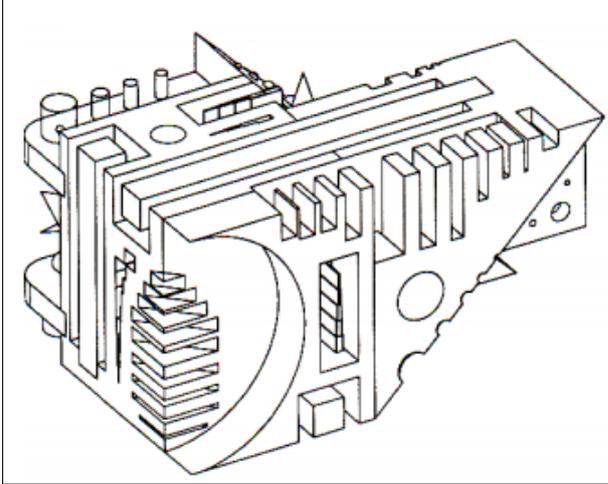
Figura 6. Peça padrão para avaliação de diferentes técnicas de MA.



Fonte: Adaptado de Kruth (1991) apud ABREU (2015).

Um ano depois Lart (1992), utilizou uma abordagem diferenciada para ilustrar as características geométricas de sua peça padrão. De acordo com a Figura 7, o autor buscou mesclar detalhes pequenos e médios, os quais dificultam sistemas típicos de medição para avaliação destas geometrias.

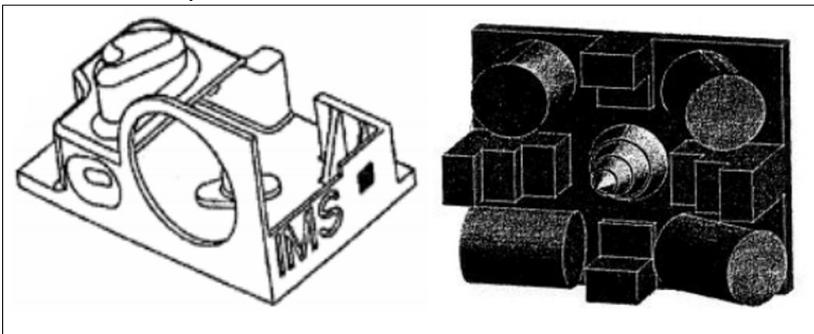
Figura 7. Peça padrão apresentando diferentes características.



Fonte: Adaptado de Lart (1992) apud Fahad e Hopkinson (2012).

O projeto de Aubin (1994) constituiu-se de furos, paredes finas, saliências, inclinações e superfícies com formas livres, evidenciado na Figura 8. Seu objetivo foi avaliar características técnicas e econômicas de diferentes tecnologias de MA. Jayaram et al (1994) selecionaram quatro tecnologias de fabricação aditiva para avaliar diferentes fatores de desempenho como repetibilidade, empeno, fluência, contração e resistência à tração. As características escolhidas para compor sua peça padrão foram basicamente cilindros, cones e formas prismáticas (para avaliação de retitude e paralelismo). Para estudar o desempenho da tecnologia quanto a fabricação inclinada, os autores criaram quatro cilindros inclinados a  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$  no eixo vertical, conforme mostrado na figura 8.

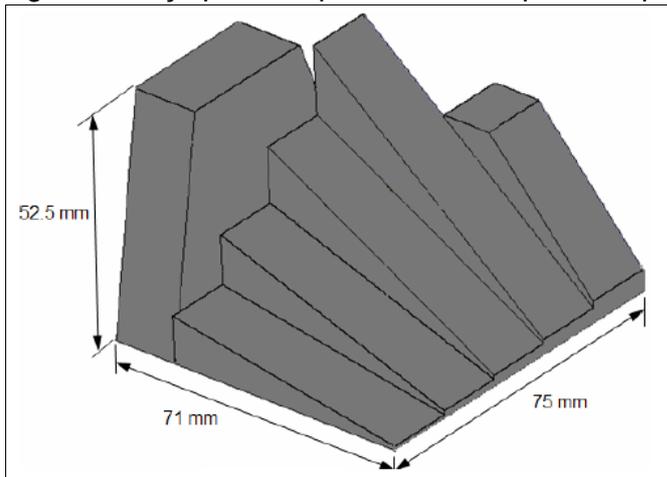
Figura 8. Peça padrão apresentando paredes finas e peça padrão caracterizada por cilindros inclinados, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Aubin (1994) e Jayaram et al (1994) respectivamente.

Baseando-se na proposta de Reeves e Cobb (1996), conforme demonstrado na Figura 9, Shellabear (1998) adaptou e fabricou um lote de mais de 40 peças padrão a fim de avaliar diferentes materiais e processos de adição, utilizando apenas superfícies planas e com diferentes inclinações.

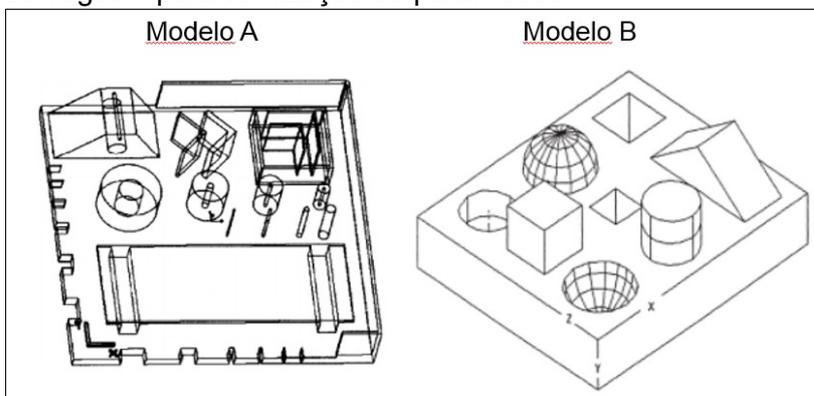
Figura 9. Peça padrão apresentando superfícies planas e diferentes inclinações.



Fonte: Adaptado de Shellabear (1999) apud Fahad e Hopkinson (2012).

Demais autores como Xu Fen et al (2000) – Figura 10. a - e Zhou et. al (2000) – Figura 10. b - preocuparam-se em explorar geometrias como esferas, furos, cilindros em diferentes espessuras, rasgos e até mesmo rugosidade superficial, para estudo de maquinabilidade e efeitos ambientais oriundos de diferentes processos. Zhou et. al (2000) em especial, utilizou o método de *Taguchi* para otimização dos parâmetros e processos

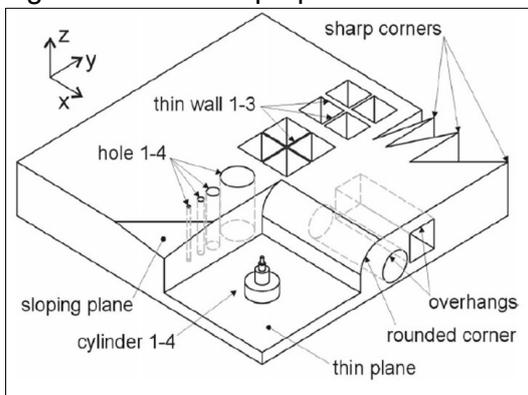
Figura 10. a. Utilização de geometrias conhecidas – 10. b. Peça padrão utilizando método de Taguchi para otimização de parâmetros.



Fonte: Adaptado de Xu Fen et. Al (2000) e Zhou et. al (2000) respectivamente.

Kruth et al. (2005) afirmam comparar cinco equipamentos comerciais das tecnologias de SLS e SLM, cuja matéria prima foi o pó metálico, utilizou um artefato de referência, conforme Figura 11. A proposta foi avaliar exatidão dimensional, rugosidade superficial, propriedades mecânicas, velocidade e repetibilidade em detalhes subseqüentes. Além disso, segundo os autores, foi possível testar a resolução do processo por meio da fabricação de pequenos furos com variação de diâmetros de 0,5 a 5 mm e paredes finas com variação de espessura de 0,25 a 1 mm.

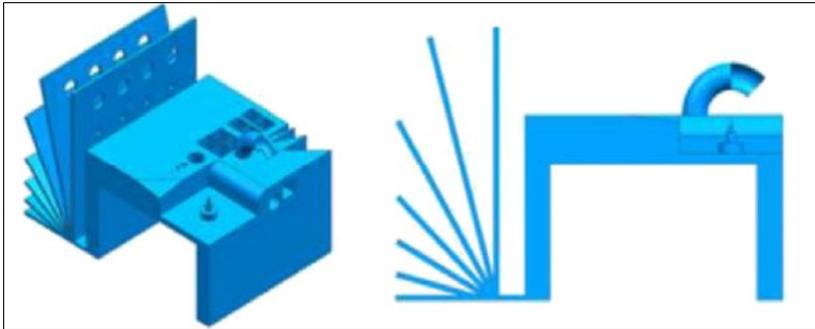
Figura 11. Artefato proposto com dimensões de 50mm x 50mm x 9mm.



Fonte: Adaptado de Kruth et. al., (2005).

Yasa et al. (2001) também realizaram um estudo de comparação entre quatro sistemas comerciais para processo de fusão de metal em pó (SLS e SLM) e utilizaram uma versão modificada do artefato de referência proposto por Kruth et al. (2005), conforme Figura 12. Esse estudo possibilitou que os autores investigassem diversos aspectos tais como precisão dimensional, qualidade da superfície, necessidade de estruturas de suporte, densidade e dureza do material.

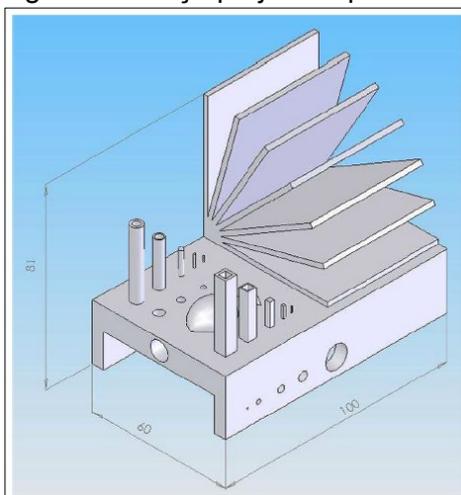
Figura 12. Vistas do modelo proposto por Yasa et al. (2001).



Fonte: Adaptado de Yasa et al. (2001).

Outro estudo focado em MA de materiais metálicos foi realizado por Castillo (2005). O autor projetou uma peça padrão mostrada na figura 13 para investigar o desempenho geométrico e dimensional de dois sistemas. A peça proposta permitiu testar a precisão do processo e a capacidade de produzir saliências, superfícies inclinadas, paredes finas (espessuras de 0,5 a 2 mm), pinos (diâmetros de 0,5 a 5 mm e alturas de 2,5 a 30 mm), furos (diâmetros de 0,5 a 10 mm, profundidades de 5, 10 e 100 mm) e também superfícies curvas.

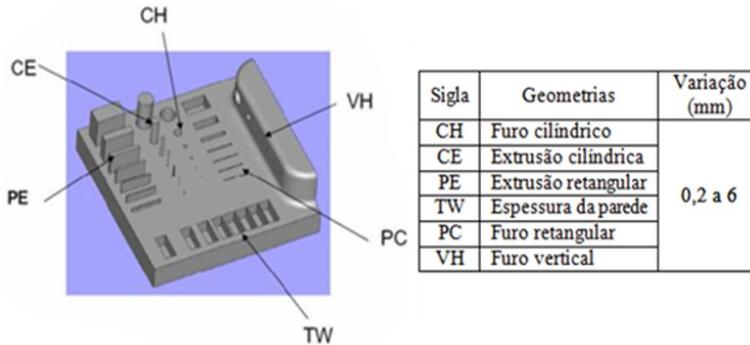
Figura 13. Peça projetada por Castillo (2005) com dimensões de 60mm x 100mm x 81mm.



Fonte: Adaptado de Castillo (2005).

Campanelli, Contuzzi e Ludovico (2010) estudou a performance do aço Maraging 300 fabricado por SLM, e investigou a capacidade do sistema de fabricar micro componentes com densidade máxima e propriedades mecânicas semelhantes às encontradas por tecnologias convencionais. Em uma peça com geometrias específicas, foi avaliado a capacidade do sistema em termos de fabricação de geometria mínima e precisão dimensional (Figura 14).

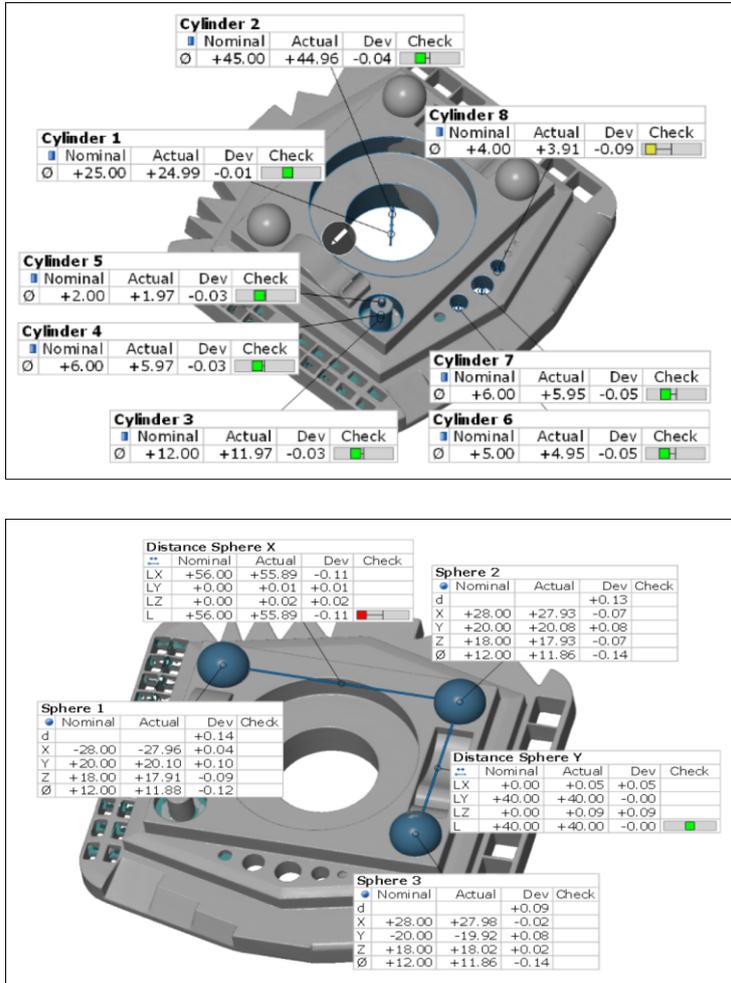
Figura 14. Avaliação de geometria mínima e precisão dimensional.



