

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**GABRIELLI LAURINDO**

**INFLUÊNCIA DO FATIAMENTO ADAPTATIVO EM PEÇAS  
PRODUZIDAS POR FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO**

**FLORIANÓPOLIS  
2017**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA**

**GABRIELLI LAURINDO**

**INFLUÊNCIA DO FATIAMENTO ADAPTATIVO EM PEÇAS PRODUZIDAS POR  
FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC, Campus Florianópolis.

Orientador: Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto

Gabrielli Laurindo

INFLUÊNCIA DO FATIAMENTO ADAPTATIVO EM PEÇAS PRODUZIDAS POR FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO/ Gabrielli Laurindo. – Florianópolis, 2017-59p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Aurélio da Costa Sabino Netto

– Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2017.

1. Fatiamento adaptativo. 2. FDM. 3. FFF. 4. Manufatura aditiva. I. Aurélio da Costa Sabino Netto. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. INFLUÊNCIA DO FATIAMENTO ADAPTATIVO EM PEÇAS PRODUZIDAS POR FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO.

# **INFLUÊNCIA DO FATIAMENTO ADAPTATIVO EM PEÇAS PRODUZIDAS POR FABRICAÇÃO POR FILAMENTO FUNDIDO**

**GABRIELLI LAURINDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC, Campus Florianópolis.

Data de Aprovação: Florianópolis, 15 de Dezembro de 2017

## **Banca Examinadora**

---

Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto  
Orientador

---

Prof. André Roberto de Sousa  
Membro da Banca

---

Prof. Diovani Lecina  
Membro da Banca

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais, Ilmar e Marina, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço aos meus irmãos, Gabriel e Milena, pelo companheirismo e divertimento nos tão necessários momentos de distração.

Aos meus colegas, Kisa, Max, Marcos, Michel e Vinicius, pelas incontáveis horas de estudo extra classe e execução de PI's.

As sempre amigas, Thuany e Maryana, por sempre estarem presentes nos momentos bons e também nos não tao bons.

Ao Vinícius Godim, pelo apoio, constante compartilhamento de conhecimento e tutoria no uso do LaTeX.

Ao professor Aurélio da Costa Sabino Netto, pela orientação deste trabalho.

Ao professor André Roberto de Souza pelo auxílio no uso dos equipamentos do laboratório de metrologia.

Ao IFSC por permitir e fornecer suporte para a realização deste trabalho.

“O conhecimento é única coisa que não  
podem tirar de você.”

(Autor Desconhecido)

## RESUMO

O processo de manufatura aditiva por Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) teve sua principal patente propriedade da empresa Stratasys Ltd, extinta na década de noventa, fato que tornou o processo largamente conhecido e abriu concorrência reduzindo seus custos de processamento. Esse processo é a principal solução para obtenção de alta produtividade e baixo custo na construção de protótipos. Porém a qualidade superficial, a precisão dimensional e a precisão geométrica da peça, ficam comprometidas devido a fatores intrínsecos do processo. Uma peça fabricada com tecnologia de fabricação por filamento fundido (FFF) pode ser produzida em alta velocidade se construir camadas de grande espessura, porém compromete seu acabamento superficial, principalmente em geometrias curvas ou inclinadas em relação ao eixo de ascensão das camadas. O fatiamento adaptativo (FA) pode ser uma alternativa para conciliar uma redução do tempo sem comprometer a qualidade do acabamento das superfícies. O FA consiste em refinar a espessura de camada somente em regiões onde esta é fundamental para garantir a qualidade final da peça.

Este trabalho apresenta a aplicação da tecnologia de fatiamento adaptativo, utilizando software Simplify3D, considerando as características da tecnologia de fabricação por filamento fundido. Fabricaram-se quatro grupos de peças com o mesmo formato geométrico e dimensional, variando-se entre os grupos a espessura de camada no fatiamento. Foram fabricadas cinco peças de cada grupo. Com altura de camada de 0,4mm, 0,3mm, 0,2mm e outro com fatiamento adaptativo. Em seguida foram implementados testes para verificar a geometria e dimensões resultantes das peças. Estes testes foram feitos utilizando equipamento de medição por coordenada, verificando-se medidas de raio e circularidades das peças fabricadas e comparando-se com o valor nominal do modelo. Também obteve-se o tempo de fabricação para as peças. Os resultados apresentaram a viabilidade do modelo proposto para o processo FFF, permitindo uma redução no tempo de fabricação, mantendo a qualidade dimensional e geométrica, e ainda, o acabamento superficial do protótipo.

**Palavras-chave:** manufatura aditiva. FDM. FFF. fatiamento adaptativo.

## ABSTRACT

The manufacturing process for Fused Deposition Modeling (FDM), which had its main patent owned by Stratasys Ltd (CRUMP, 1992), became extinct in the 1990s, a fact that made the process widely known and opened competition by reducing its processing costs. It's the main solution to obtain high productivity and low cost in the construction of prototypes. However the superficial quality, dimensional precision and geometric precision of the part, are compromised due to the intrinsic factors of the process. A part manufactured with FDM technology can be produced at high speed if it constructs layers of high thickness, however, compromising its surface finish, mainly in curved or inclined geometries in relation to the axis of ascent of the layers. Adaptive slicing (AS) may be an alternative to reconcile a reduction of time without compromising the quality of surface finishing. The AS consists of refining the layer thickness only in regions where it is critical to guarantee the final quality of the part.

This work presents the implementation of adaptive slicing technology, using Simplify3D software, considering the characteristics of the Fused Filament Fabrication technology. Four groups of parts with the same geometric and dimensional shape were produced, the groups varying the layer thickness in the slicing. Five parts of each group were made with a layer thickness of 0.4mm, 0.3mm, 0.2mm and another with adaptive slicing. Then it was implemented and some tests to verify the resulting geometry and dimension of the parts. These tests were made using coordinate measuring machine, with measurements of radius and circularity of the manufactured parts were verified and compared with the nominal value of the model. The manufacturing time for the parts was also obtained. The results will present the feasibility of the proposed model for the FFF process, allowing a reduction in the manufacturing time, maintaining the dimensional and geometric quality, and also the surface finishing of the prototype.

**Keywords:** additive manufacturing. FDM. FFF. adaptive slicing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito Escada . . . . .	15
Figura 2 – Etapas do processo de manufatura aditiva . . . . .	18
Figura 3 – Princípio do processo FDM do equipamento Stratasys, Inc. . . . .	18
Figura 4 – Modelo sólido em CAD (a) convertido para o formato STL (b) . . . .	21
Figura 