Fonte: Adaptado de CAMPANELLI, CONTUZZI E LUDOVICO,(2010).

Keller e Mendrickt (2015) pesquisaram a influência dos parâmetros de fabricação, bem como a tensão interna do material na precisão dimensional e de forma das peças fabricadas. Neste trabalho utilizaram como matéria prima a liga de alumínio AISi12. Os autores não descreveram os parâmetros de máquina utilizados, entretanto, as amostras foram desenvolvidas com características geométricas básicas, isto é, comprimentos, ângulos e diâmetros ou raios de superfícies e curvas esféricas e cilíndricas (Figura 15). Além disso, foram abordados conceitos de desvios de forma e posição como planeza, paralelismo, concentricidade de superfícies cilíndricas e perpendicularidade.

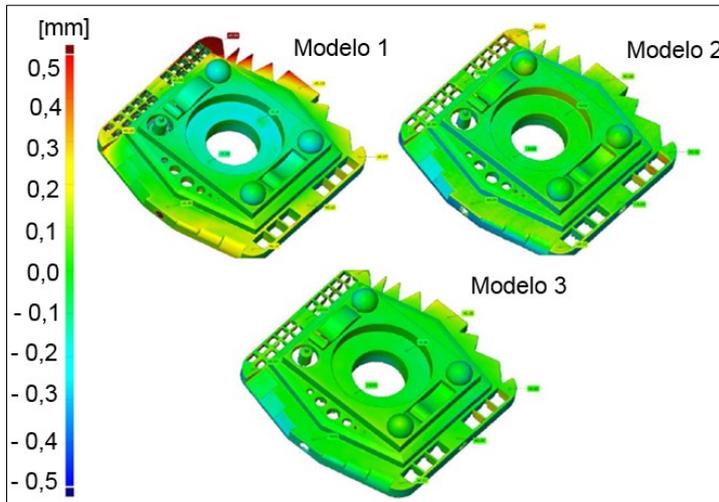
Figura 15. Avaliação de diâmetros e distâncias de elementos, respectivamente.



Fonte: Adaptado de KELLER e MENDRICKT, (2015).

Para Keller e Mendrickt, 2015 a exatidão dimensional de elementos individuais de modelos impressos mostrou correspondência relativamente boa com o modelo nominal e variou dentro dos valores de tolerância dados pelo fabricante da máquina (não informados pelos autores). Entretanto, percebeu-se que existe influência de parâmetros por conta da tensão residual, verificados a partir da comparação entre digitalização da peça fabricada com o modelo CAD desenvolvido (Figura 16). Além disso, observou-se que torna-se mais vantajosa a utilização de suportes mais densos e temperaturas mais altas na placa, diminuindo pela metade os riscos de deformação (KELLER e MENDRICKT, 2015).

Figura 16. Avaliação de superfície utilizando o método de comparação entre modelo fabricado e modelo CAD.



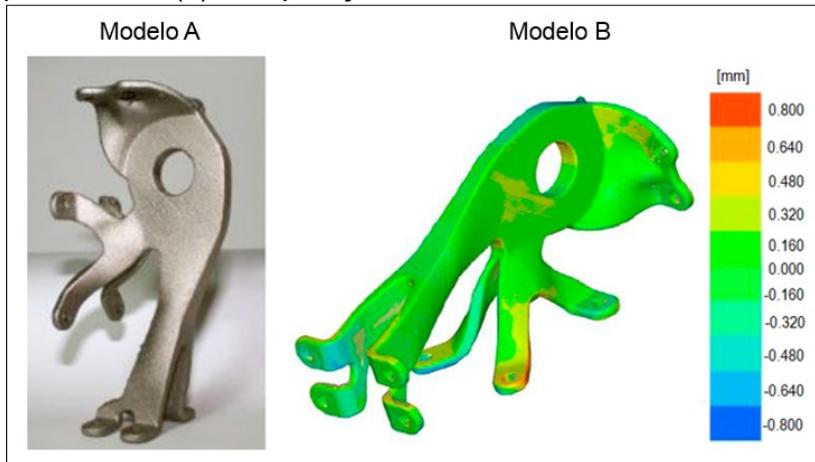
Fonte: Adaptado de KELLER e MENDRICKT, (2015).

Para análise das geometrias, bem como comparação dos modelos fabricados com os arquivos CAD, foi utilizada a tecnologia de medição óptica sem contato (scanner GOM - ATOS II 400), uma vez que este método oferece várias vantagens significativas quando comparado com outros métodos convencionais. Devido à alta densidade de dados, é possível a obtenção de um modelo 3D real de objetos com formas complexas e de alta precisão, através do princípio de triangulação óptica, fotogrametria e métodos de projeção de franjas para o cálculo das coordenadas de pontos.

Alguns trabalhos pesquisados neste segmento, utilizaram componentes “reais” como peças padrão, ou seja, peças utilizadas no dia a dia ou até mesmo objetos de montagens. Essas peças, de modo geral, não se fazem tão eficientes em virtude da impossibilidade de estudos completos das relações dimensionais e geométricas e, conseqüentemente dificultam o controle metrológico.

Seabra et al., 2016 também encontraram desvios oriundos da tensão residual que ocorre no processo de FSL em seu estudo de otimização de topologia de peças voltadas para o setor aeroespacial. Após a fabricação, a peça foi digitalizada e o arquivo STL resultante deste procedimento foi comparado com o 3D original, conforme Figura 17.

Figura 17. Representação da fabricação por fusão seletiva a laser de um modelo não padronizado (a), comparação entre modelo fabricado e modelo digital (b).



Fonte: Adaptado de SEABRA et al., 2016.

Segundo Mercelis e Kruth (2006) o perfil de tensão das peças fabricadas por SLM antes da remoção do substrato consiste em uma grande zona de tensão de tração na zona superior da peça que está sendo construída. A tensão máxima é atingida na superfície da peça. A tensão reduz com valores decrescentes de “z” (altura). A parte inferior do substrato está sob tensão de tração, a parte superior está sob tensão de compressão. A remoção da peça do substrato reduz drasticamente as tensões residuais que se encontram presentes na peça; a tensão residual diminui por uma contração uniforme e uma deformação de flexão. A tensão residual após a remoção consiste em uma zona de tensão de tração na zona superior e inferior da peça e uma zona de tensão de compressão no meio. As tensões após a remoção são muito menores do que antes da remoção, o que pode levar as peças ao empenamento.

Estas tensões residuais que surgem em peças fabricadas por FSL impõem algumas limitações graves ao processo, uma vez que apresentam deformações nas peças e/ou micro-fissuras que pode influenciar negativamente na resistência à tração dessas peças, comparado com o estado livre de tensões, devido à tensão de tração que é adicionada às tensões causadas por carregamento externo (MERCCELIS E KRUTH, 2006). Segundo Shiomi et al., 2004 a redução da tensão residual é possível por meio do tratamento térmico de alívio de tensões, refusão a laser das camadas e aquecimento do leito de pó que apresentam redução da tensão de tração de aproximadamente 70%, 55% e 40%, respectivamente.

## 2.5 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme apresentado, a utilização de peças padrão ocorre não somente para avaliação de desempenho de tecnologias de MA, mas também para entendimento de fontes de erros e/ou defeitos que estes processos podem gerar. Uma breve discussão sobre peças já desenvolvidas foi descrita, levando em consideração aspectos da geometria, método de avaliação e processos de fabricação.

De forma geral, os autores utilizaram características usuais em suas propostas de peças, como cilindros, cones, esferas, diferentes espessuras de parede e de profundidade. Além disso, cada caso abordou objetivos diferentes. Esta pesquisa de mestrado, portanto, contribuirá para complementar estas práticas desenvolvendo uma nova metodologia para fabricação, medição e avaliação de erros gerados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Embora a tecnologia de FSL proporcione muitas vantagens, para que haja qualidade nas peças construídas, faz-se necessário o conhecimento da exatidão dimensional que o processo pode proporcionar, sendo este um assunto muito pouco abordado pela comunidade científica (YADROITSEV, BERTRAND e SMUROV, 2007; COOKE e SOONS, 2010). Identificou-se então a necessidade de projetar um artefato padronizado que disponha de características geométricas usuais em peças fabricadas pelo processo FSL e permita avaliar erros geométricos típicos desse processo de fabricação.

As etapas que descrevem o processo de projeto, construção e validação da peça teste realizado nesta dissertação de mestrado, podem ser visualizados no fluxograma da Figura 18. Esses passos foram estabelecidos e adaptados com base nas diretrizes para desenvolvimento de produtos de Ulrich e Eppinger, 2015. As etapas são brevemente descritas a seguir.

Figura 18. Fluxograma de etapas do processo.



Fonte: O autor, 2018.

A definição do problema é o primeiro passo no desenvolvimento de um projeto. Esta definição pode ser feita através do estabelecimento de requisitos funcionais que satisfaçam as necessidades identificadas (ULRICH e EPPINGER, 2015). Através de revisão bibliográfica em livros, artigos científicos, documentos técnicos e também através da experiência de especialistas da área, foi possível explorar o tema e definir características para a peça construída. Uma lista de

requisitos foi gerada a partir da definição do problema afim de especificar as características técnicas a serem atendidas pela peça. Esta lista traduz os objetivos gerais propostos para a peça em linguagem técnica, considerando também outras restrições como por exemplo de fabricação e de medição. As especificações servirão não somente para orientar o desenvolvimento da peça, mas também para fornecer informações de referência para futuros testes.

A etapa de projeto conceitual está relacionada com a criação e representação da solução para o problema definido. O objetivo desta fase foi transformar em esboço estético a ideia do produto, levando em conta as restrições e requisitos definidos na fase 1. Na sequência, o projeto detalhado também é definido para expressar a ideia na forma de modelo 2D e 3D. A fase 3 também contempla o procedimento de medição que tem como objetivo descrever a melhor estratégia de medição para a peça de estudo. Para atender aos requisitos relacionados às características geométricas, optou-se por utilizar uma máquina de medição por coordenadas (MMC). Esta apresenta apalpadores para realização das medições com diâmetro de 1 mm, fato este que atende muito bem ao requisito de tamanho mínimo das características como diâmetros e largura de rasgos. Outro fator decisório está relacionado ao erro máximo de equipamentos como este em relação a outras tecnologias como laser e óptica, por exemplo. E por fim, ainda na etapa 3, um procedimento para avaliação dos dados gerados nas medições é proposto com o objetivo de verificar, para cada característica, se os desvios em relação aos valores nominais são significativos; e de verificar, também para cada característica, se as diferenças entre as duas condições (dois equipamentos, no caso) são significativas.

A aplicação das etapas propostas foi validada na fase 4 a partir de um estudo de caso realizado em parceria com o Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Laser. O objetivo desta fase foi reproduzir a metodologia proposta para avaliação dos erros geométricos dos processos utilizados.

## 4 DESENVOLVIMENTO DA PEÇA PEDRÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados do processo de desenvolvimento da peça padrão.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO

Através de revisão bibliográfica em livros, artigos científicos, documentos técnicos e também através da experiência de especialistas da área, foi possível explorar o tema e entender qual o problema de projeto para que posteriormente a geometria da peça fosse definida. Sendo assim, definiu-se como problemática a necessidade de projetar um artefato padrão que apresente geometrias usuais típicas de processos FSL permitindo identificar erros geométricos destes processos.

Ideias foram geradas e desdobradas em requisitos de projeto para a peça, visando transformar a linguagem informal (advinda das necessidades do usuário e do problema estabelecido) em linguagem técnica.

### 4.2 LISTA DE REQUISITOS

**1. Permitir baixo tempo de fabricação** – por razões econômicas, a duração da fabricação deve ser a menor possível já que se propõe que a mesma possa ocorrer frequentemente.

**2. Ser de fácil manuseio** – peça única e sem suportes. Para proporcionar motivação de fabricação e uso, é fundamental que o artefato seja pequeno e facilmente manuseado por uma pessoa.

**3. Possuir baixo custo de fabricação** – para incentivar o uso deste artefato em empresas brasileiras, de todos os portes, o preço final é relevante. Assim, deve-se reduzir o máximo possível o custo de fabricação.

**4. Ter robustez** – suficiente para sofrer pequenos impactos.

**5. Ser de fácil medição** – deve ser possível medir a peça no Brasil, atendendo a todas as características geométricas propostas.

**6. Possuir tamanho escalável** – possibilidade de aplicação de fator de escala, possibilitando assim que a peça possa ser reproduzida em equipamentos

com diferentes volumes de trabalho. O artefato de referência proposto por Pennington et al. (2005), por exemplo, foi fabricado em dois tamanhos diferentes; o menor sendo uma versão em escala de 55% da maior.

**7. Possibilitar fabricação por outras técnicas** – possibilitar a utilização do conceito em outras tecnologias de MA, assim como Yasa et al. (2014) que utilizaram seu artefato para comparar quatro sistemas FSL e Mahesh (2006) que validou sua peça em quatro diferentes tecnologias de MA.

**8. Apresentar características em pelo menos dois planos** - este requisito sugere a fabricação de características além do plano superior, um segundo plano, podendo ser o lateral, para que seja possível observar a existência ou não de um dos erros sistemáticos dos processos FSL - o efeito escada - conforme comentado por Davis (2003) e descrito no capítulo 2.

**9. Apresentar características salientes e vazadas** – para avaliar a resolução do sistema, circularidade e posição entre características, saliências e geometrias vazadas ou negativas são sugestões tipicamente utilizadas, como diâmetros internos e externos, por exemplo

**10. Apresentar características planas** – possibilitar a avaliação de paralelismo e resolução do sistema, assim como Kim e Oh (2008) que utilizaram diferentes espessuras de paredes e distâncias entre rasgos.

**13. Apresentar variação no tamanho das características** – permitir a fabricação de geometrias em diferentes tamanhos. Minetola et al. (2016) propuseram uma peça com geometrias simples porém com tamanhos diversificados para avaliar tolerâncias em diferentes faixas e resolução do sistema. Teeter et al. (2015) também utilizaram este método para avaliar o desempenho de um processo FSL variando as dimensões de furos, cilindros, espessura de paredes e rasgos.

Estes requisitos foram ponderados utilizando a metodologia de comparação par a par, cujo resultado é mostrado na Tabela 2. Os níveis de importância apresentados na segunda coluna representam 1 como nível baixo, 2 nível médio e 3 como nível alto.

Tabela 2. Resultado da comparação par a par.

Requisitos	Peso
Apresentar características salientes e vazadas	3
Apresentar características planas	3
Apresentar características em pelo menos dois planos	3
Apresentar variação no tamanho das características	2
Permitir baixo tempo de fabricação	2
Possuir baixo custo de fabricação	2
Ser de fácil medição	2
Possuir tamanho escalável	2
Possibilitar fabricação por outras técnicas	2
Ser de fácil manuseio	1
Ter robustez	1

Fonte: O Autor, 2018.

### 4.3 PRINCÍPIO DE SOLUÇÕES

A partir da lista de requisitos, os itens que receberam peso 3 foram novamente listados para receber possíveis princípios de solução. Para cada item individual, ideias foram pesquisadas a partir de conceitos já existentes na literatura:

**1. Apresentar características salientes e vazadas** – para este item buscaram-se alternativas que permitissem a avaliação da resolução do sistema, ou seja que fosse possível variar o tamanho das geometrias.

- Furos e cilindros
- Furos e cubos
- Cubos e esferas

**2. Apresentar características planas** – Para avaliação da capacidade de construção de características planas, verificou-se a partir da literatura o uso de paredes com diferentes espessuras e rasgos com diferentes medidas entre si, por isso, os princípios sugeridos para este item são:

- Paredes inclinadas com variação de espessura e rasgos
- Cubos com variação de tamanho e cubos vazados
- Paredes perpendiculares com variação de espessura e rasgos também variando distâncias entre si.

**3. Apresentar características em pelo menos dois planos** – Para este requisito, buscaram-se variações de dois planos para que as características fossem fabricadas. As seguintes combinações de soluções foram avaliadas como possíveis princípios:

- Somente no plano superior com característica fabricada na horizontal
- Plano superior e plano lateral
- Somente no plano lateral

Através de uma matriz de decisão foram realizadas as análises das soluções para cada um dos requisitos selecionados e o conceito final é mostrado a seguir, na Tabela 3.

Tabela 3. Resultado das interações entre função de requisito e princípio de solução.

Função do requisito	Princípio de solução
Avaliar a capacidade de construção de furos e de geometrias cilíndricas	Furos e cilindros
Avaliar a capacidade de construção de características planas.	Paredes perpendiculares com variação de espessura e rasgos também variando distâncias entre si.
Apresentar características em pelo menos dois planos	Plano superior e plano lateral

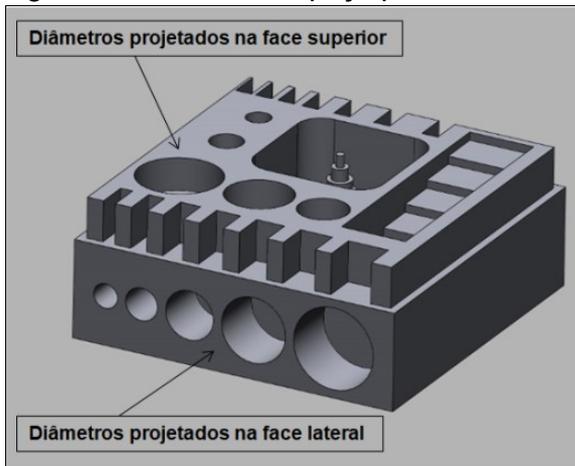
Fonte: O Autor, 2018.

#### 4.4 PROJETO CONCEITUAL

Após as comparações necessárias para ajustar o comportamento do artefato aos requisitos definidos acima, um conceito de peça padrão foi gerado e suas características serão descritas na sequência.

Para atender ao requisito **Apresentar características em pelo menos dois planos** foram projetadas características no plano superior e lateral, conforme Figura 19. Em ambos, optou-se por projetar diâmetros com diferentes tamanhos, atendendo assim ao requisito **Apresentar variação no tamanho das características**.

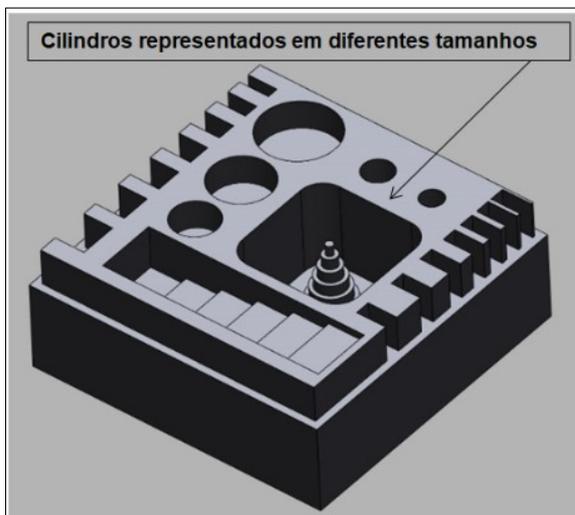
Figura 19. Conceito de peça padrão com detalhes nas faces superior e lateral.



Fonte: O Autor, 2018.

Além disso, a utilização dos diâmetros atende ao requisito de **Apresentar características salientes e vazadas** para avaliação de circularidade e posição destes furos. As características cilíndricas também foram atendidas e estão demonstradas na Figura 20. Um quadrado vazado foi projetado em volta dos cilindros para protegê-los de quaisquer danos ou impactos.

Figura 20. Conceito de peça padrão com a representação de diferentes tamanhos de cilindros.

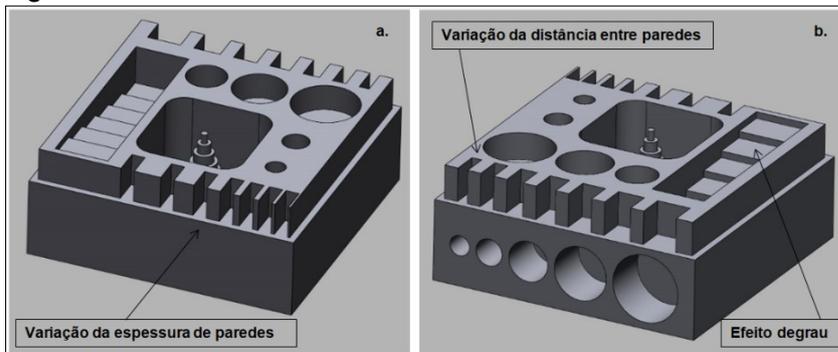


Fonte: O Autor, 2018.

Todas as características foram criadas atendendo ao requisito de variação do tamanho das formas, e para atender ao item **Apresentar características planas**, foram projetados paredes com diferentes espessuras (0,3 mm – 0,5 mm – 0,8 mm – 1 mm – 2 mm – 3 mm – 4 mm – 5 mm), conforme figura 21 a. A figura 21 b. mostra

estes mesmos valores sendo utilizados para a avaliação de distância/comprimento entre paredes. O detalhe em degrau também apresenta oscilação de valores para avaliação de altura.

Figura 21. Modelo conceitual 3D.



Fonte: O autor, 2018.

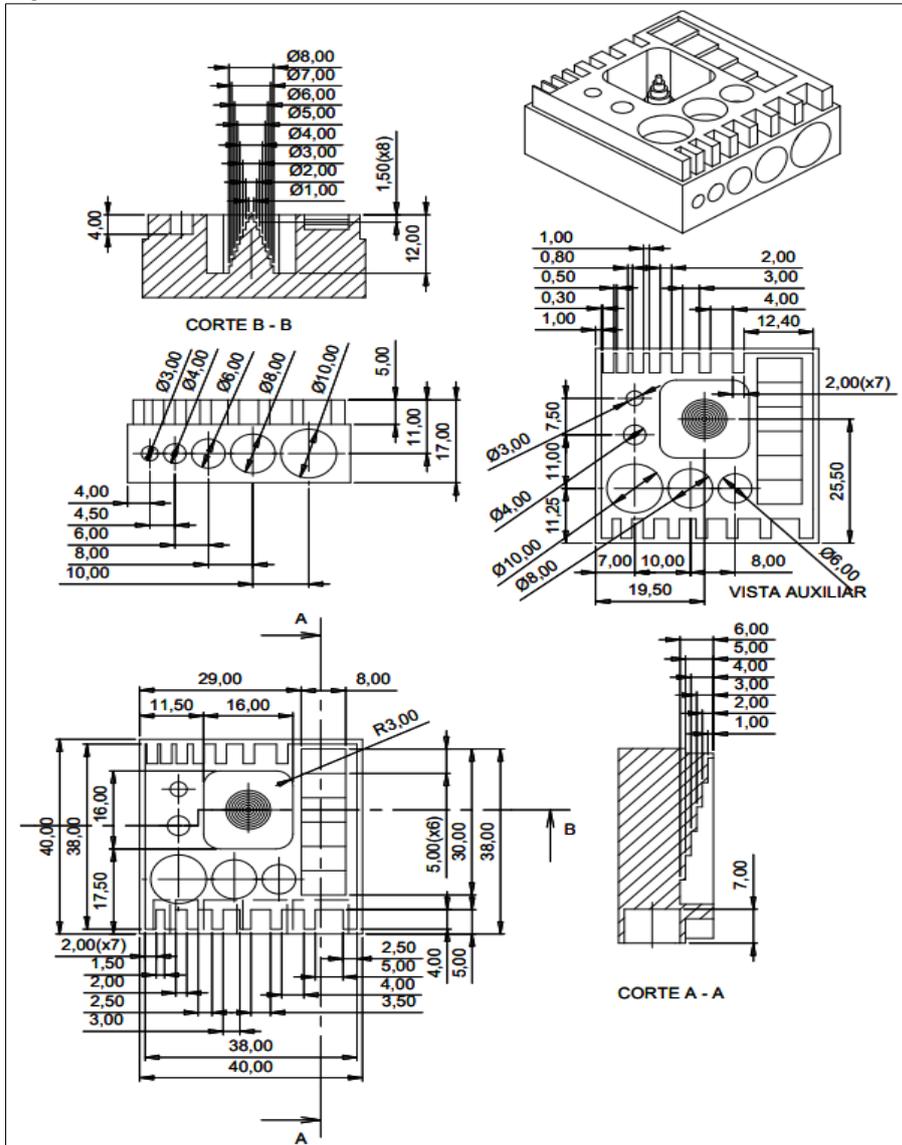
A quantidade de elementos exerce grande influência no tempo de fabricação e medição de peças, e isso conseqüentemente acarreta grandes custos da fabricação. Por isso, a forma como os elementos deste conceito estão distribuídos visa detectar erros geométricos gerados pelo processo de fabricação com o menor número de elementos possível.

O tamanho da geometria, neste caso, levou em conta o tamanho da base de construção da tecnologia de fabricação selecionada para o estudo de caso. Entretanto, esse item está diretamente relacionado a possibilidade de aplicar o fator de escala ao projeto, respeitando portanto o item **Possuir tamanho escalável** da lista de requisitos.

#### 4.5 PROJETO DETALHADO

A geometria dos elementos aqui avaliados é o mais comum possível pois possibilitará a reprodução e posterior avaliação utilizando outras técnicas de manufatura. Sendo assim optou-se por agregar no conceito, características como cilindros e furos de diferentes tamanhos, diferentes espessuras de paredes, comprimento, profundidade e altura, conforme figura 22.

Figura 22. Modelo conceitual.



Fonte: O autor, 2018.

Geometrias que exigem estruturas de suporte, como ângulos ou características suspensas, foram evitadas, visto que este recurso além de gerar retrabalho (remoção manual das estruturas), pode colocar em dúvida os valores obtidos na medição ao realizar este processo de extração de suporte. Superfícies de forma livre e complexas também foram desconsideradas, conforme sugerido por Fassi e Rebaioli (2017) em seu *benchmark* de peças fabricadas por processos de MA.

Utilizando peças que apresentam características em todos ou quase todos os planos do sistema de coordenadas, é possível obter maior quantidade de informações equivalentes às obtidas com outros tipos, porém, sem necessidade de reposicionamentos durante as medições. Por isso este conceito é o que melhor atende à característica de facilidade de medição.

Outro requisito de grande importância é a facilidade de manuseio, também mencionado no início deste capítulo. Este projeto, portanto, abordou um conceito de baixa massa e suficientemente robusto a fim de sofrer pequenos impactos sem que sua estrutura física seja posta em dúvida, durante uma queda, por exemplo.

## 5 PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO, MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO

### 5.1 PROCEDIMENTO DE FABRICAÇÃO

Para fabricação da peça padrão, o procedimento desdobra-se em 7 etapas descritas a seguir. É importante ressaltar que este procedimento foi executado tendo em vista dois processos FSL disponíveis para estudo. Outros tipos de processos sofrerão pequenas alterações em virtude de diferentes equipamentos e principalmente de parâmetros de processo, por isso, o presente procedimento é de caráter orientativo.

Sugere-se fabricar no mínimo três peças para cada processo, dessa forma é possível extrair dados de um número razoável de amostras. Dependendo do fator de escala aplicado na peça e do substrato de fabricação, estas podem ser construídas em uma única rodada de processo, e conseqüentemente, uma única configuração de parâmetros e do equipamento deve ser realizado. Caso mais peças necessitem ser fabricadas, o equipamento deverá receber novo *set up*.

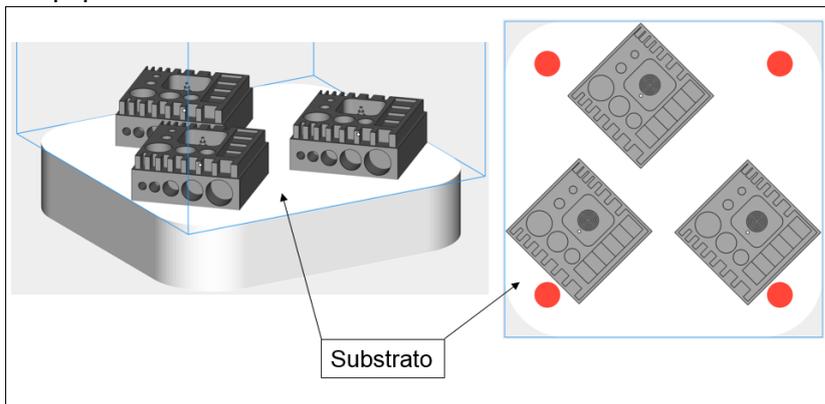
**Etapa 1 – Modelo 3D:** Criação de um modelo tridimensional (3D) da peça padrão gerado em um arquivo CAD, que neste caso aconteceu na etapa do projeto conceitual.

**Etapa 2 – Conversão do modelo 3D para formato STL:** O arquivo CAD, ou seja, o modelo sólido deve ser convertido para o formato STL que representa o modelo 3D em uma malha triangular, onde todas as informações são representadas pelos vértices e pelo vetor normal à superfície de cada triângulo. Esta conversão ocorre dentro do próprio software de modelamento 3D ou então no software planejador, que neste caso foi utilizado o software *Materialise Magics*.

**Etapa 3 – Transferência para software planejador:** Na sequência, o arquivo deve ser enviado para um programa, chamado de planejador de processo. O software planejador de processos, recebe o modelo representado pela malha STL e secciona este arquivo automaticamente em finas camadas paralelas. Após esta etapa, gera-se o caminho da deposição necessária para cada camada. Nas Figuras

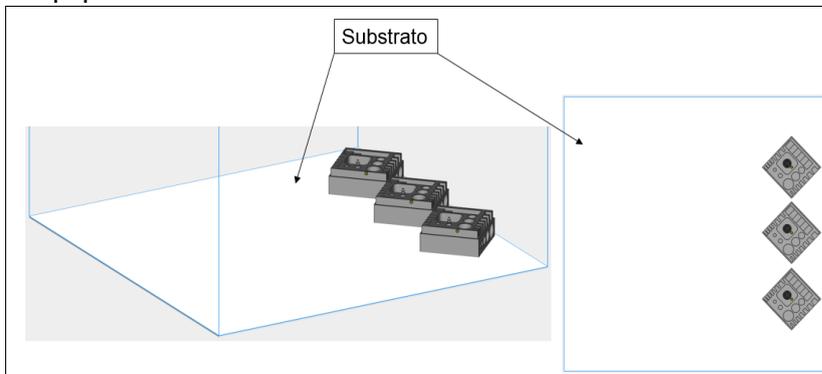
23 e 24 é possível observar virtualmente a forma como as peças foram distribuídas no substrato (placa) de fabricação dos processos utilizados, através do software planejador. O posicionamento deve levar em consideração o cuidado para que as peças não fiquem muito próximas umas das outras, evitando interferências ou defeitos de fabricação.

Figura 23. Software planejador com o posicionamento das peças no substrato de fabricação – equipamento A.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 24. Software planejador com o posicionamento das peças no substrato de fabricação – equipamento B.



Fonte: O autor, 2018.

Como foram utilizados dois processos diferentes, as peças fabricadas no equipamento A, cujo substrato mede 125 mm x 125 mm foram posicionadas conforme Figura 23. Já as peças fabricadas no equipamento B, cujo substrato mede 245mm x 245mm foram posicionadas conforme Figura 24.

**Etapa 4 – Configuração de parâmetros:** Nesta etapa, os demais parâmetros de fabricação devem ser inseridos ao software planejador. Para a fabricação das peças padrão, foram utilizados dois equipamentos diferentes, cuja matéria prima foi a liga Ti6V4Al e os parâmetros foram sugeridos pelo próprio fornecedor dos equipamentos para este tipo de liga. Os principais parâmetros necessários para preenchimento no software planejador são descritos na Tabela 4, e servirão como orientação para o leitor.

Tabela 4. Parâmetros a serem preenchidos no software de planejamento.

<b>Parâmetros de Processo</b>
Velocidade de varredura
Espessura de camada
Potência do laser
Diâmetro do foco do laser
Distância de eclosão
Estratégia de fabricação
Matéria prima
Aquecimento da plataforma

Fonte: O autor, 2018.

**Etapa 5 – Configuração de máquina:** Os equipamentos devem ser abastecidos com o pó de Ti6V4Al, matéria prima selecionada para fabricação deste estudo e com gás inerte. Neste caso optou-se por utilizar argônio, de acordo com disponibilidade do laboratório que fabricou as peças. É importante verificar se o equipamento está devidamente limpo, para que não haja contaminação do pó de Ti6V4Al, com o pó do material utilizado em processamentos anteriores. Após a limpeza, utilizando um aspirador de pó apropriado, realizar o abastecimento com a matéria prima e o gás inerte, conforme descrito anteriormente.

**Etapa 6 – Construção física da peça:** Após a configuração dos parâmetros e preparo do equipamento, a construção pode ser iniciada. Conforme já descrito, a primeira camada do modelo físico é criada e o modelo vai sendo formado a partir da base e de acordo com a espessura da camada seguinte. O processo repete-se até o modelo estar completo.

**Etapa 7 – Pós processamento:** Após a fabricação, o substrato deve ser retirado da máquina e com um pincel é possível retirar levemente o pó de matéria prima que fica encrustado nas peças, conforme Figuras 25 e 26. Em seguida as peças devem ser removidas do substrato através do processo de eletroerosão a fio.

Figura 25. Remoção do pó após fabricação de peças – Equipamento A.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 26. Remoção do pó após fabricação de peças – Equipamento B.



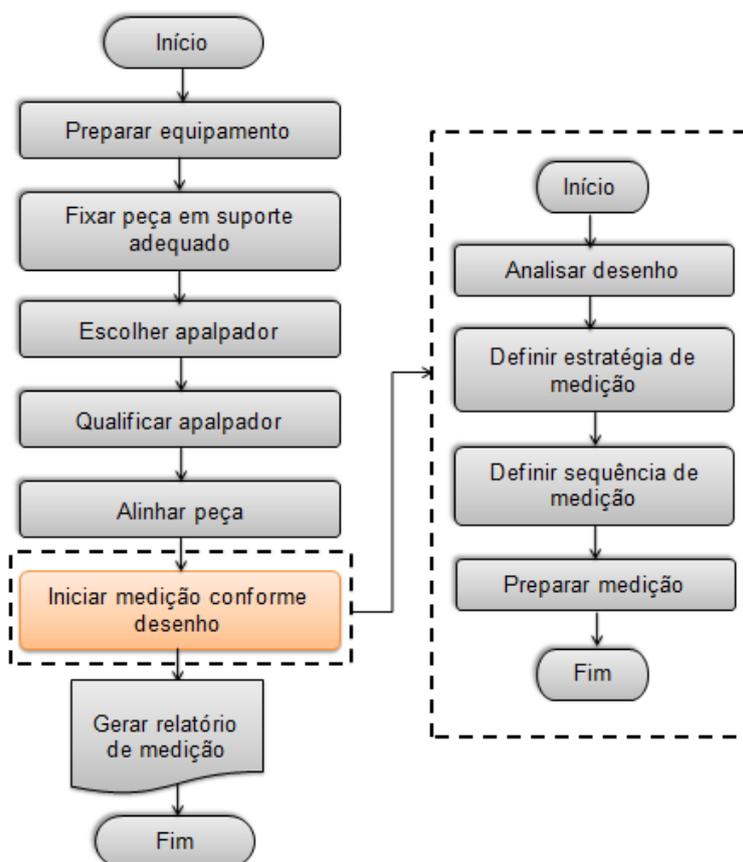
Fonte: O autor, 2018.

O processo de eletroerosão a fio para remoção das peças do substrato de fabricação, consiste em posicionar o substrato a 45° paralelo ao mecanismo de corte do equipamento. Um eletrodo em latão deionizado com diâmetro de 0,025 mm fará a remoção das peças.

## 5.2 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

O procedimento para as medições aqui definido, propõe a utilização de uma máquina de medição por coordenadas e inicia-se pela preparação do equipamento. A fixação é o segundo passo pois a movimentação do item a ser medido pode alterar o referencial estabelecido e induzir erros. Em seguida, faz-se a escolha, montagem e qualificação do apalpador mais adequado para medição da. Finalizada esta etapa, os próximos passos são alinhamento da peça e medição das características, conforme desenho. O fluxograma que resume estas etapas pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 27. Fluxograma do procedimento para medição.

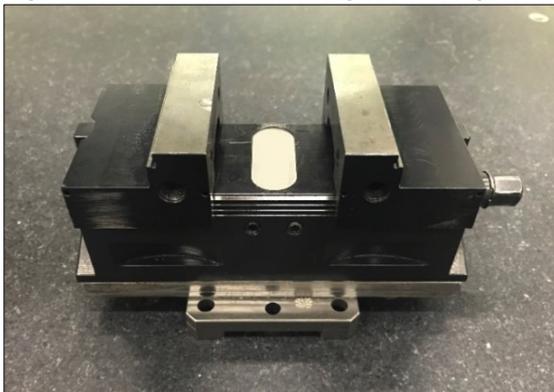


Fonte: Adaptado de Weckenmann, 2012.

**Etapa 1 – Preparar o equipamento:** O equipamento deve ser ligado, assim como o computador e o software de medição da máquina.

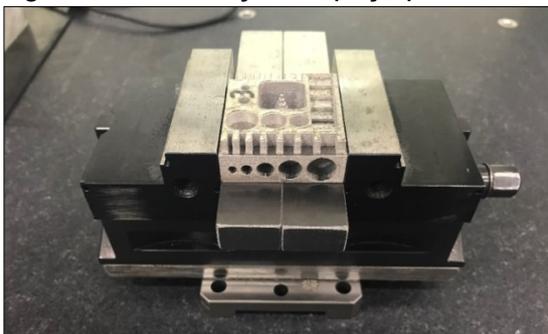
**Etapa 2 – Fixar a peça em suporte adequado:** Devido ao tamanho da peça projetada, a mesma pode ser facilmente fixada na mesa da MMC com suportes apropriados para máquina de medição por coordenadas. No caso da fabricação utilizando outros tipos de matéria prima, é possível ainda confeccionar dispositivos de fixação ou até mesmo usar um prisma magnético, cuja face paralela à mesa de desempenho esteja apropriadamente retificada. O suporte escolhido para medição das peças padrão foi uma mini-morsa, conforme ilustrado na Figura 28. Este tipo de suporte se adequa a peça pois é possível prendê-la pelas laterais que não apresentam geometrias a serem medidas. A face que apresenta características deve ficar de frente para o operador, conforme Figura 29.

Figura 28. Morsa para fixação da peça padrão.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 29. Orientação da peça padrão.



Fonte: O autor, 2018.

A peça deve ser orientada na máquina de maneira a permitir o acesso a todas as geometrias de interesse. O objetivo da fixação é de apenas evitar a movimentação da peça durante a medição, portanto, esforços excessivos de fixação

devem ser evitados para que a peça não seja deformada. Neste caso a peça foi fixada de maneira que os diâmetros fabricados na face lateral, permaneçam de frente para o operador da máquina.

**Etapa 3 – Escolher o apalpador:** Para definir o apalpador de medição, é necessário que o mesmo seja adequado à peça. As pontas que fazem contato com a peça geralmente consistem de rubis industriais mono-cristalinos altamente esféricos montados em um eixo. Portanto, a escolha do raio da esfera do apalpador adequado para a medição das peças padrão é de 1 mm, conforme Figura 30.

Figura 30. Apalpador utilizado para medição das peças padrão.

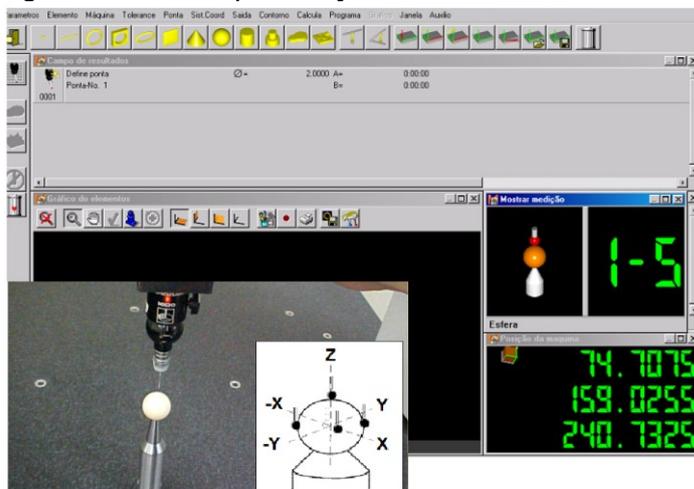


Fonte: O autor, 2018.

**Etapa 4 – Qualificar o apalpador:** A qualificação do apalpador ocorre utilizando uma esfera de referência, já que todos os apalpadores devem ser corrigidos pelo diâmetro de sua ponta. A qualificação envolve determinar o diâmetro da ponta e a distância entre eles. O sequenciamento ocorre da seguinte maneira:

- a. Limpar o apalpador e a esfera de calibração.
- b. Dentro do software utilizado para medição, definir uma nova ponteira, alimentando o sistema com informações a respeito da ponteira a ser qualificada e do diâmetro da esfera padrão que será utilizada. Em caso de dúvida, o próprio artefato ou então o certificado de calibração apresentam este valor.
- c. Calibrar a ponta usando estratégia de apalpação que corresponda às orientações de medição na peça padrão. No mínimo, apalpar um ou dois pontos perto do polo e quatro pontos no equador, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31. Iniciar qualificação.



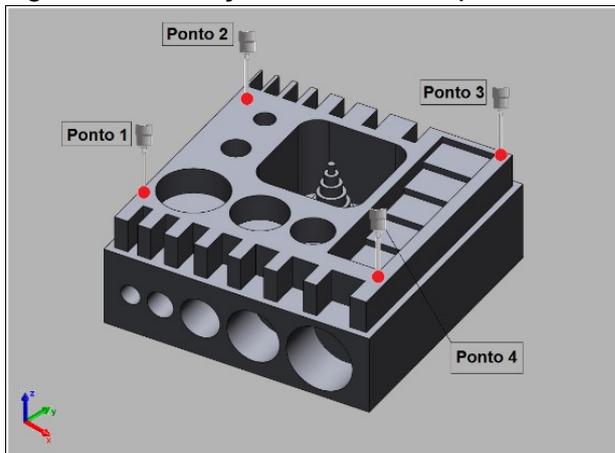
Fonte: O autor, 2018.

- d. Após a qualificação da ponta, as configurações devem ser salvas e após este procedimento, as medições podem iniciar.

**Etapa 5 – Alinhar a peça:** O sistema de coordenadas da peça foi definido de forma que possa ser facilmente reproduzido, principalmente porque esta etapa precisa ser realizada manualmente. Para definir um sistema de coordenadas foi necessário criar um conjunto de geometrias de referência denominadas referências primária, secundária e terciária, conforme sequenciamento a seguir.

- a. O referenciamento primário representa a orientação espacial, portanto o ícone representado por um “plano”, deve ser selecionado e 4 pontos devem ser coletados na região indicada na Figura 32.

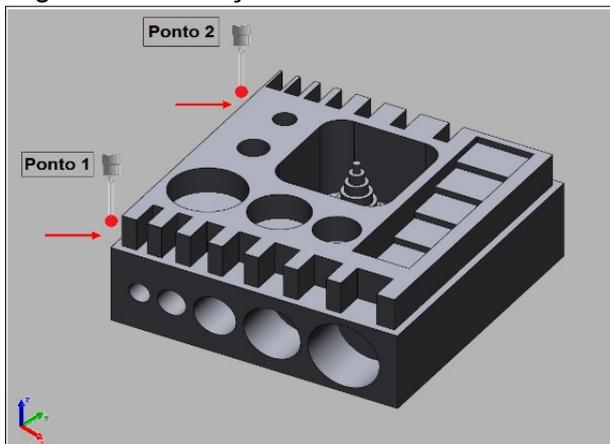
Figura 32. Indicação da referência primária.



Fonte: O autor, 2018.

- b. O referenciamento secundário define a orientação de um segundo eixo (ortogonal ao primeiro) e refere-se a uma linha, originada a partir de 2 pontos e a altura do apalpador em relação ao plano da parede deve ser de 1 mm, assim como ilustra a Figura 33.

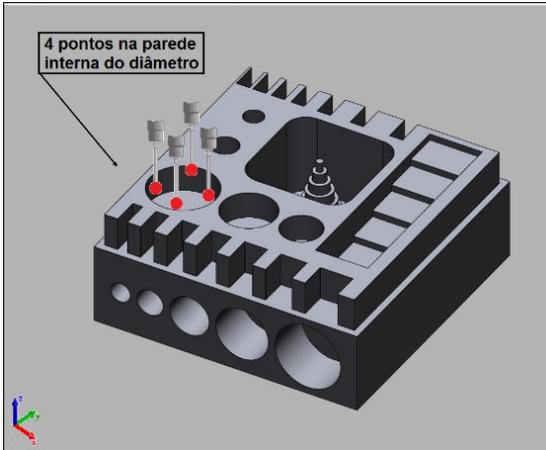
Figura 33. Indicação da referência secundária.



Fonte: O autor, 2018.

- c. O referenciamento terciário representa um ponto de origem. Neste caso, deve-se utilizar o centro de um diâmetro para obtenção do mesmo. Esta característica deve ser apalpada com 4 pontos e a altura do apalpador em relação ao plano dos diâmetros deve ser de 1 mm, conforme indicação da Figura 34.

Figura 34. Indicação da referência terciária.



Fonte: O autor, 2018.

- d. Após a coleta destas informações, será necessário delimitar o sistema de coordenadas e gravá-lo no software. Este representará o nivelamento, alinhamento e origem que correspondem respectivamente ao plano, linha e círculo capturados anteriormente na peça.

**Etapa 6 - Iniciar a medição:** As características a serem medidas estão descritas na Tabela 5 e seguem um sequenciamento para orientação da ordem das geometrias a serem medidas.

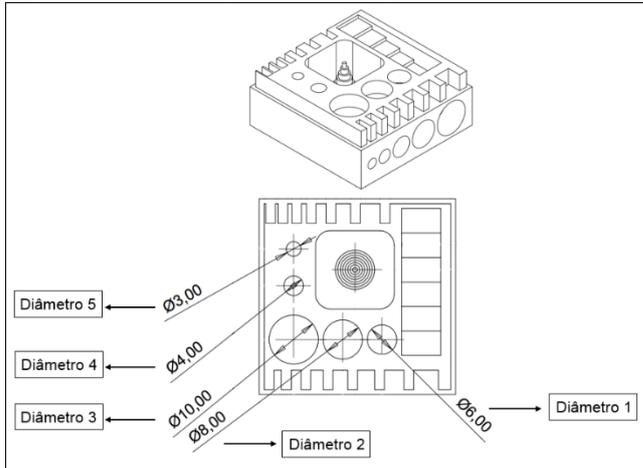
Tabela 5. Indicação das geometrias e ordem para medição.

<b>Ordem</b>	<b>Característica</b>	<b>Valor nominal (mm)</b>	<b>Número de pontos a serem apalpados</b>
1	Diâmetro interno	6,000	4 pontos à 1 mm do topo
2	Diâmetro interno	8,000	4 pontos à 1 mm do topo
3	Diâmetro interno	10,000	4 pontos à 1 mm do topo
4	Diâmetro interno	4,000	4 pontos à 1 mm do topo
5	Diâmetro interno	3,000	4 pontos à 1 mm do topo
6	Espessura de parede	0,300	1 ponto no centro de cada face
7	Espessura de parede	0,500	1 ponto no centro de cada face
8	Espessura de parede	0,800	1 ponto no centro de cada face
9	Espessura de parede	1,000	1 ponto no centro de cada face
10	Espessura de parede	2,000	1 ponto no centro de cada face
11	Espessura de parede	3,000	1 ponto no centro de cada face
12	Espessura de parede	4,000	1 ponto no centro de cada face
13	Largura de rasgo	1,500	1 ponto no centro de cada face
14	Largura de rasgo	2,000	1 ponto no centro de cada face
15	Largura de rasgo	2,500	1 ponto no centro de cada face
16	Largura de rasgo	3,000	1 ponto no centro de cada face
17	Largura de rasgo	3,500	1 ponto no centro de cada face
18	Largura de rasgo	4,000	1 ponto no centro de cada face
19	Largura de rasgo	5,000	1 ponto no centro de cada face
20	Diâmetro externo	1,000	4 pontos à 1 mm do topo
21	Diâmetro externo	2,000	4 pontos à 1 mm do topo
22	Diâmetro externo	3,000	4 pontos à 1 mm do topo
23	Diâmetro interno lateral	10,000	4 pontos à 1 mm do topo
24	Diâmetro interno lateral	8,000	4 pontos à 1 mm do topo
25	Diâmetro interno lateral	6,000	4 pontos à 1 mm do topo
26	Diâmetro interno lateral	4,000	4 pontos à 1 mm do topo
27	Diâmetro interno lateral	3,000	4 pontos à 1 mm do topo

Fonte: O autor, 2018.

Os 5 primeiros itens referem-se aos diâmetros da face superior. Inicialmente o ícone “diâmetro” deve ser selecionado no software de medição e 4 pontos devem ser coletados na parede interna dos diâmetros conforme esquema da Figura 35. A altura do apalpador em relação ao plano dos diâmetros deve ser de 1 mm.

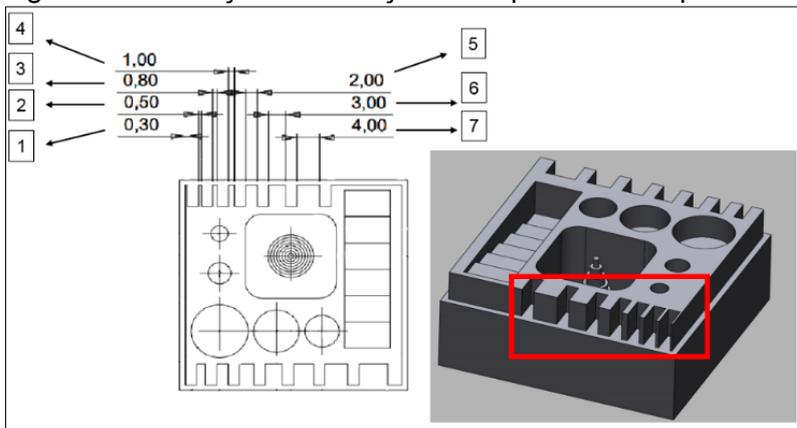
Figura 35. Indicação da medição de diâmetros internos.



Fonte: O autor, 2018.

Os sete seguintes itens referem-se a medição da espessura de paredes, estas devem ser medidas primeiramente selecionando a opção “ponto” no software de medição e em seguida realizar a apalpação em um dos lados da parede e depois no outro. A altura do apalpador em relação ao plano das paredes deve ser de 1 mm, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36. Indicação da medição de espessuras de parede.

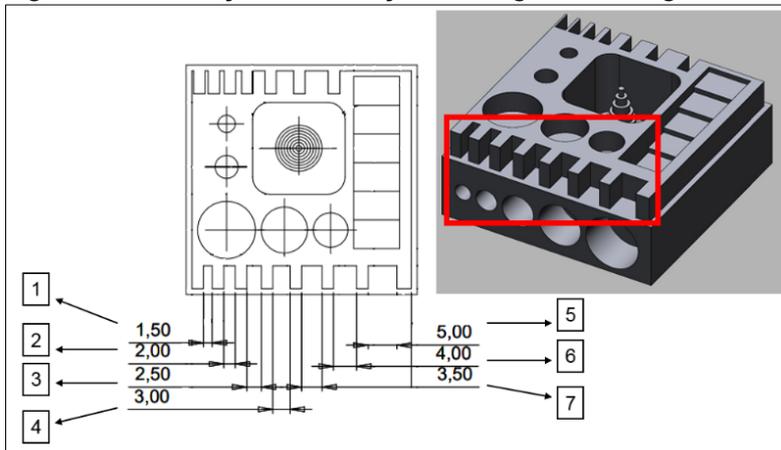


Fonte: O autor, 2018.

Na sequência são mostradas as indicações para medição da largura dos rasgos e assim como o item anterior, devem ser medidas primeiramente selecionando a opção “ponto” no software de medição e em seguida realizar a apalpação em um dos lados da parede e depois no outro, conforme ilustrado na

Figura 37. A altura do apalpador em relação ao plano das paredes deve ser de 1 mm.

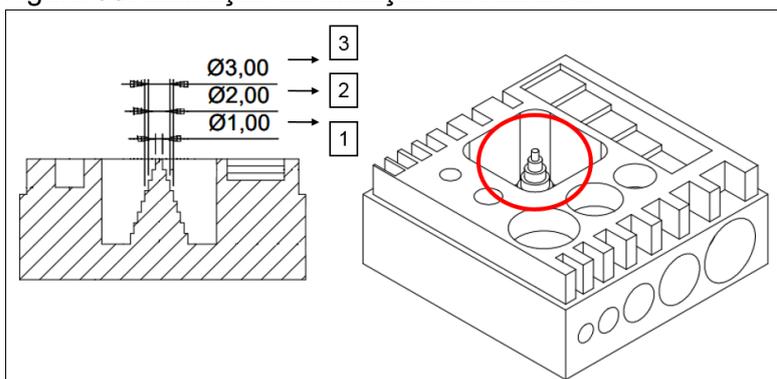
Figura 37. Indicação da medição de largura de rasgos.



Fonte: O autor, 2018.

Na Figura 38 abaixo, é demonstrada o próximo item a ser medido. Para a medição dos cilindros, utilizar o ícone “diâmetro” no software de medição e seguir apalpando com 4 pontos. A altura do apalpador em relação ao plano dos diâmetros deve sempre se manter a 1 mm.

Figura 38. Indicação da medição de cilindros.

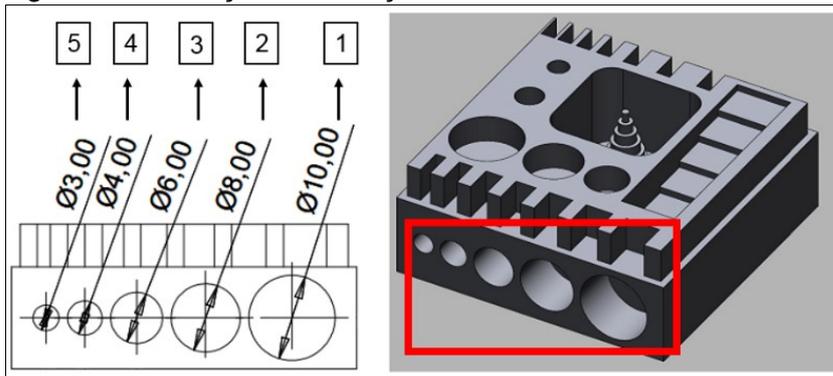


Fonte: O autor, 2018.

Finalmente devem ser medidos os diâmetros construídos na face lateral da peça. Para esta medição, o apalpador deve ser movimentado para realizar a medição a 90°. Este procedimento deve ser realizado através do software de medição selecionando o ícone de “ponteiras” e selecionar a ponta na posição de 90°. É importante que o sistema de apalpação esteja afastado da peça e de qualquer outro obstáculo, visto que ele irá movimentar-se automaticamente.

Após a movimentação, o ícone “diâmetro” deve ser selecionado no software de medição e 4 pontos devem ser coletados na parede interna dos diâmetros conforme esquema da Figura 39. A altura do apalpador em relação ao plano dos diâmetros deve ser de 1 mm.

Figura 39. Indicação da medição de diâmetros na face lateral.



Fonte: O autor, 2018.

### 5.3 PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO

Os resultados das medições são processados no próprio software de medição geométrica 3D da máquina de medição por coordenadas.

Após as medições se faz necessário o tratamento estatístico dos resultados afim de avaliar as diferentes características. Esta etapa, portanto, tem a finalidade de fornecer uma metodologia para melhor entendimento dos resultados obtidos através da medição das peças padrão.

O valor característico para a variabilidade do é a repetibilidade do processo  $R_e$ , que é determinado para cada grupo de características, por exemplo, furos de topo, furos laterais etc. O procedimento para o cálculo da repetibilidade de um grupo de características é:

1. Calcular erros de acordo com a Equação 1, onde  $e_{i,j}$  é o erro do elemento  $i$  da peça  $j$ ,  $x_{i,j}$  é o resultado de medição do elemento  $i$  da peça  $j$  e  $x_{nom}$  é o valor nominal do elemento  $i$ ;

$$e_{i,j} = x_{i,j} - x_{nom,i} \quad (1)$$

2. Calcular o erro médio de cada elemento de acordo com a Equação 2, onde  $n$  é o número de peças;

$$\bar{e}_i = \frac{\sum_{j=1}^n e_{i,j}}{n} \quad (2)$$

3. Calcular o desvio padrão da característica  $i$  de acordo com a Equação 3;

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (e_{i,j} - \bar{e}_i)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

4. Calcular o desvio padrão combinado do grupo de características conforme Equação 4, onde  $m$  é o número de elementos do grupo de características;

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m s_i^2}{m}} \quad (4)$$

5. Calcular o número de graus de liberdade de acordo com a Equação 5;

$$df = m(n - 1) \quad (5)$$

6. Calcular a repetibilidade de acordo com a Equação 6, onde  $t_{df}$  é o coeficiente da distribuição de Student para uma probabilidade de abrangência de 95%.

$$Re = t_{df} \cdot s_p \quad (6)$$

O uso do desvio padrão combinado objetiva eliminar a variabilidade decorrente de erros dependentes do tamanho. O uso do desvio padrão combinado é aceitável quando as variâncias das características dentro de um grupo não sejam significativamente diferentes entre si.

O valor característico para erros sistemáticos é a tendência do processo  $b$ , que também é calculada para cada grupo de características. A tendência  $b$  é definida por um intervalo de confiança. O procedimento para determinação da tendência para um grupo de características é:

1. Calcular média geral (Equação 7);

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{e}_i}{m} \quad (7)$$

2. Calcular desvio padrão geral (Equação 8);

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (e_{i,j} - \bar{e})^2}{n \cdot m - 1}} \quad (8)$$

3. Calcular número de graus de liberdade (Equação 9);

$$df = m \cdot n - 1 \quad (9)$$

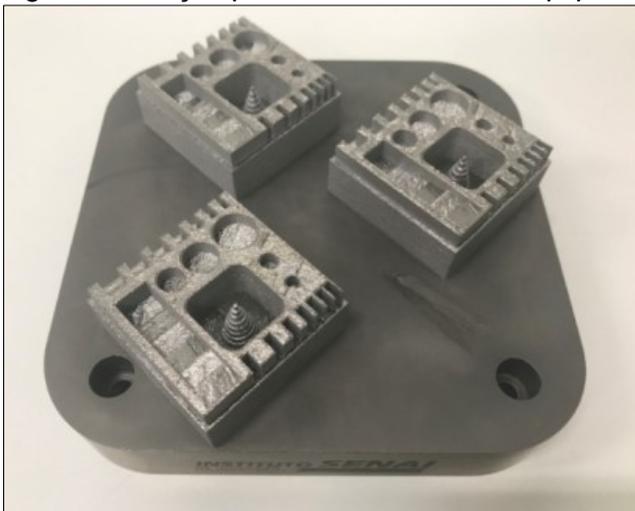
4. Construir intervalo de confiança de acordo com a Equação 10, onde  $t_{df}$  é o coeficiente da distribuição de Student para uma probabilidade de abrangência de 95%.

$$b = \bar{e} \pm t_{df} \cdot \frac{s}{\sqrt{n \cdot m}} \quad (10)$$

## 6 ESTUDO DE CASO

No capítulo 1 foi justificada a utilização de peças padrão para avaliar erros geométricos gerados em processos FSL. No capítulo 2 foram apresentados alguns exemplos de artefatos utilizados em outros processos e para diferentes aplicações. Nos capítulos 3 e 4 foi apresentada uma proposta de peça padrão com base nos artefatos pesquisados, além de um procedimento para fabricação, medição e avaliação estatística dos resultados. Este capítulo contempla, um estudo de caso para validar os procedimentos propostos no capítulo anterior. As Figuras 40 e 41 ilustram as peças produzidas com dois equipamentos, aqui identificados como “A” e “B”.

Figura 40. Peças padrão fabricadas no Equipamento A.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 41. Peças padrão fabricadas no Equipamento B.



Fonte: O autor, 2018.

As fabricações foram realizadas no laboratório de fabricação aditiva do Instituto SENAI de Inovação em sistemas de manufatura e laser, utilizando dois processos FSL alocados no mesmo. O procedimento para execução das fabricações é o mesmo conforme descrito no capítulo 5. As peças foram fabricadas em datas diferentes, sendo que o Equipamento A teve como duração 6 horas e 40 minutos para fabricação das três peças. Já o Equipamento B teve como duração 5 horas e 45 minutos de construção para mais três peças.

Em seguida as peças foram removidas do substrato de fabricação e medidas utilizando também as dependências do SENAI. O equipamento utilizado para medição foi uma MMC do fabricante Mitutoyo, modelo Strato Apex 9166 tipo portal de acionamento CNC, cuja resolução é 0,00002 mm. A seqüência cinemática da MMC é  $Y \rightarrow X \rightarrow Z$  (Portal  $\rightarrow$  Carro  $\rightarrow$  Braço). O sistema de apalpação é constituído do cabeçote Renishaw TM25-20 e do sensor TP20 do mesmo fabricante. A temperatura ambiente especificada para o laboratório é  $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$  e a umidade relativa é  $(50 \pm 10) \%$ . O procedimento para a medição das características das peças padrão, também seguiu o proposto na Seção 5.2. Os parâmetros utilizados nos equipamentos estão descritos nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Parâmetros de construção utilizados no equipamento A.

Parâmetros equipamento A	
Potência do laser	350 W
Velocidade de fabricação	1400 mm/s
Distância de eclosão	0,120 mm
Espessura de camada	0,03 mm
Diâmetro focal do laser	0,07 mm
Temperatura da plataforma	200 °C
Matéria prima	Ti6Al4V

Fonte: O autor, 2018.

Tabela 7. Parâmetros de construção utilizados no equipamento B.

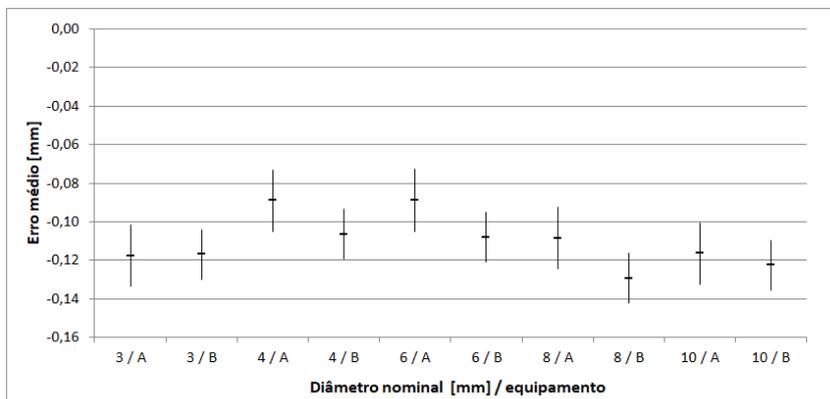
Parâmetros equipamento B	
Potência do laser	200 W
Velocidade de fabricação	1250 mm/s
Distância de eclosão	0,105 mm
Espessura de camada	0,03 mm
Diâmetro focal do laser	0,15 mm
Temperatura da plataforma	N/A
Matéria prima	Ti6Al4V

Fonte: O autor, 2018.

Cada peça foi medida três vezes e o intervalo entre ensaios não foi constante, variando entre alguns minutos. Os dados utilizados para realizar a estatística foram as médias dos valores medidos. A seguir serão apresentados e discutidos os gráficos contendo as informações encontrados nas características medidas utilizando-se a máquina de medição por coordenadas.

Observa-se na Figura 42 os resultados obtidos na medição das peças fabricadas pelos equipamentos A e B, para os diâmetros internos construídos na face superior da peça padrão. As barras de erro representam a repetibilidade desse grupo de características, calculada de acordo com a Equação 6. É possível observar que o diâmetro de 8 mm fabricado pelo equipamento B o maior erro dentre todos os diâmetros, em relação ao seu valor nominal.

Figura 42. Erros obtidos nos diâmetros fabricados na face superior.

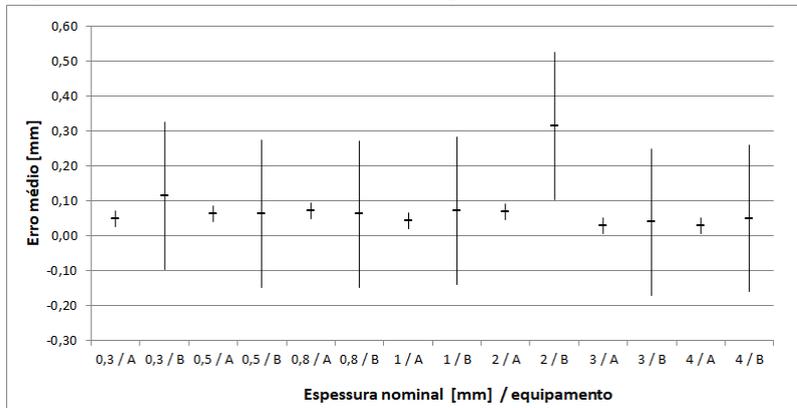


Fonte: O autor, 2018.

A Figura 43 mostra o comportamento do erro médio das espessuras de parede. É possível observar os erros médios encontrados em cada característica

bem como seus intervalos de confiança. Observa-se que para a característica de 2 mm fabricada pelo equipamento B, o erro médio foi o que mais distanciou-se de 0

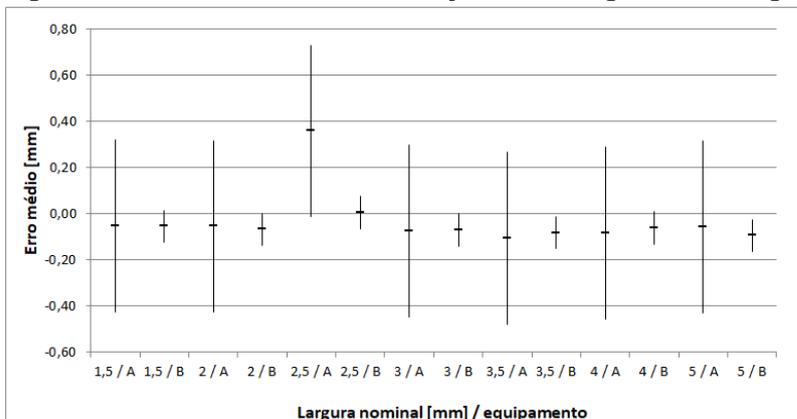
Figura 43. Erros obtidos nas medições das espessuras de parede.



Fonte: O autor, 2018.

Quanto a característica largura de rasgos, a Figura 44 ilustra os erros e intervalos dos valores obtidos a partir das medições. Observa-se que a característica de 2,5mm fabricada pelo equipamento A, foi a que mais distanciou-se de 0

Figura 44. Erros obtidos nas medições das larguras de rasgos.

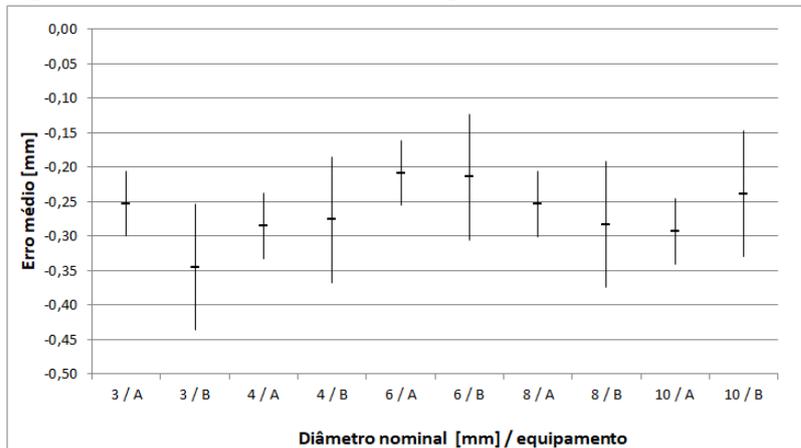


Fonte: O autor, 2018.

Finalmente a Figura 45 demonstra os erros e intervalos obtidos na medição dos diâmetros fabricados na face lateral da peça padrão. A Figura 45 revela que na fabricação dos diâmetros laterais todas as características apresentaram erros

negativos. Além disso, o diâmetro de 3 mm fabricada pelo equipamento B foi o que mais distanciou-se de 0.

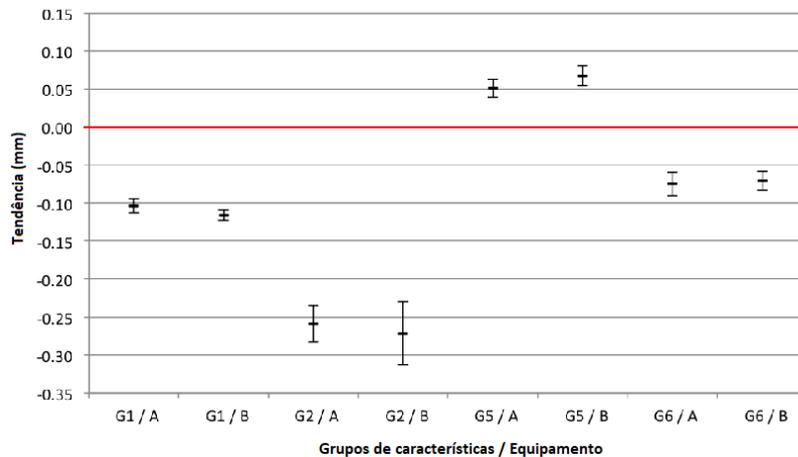
Figura 45. Erros obtidos nas medições dos diâmetros laterais.



Fonte: O autor, 2018.

A Figura 46 compara as tendências dos equipamentos A e B. No eixo X, os grupos de características representadas pela letra “G” onde G1 refere-se aos diâmetros de topo, G2 representa os diâmetros laterais, G5 espessura de paredes e G6 as distancias dos rasgos. Observa-se que todos os valores de tendência são estatisticamente significativos, uma vez que os intervalos de confiança não cobrem o valor “0”. Por outro lado, os intervalos de confiança de ambos os sistemas se sobrepõem para todos os grupos de características, o que significa que não há diferença significativa entre os valores de polarização de ambos os sistemas. Esta é uma evidência de que os vieses são fatores relacionados que não são específicos do equipamento.

Figura 46. Comparativo entre equipamentos.



Fonte: O autor, 2018.

Observa-se que todos os valores de tendência são estatisticamente significativos, uma vez que os intervalos de confiança não cobrem o valor “0”. Por outro lado, os intervalos de confiança de ambos os sistemas se sobrepõem para todos os grupos de características, o que significa que não há diferença significativa entre os valores de tendência de ambos os sistemas. Esta é uma evidência de que as tendências tem causas que não são específicas do equipamento.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível propor uma metodologia para fabricação, medição e verificação de erros gerados por processos FSL, tendo como estudo de caso a aplicação destes procedimentos e a obtenção de três peças fabricadas em dois processos de fabricação por adição de material metálico.

Através da definição de diretrizes de projeto, a peça padrão desenvolvida apresentou características usuais e típicas dos processos de MA.

A identificação das tendências não-dependentes do equipamento somente foi possível com auxílio da avaliação estatística proposta, demonstrando assim sua efetividade.

A tecnologia FSL já é bastante conhecida pela sociedade científica, entretanto ainda incipiente e com poucas pesquisas na área, principalmente sobre defeitos geométricos gerados por estes processos.

Baseando-se nas conclusões apresentadas e na experiência adquirida com este trabalho de pesquisa, sugerem-se as seguintes propostas de estudo para futuros trabalhos:

- Avaliar o erros geométricos gerados em peças após um tratamento térmico para alívio de tensões residuais.
- Implementar melhorias nas diretrizes para desenvolvimento da peça padrão, e torná-la um padrão internacional.

## REFERÊNCIAS

- ABE, F.; OSAKADA, K.; SHIOMI, M.; UEMATSU, K.; MATSUMOTO, M. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 111, p. 210-213, DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00522-2, 2001.
- ABREU, S. A. C. Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Setembro, 2015.
- AUBIN, R. F. A World Wide Assessment of Rapid Prototyping Technologies, United Technologies Research Center Report, East Hartford, CT, Report, 118-145. 1994.
- AVIZ, D. Estudo da técnica de engenharia reversa para construção de geometrias complexas focando erros de forma e métodos de digitalização geométrica. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Tupy, Joinville, 2010.
- BADROSSAMAY, M.; CHILDS, T. H. C. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders. *Inter. Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, p. 779-784, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.013, 2007.
- BALDO C. R., DONATELLI, G. D. Metrology and Manufacturing Process Improvements in a Medium-sized Brazilian Company, VIII International Symposium on Measurement and Quality Control, Erlangen, Germany, October 2005.
- CALIGNANO F; LORUSSO M; PAKKANEN J; TREVISAN F; AMBROSIO E. P.; MANFREDI D.; FINO P. Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting. *Abril*, 2016. DOI 10.1007/s00170-016-8788-9
- CAMPANELLI, S.L; CONTUZZI, N. e LUDOVICO, A.D. Manufacturing of 18 Ni Marage 300 steel samples by selective laser melting. *Advanced Materials Research*, Vol. 83-86, February 2010, 850-857, ISBN 0-87849-297-6
- CHAPMAN, M. Machine tool calibration - don't compromise. *Quality today*, pp. 22 - 24, Janeiro, 1996.
- CHILDS, T.H.C.; HAUSER, C.; BADROSSAMAY, M. Mapping and modelling single scan track formation in direct metal selective laser melting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 53, i. 1, p. 191-194, 2004.
- CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 3ª Edição, 2010.

COOKE, A. L; SOONS, J.A. Variability in the geometric accuracy of additively manufactured test parts. In: 21st annual international solid freeform fabrication symposium, Austin, Texas, USA, pp 1–12. 2010.

Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, University of Nottingham, July 1994, pp. 327 – 339.

DEUS, A.; MAZUMDER, J. Three dimensional finite element models for the calculation of temperature and residual stress fields in laser cladding. ICALEO 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. Scottsdale, Arizona - EUA, 30 out. – 2 nov., 2006.

DONACHIE, M. J. Titanium: A Technical Guide. ASM International, 2000.

EVERTON, S. K; HIRSCH, M; STRAVROULAKIS, P; LEACH, R. K; CLARE, A. T. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. Materials and Design. Edition 95, p 431–445, 2016.

FAHAD, M; HOPKINSON, N. A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing (AM) processes. 2nd International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering (ICMPAE'2012) Singapore April. p 28-29, 2012.

FISCHER, P.; ROMANO, V.; WEBER, H. P. KARAPATIS, N. P.; BOILLAT, E.; GLARDON, R. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd:YAG laser source. Acta Materialia, v. 51, n. 6, p. 1651-1662, 2003.

GERMANOVIX, A. A. Establishing a benchmark part to analyse the capabilities of Selective Laser Melting systems. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais, 2011.

GONÇALVES, C. R. Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte, 91p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

GUSAROV, A. V.; LAOUI, T.; FROVEN, L.; TITOV, V. I. Contact thermal conductivity of a powder bed in selective laser sintering. Inter. Journal of Heat and Mass Transfer, v. 46, p. 1103-1109, DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00370-8, 2003.

LARY, G. Comparison of rapid prototyping systems, Proceedings of First European Conference on Rapid Prototyping, University of Nottingham, July 1992, pp. 243 – 254.

HANDBOOK ASM. Properties and selection: Irons, steels and high performance alloys. ASM International, The Materials Information Company, EUA, v. 1, p. 1303-1408, 1990.

HATAMURA, Y. and NAGAO, T. Development of an intelligent machining center incorporating active compensation for thermal distortion. Proceeding - CIRP, Vol.42/1, pp. 549-552, 1993.

HESTON, T. Analyzing the potential of the solid-state laser: Fiber laser technology begins to penetrate the market. The Fabricator, Rockford – EUA, jul. 2010. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/lasercutting/analyzing-the-potential-of-the-solid-state-laser>>. Acesso em: 07 jan. 2014.

ISO/ASTM 52900:2015, Standard, 2015. Additive manufacturing – general principles – terminology. International Organization for Standardization (ISO). ISO Central Secretariat, Geneva, Switzerland.

Jayaram, D. Bagchi, A. Jara-Almonte, C. Benchmarking of Rapid Prototyping Systems - Beginning to Set Standards, Solid Freeform Fabrication Proceedings, 146-153. 1994.

KRUTH, J.P., Material in excess manufacturing by rapid prototyping techniques. CIRP Annals, Vol. 40, Number 2, 1991, pp. 1603 – 1615.

KRUTH, J.P., VANDENBROUCKE, 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.

KASHYAP. Fiber Bragg grating. Academic Press, 1999

KELLER, P; MENDRICKY, R. Parameters Influencing The Precision Of SLM Production. MM Science Journal. October, p 705-710. 2015. DOI: 10.17973/MMSJ.2015\_10\_201540

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 47, i. 2, p. 525-540, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63240-5, 1998.

KRUTH, J. P.; MERCELIS, P.; VAN VAERENBERGH, J. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, v. 11, p. 26-36, DOI: 10.1108/13552540510573365, 2005.

LEVY, G. N.; SCHINDEL, R.; KRUTH, J. P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) Technologies, state of the art and future perspectives. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v. 52, i. 2, p. 589-609, DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60206-6, 2003.

LIMA, C.B.S. Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida – Estudo de Casos, 91 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

LOPES, J. C. O. Os aços maraging. Revista Ciência e Tecnologia dos Materiais, v. 19, n° 1/2, ISSN 0870-8312, 2007.

MARQUES, S. Rapport de Recherche: Utilisation de la poudre métallique INOX420 (-32µm) par Fusion Selective par Laser. Laboratoire DIPI, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, 31 de Março, 2013.

Melo, S. A. Minimização dos erros micro e macro geométricos em peças torneadas usando a metodologia de superfície de resposta, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2016.

MELLOR, S; HAO, L; ZHANG, D. Additive manufacturing: A framework for implementation. Int. J. Production Economics 149. p 194–201. 2014

MONTEIRO, M T F. A impressão 3d no meio produtivo e o design [manuscrito]: um estudo na fabricação de joias / Marco Túlio Ferreira Monteiro. - 2015.

MOREIRA, A. C. MICRODUREZA APLICADA NA COMPARAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS APÓS PROCEDIMENTOS DE FABRICAÇÃO NO AÇO 1045. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2014

MAHESH, M., WONG, Y. S., FUH, Y. H., LOH, H. T. Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes. Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, Number 2, 2004, pp. 123 – 135.

SHELLABEAR, Benchmarking study of accuracy and surface quality in RP models. RAPTEC, Task 4.2, Report 2, 1999.

NASA. Agencia Aeroespacial Americana. Disponível em: <http://www.nasa.gov/press/2014/august/sparks-fly-as-nasa-pushes-the-limits-of-3-d-printingtechnology/index.html#.Vp1xDhUrLIU> Último acesso em: 18. Mai. 2017.

N. P. JUSTER, T. H. C. CHILDS, “A comparison of rapid prototyping processes” Proceedings of Third European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, University of Nottingham, Julho 1994, pp. 35 – 52.

IPPOLITO, N.R., IULIANO, L., FILIPPI, A., A new user part for performance evaluation of rapid prototyping systems. 3rd European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Nottingham, 1994

PRINZ, F. B. JTEC/WTEC Painel Report. no Rápida Prototyping in Europe and Japan. Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, EUA, 1997.

ROMBOUTS, M. Selective laser sintering/melting of iron-based powders. Tese, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, 2006.

SALLICA-LEVA, E.; JARDINI, A. L.; FOGAGNOLO, J. B. Microstructure and mechanical behavior of porous Ti6Al4V parts obtained by selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 26, p. 98-108, DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.05.011, 2013.

SANTOS, E. C.; SHIOMI, M.; OSAKADA, K.; LAOUI, T. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *Inter. Journal of Machine Tools and Manufacturing*, v. 46, p. 1459-1468, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.005, 2006

SEABRAA, M; AZEVEDOB, J; ARAÚJO, A; REISA, L; PINTO, E; ALVES, N; SANTOS, R; MORTÁGUA, J. P. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes. *Procedia Structural Integrity* 1 (2016) 289–296.

SOUZA, 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. Julho. 2000.

TAYLOR, C. M.; CHILDS, T. H. C.; HAUSER, C. Morphology of direct SLS-processed stainless steel layers. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, p. 530-537, 2002.

TRAPET, E, WÄLDELE, F. A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines. *Measurement*, Vol. 9, No 1, pp. 17 - 21, 1991.

TULLAR, P. Machine Tool evaluation produces results. *American Machinist*, p. 63-65, apr. 1996.

VOLPATO, N. (Ed.). *Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações*. São Paulo: Blücher, p 4-10, 2007.

XU, F., WONG, Y. S., LOH, H. T. Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(5), 283-296. 2001.

Wohlers Report 2012, Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, 2012.

YADROITSEV, I.; BERTRAND, Ph.; SMUROV, I. Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science*, v. 253, i. 19, p. 8064-8069, DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.088, 2007.

YADROITSEV, I.; PAVLOV, M.; BERTRAND, Ph.; SMUROV, I. Mechanical properties of samples fabricated by selective laser melting. 14th European Meeting of Rapid Prototyping & Manufacturing, 24-25 Junho 2009, Paris.

YADROITSEV, I. Selective Laser Melting: Direct Manufacturing of 3D-objects by Selective Laser Melting of Metal Powders. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Acad. Publ., 2010.

YADROITSEV, I.; SMUROV, I. Surface morphology in selective laser melting of metal powders. Physics Procedia, v. 12, p. 264 – 270, DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.034, 2011.

YADROITSEV, I.; BERTRAND, Ph. Selective laser melting in micro manufacturing. Annals of DAAAM and Proceeding of 21st DAAAM International Symposium, p. 319-321, 2010.

ZHANG, B.; DEMBINSKI, L.; CODDET, C. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder. Materials Science and Engineering A, v. 584, p. 21-31, 2013.

ZHOU, J. G., HERSCOVICI, D., & CHEN, C. C. Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(3), 363-379. 2000.

## ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO – MMC

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO DE METROLOGIA**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 05759/17 ✓**

Cliente : SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL ✓  
Endereço : Rua Arno Waldemar Dohler, 308 - Joinville - SC - CEP - 89219-510

Ordem de Serviço : 046.226/003

**I. Objeto Calibrado :**

Máquina de Medição por Coordenadas ✓  
Fabricante : Mitutoyo ✓  
MMC Modelo : STRATO-APEX9166 ✓  
No de Série : 60083181 / Código : 355-517 ✓  
Identif. do Cliente : DIM ✓  
Faixa Nominal : 900 x 1600 x 600 mm ✓  
Contador Digital / Controlador  
Modelo : UC400 ✓  
No Série : 1151412 ✓  
Resolução : 0,00002 mm ✓  
Cabeçote  
Modelo : PH-10MQ ✓  
No Série : 530G62 ✓  
Prnha  
Modelo : SP25M ✓  
No Série : 310 ✓  
Rack  
Modelo : FCR25 ✓  
No Série : N/C ✓  
Programa de Medição  
Programa : Geopakwin ✓  
Versão : 3.5R6 ✓  
Dongle No. : 12-12125547 ✓

*APROVADO*  
*Tarcisio Boegershausen*  
*Tarcisio Boegershausen*  
*Gerente Técnico - Latscme*  
*15/09/17*

**II. Notas:**

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k$ , o qual para uma distribuição  $t$  com  $V_{eff}$  graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02. ✓
3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. ✓
4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 3. ✓
6. Condição ambiental: Temperatura ambiente:  $(19,1 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$  ✓
7. Endereço e local da calibração são os mesmos.

**III. Padrões utilizados :**

Padrão Escalonado	Termômetro	Esfera Padrão
No Série : 069005	No Série : HKSBA017	No Série : R0662
Certificado No : 1409321	Certificado No : T0725/2017	Certificado No : 2403/17
Emitido em : 22/10/14	Emitido em : 07/06/2017	Emitido em : 18/07/2017
Validade : 10/2018 ✓	Validade : 06/2019 ✓	Validade : 07/2019 ✓

Data da Calibração : 24 de agosto de 2017  
Data da Emissão : 04 de setembro de 2017

Pag.: 1 / 6 ✓

*Eduardo Ferreira Miranda*  
Signatário autorizado

Este certificado atende aos requisitos de acreditação do Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).  
A reprodução deste certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.  
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

Endereço: Rod. Lindo Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0026 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

# Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 05759/17 ✓**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

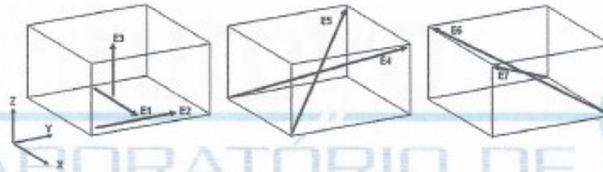
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

#### IV. Resultado das Medições :

##### 4.1. Verificações iniciais do equipamento :

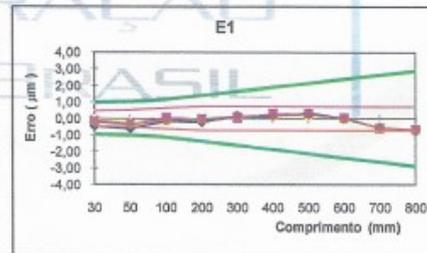
- a. Movimento da Máquina : OK ✓
- b. Condições da área de Medição : OK ✓
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK ✓
- d. Limpeza das superfícies de ref. : OK ✓

##### 4.2. Resultado da Medição:



##### 4.2.1. Resultado da medição do eixo " X ", ( E1 )

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,46	-0,12	-0,03	-0,20 ✓
50	-0,63	-0,26	-0,22	-0,37 ✓
100	-0,15	0,05	-0,15	-0,08 ✓
200	-0,22	-0,02	0,06	-0,06 ✓
300	0,11	0,07	0,21	0,13 ✓
400	0,11	0,29	0,15	0,18 ✓
500	0,34	0,28	0,18	0,27 ✓
600	0,01	0,05	0,02	0,03 ✓
700	-0,54	-0,58	-0,53	-0,55 ✓
800	-0,73	-0,66	-0,63	-0,67 ✓



Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,2 + L/3000 )  $\mu\text{m}$

Fator de abrangência ( k ) = 2,15

Graus de liberdade (  $V_{\text{eff}}$  ) = 18

, onde: L = comprimento em " mm ".

Pag.: 2 / 6 ✓



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

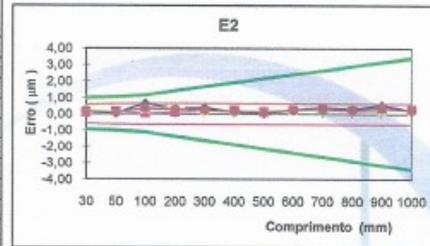
**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 05759/17 ✓**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

**4.2.2. Resultado da medição do eixo "Y", ( E2 )**

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,13	0,09	0,31	0,18 ✓
50	0,05	0,15	0,14	0,11 ✓
100	0,64	0,04	0,31	0,33 ✓
200	0,30	0,11	0,40	0,27 ✓
300	0,37	0,19	0,11	0,22 ✓
400	0,14	0,22	0,14	0,17 ✓
500	0,05	0,11	0,25	0,14 ✓
600	0,26	0,24	0,24	0,25 ✓
700	0,39	0,31	0,31	0,34 ✓
800	0,29	0,21	0,29	0,26 ✓
900	0,54	0,25	0,26	0,35 ✓
1000	0,22	0,28	0,23	0,24 ✓



Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,2 + L/3000 )  $\mu\text{m}$

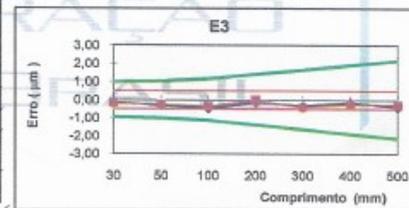
Fator de abrangência ( k ) = 2,07

Graus de liberdade ( Veff ) = 36

, onde: L = comprimento em " mm ".

**4.2.3. Resultado da medição do eixo "Z", ( E3 )**

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,12	-0,17	-0,31	-0,20 ✓
50	-0,32	-0,26	-0,18	-0,25 ✓
100	-0,50	-0,35	-0,34	-0,40 ✓
200	-0,16	-0,02	-0,10	-0,09 ✓
300	-0,33	-0,45	-0,44	-0,41 ✓
400	-0,13	-0,23	-0,36	-0,24 ✓
500	-0,42	-0,29	-0,19	-0,30 ✓



Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,18 + L/600 )  $\mu\text{m}$

Fator de abrangência ( k ) = 2,00

Graus de liberdade ( Veff ) = infinito

, onde: L = comprimento em " mm ".

Pag.: 3 / 6 ✓

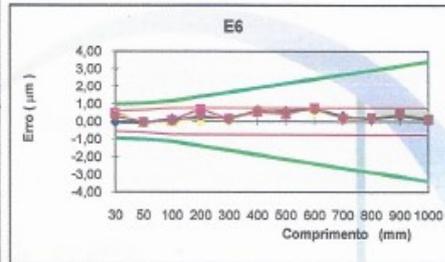
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 05759/17 ✓**
**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

**4.2.6. Resultado da medição do volume, ( E6 )**

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,06	0,47	0,39	0,27 ✓
50	-0,09	-0,05	0,01	-0,04 ✓
100	0,13	0,06	-0,09	0,03 ✓
200	0,17	0,68	0,09	0,31 ✓
300	0,17	0,14	0,12	0,14 ✓
400	0,63	0,35	0,67	0,62 ✓
500	0,39	0,42	0,53	0,51 ✓
600	0,72	0,76	0,65	0,71 ✓
700	0,29	0,17	0,20	0,22 ✓
800	0,11	0,21	0,26	0,19 ✓
900	0,30	0,43	0,48	0,40 ✓
1000	0,07	0,12	0,29	0,16 ✓

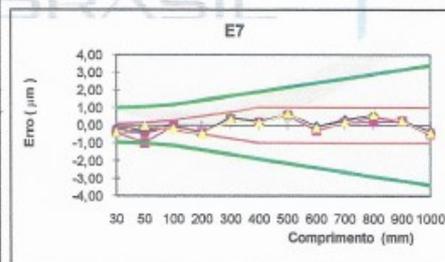

 Incerteza de medição expandida ( U ) =  $( 0,21 + L/3000 ) \mu\text{m}$ , onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência ( k ) = 2,04

 Graus de liberdade (  $\nu_{\text{eff}}$  ) = 59

**4.2.7. Resultado da medição do volume, ( E7 )**

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,19	-0,43	-0,42	-0,35 ✓
50	-0,30	-1,00	-0,02	-0,44 ✓
100	-0,01	-0,02	-0,20	-0,08 ✓
200	-0,44	-0,42	-0,48	-0,45 ✓
300	0,40	0,33	0,32	0,35 ✓
400	0,18	0,15	0,13	0,15 ✓
500	0,62	0,58	0,63	0,61 ✓
600	-0,07	-0,30	-0,14	-0,17 ✓
700	0,31	0,16	0,16	0,21 ✓
800	0,56	0,20	0,58	0,45 ✓
900	0,26	0,22	0,25	0,24 ✓
1000	-0,36	-0,50	-0,46	-0,44 ✓


 Incerteza de medição expandida ( U ) =  $( 0,21 + L/3000 ) \mu\text{m}$ , onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência ( k ) = 2,16

 Graus de liberdade (  $\nu_{\text{eff}}$  ) = 18

Pag.: 5 / 6 ✓



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

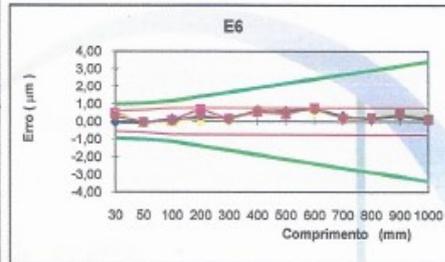
## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 05759/17 ✓

## REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o numero CAL 0031

## 4.2.6. Resultado da medição do volume, ( E6 )

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,06	0,47	0,39	0,27 ✓
50	-0,09	-0,05	0,01	-0,04 ✓
100	0,13	0,06	-0,09	0,03 ✓
200	0,17	0,68	0,09	0,31 ✓
300	0,17	0,14	0,12	0,14 ✓
400	0,63	0,35	0,67	0,62 ✓
500	0,39	0,42	0,53	0,51 ✓
600	0,72	0,76	0,65	0,71 ✓
700	0,29	0,17	0,20	0,22 ✓
800	0,11	0,21	0,26	0,19 ✓
900	0,30	0,43	0,48	0,40 ✓
1000	0,07	0,12	0,29	0,16 ✓

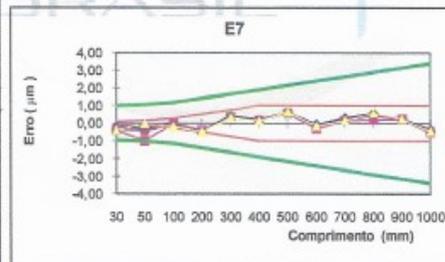
Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,21 + L/3000 )  $\mu\text{m}$  , onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência ( k ) = 2,04

Graus de liberdade ( Veff ) = 59

## 4.2.7. Resultado da medição do volume, ( E7 )

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,19	-0,43	-0,42	-0,35 ✓
50	-0,30	-1,00	-0,02	-0,44 ✓
100	-0,01	-0,02	-0,20	-0,08 ✓
200	-0,44	-0,42	-0,48	-0,45 ✓
300	0,40	0,33	0,32	0,35 ✓
400	0,18	0,15	0,13	0,15 ✓
500	0,62	0,58	0,63	0,61 ✓
600	-0,07	-0,30	-0,14	-0,17 ✓
700	0,31	0,16	0,16	0,21 ✓
800	0,56	0,20	0,58	0,45 ✓
900	0,26	0,22	0,25	0,24 ✓
1000	-0,36	-0,50	-0,46	-0,44 ✓

Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,21 + L/3000 )  $\mu\text{m}$  , onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência ( k ) = 2,16

Graus de liberdade ( Veff ) = 18

Pag.: 5 / 6 ✓

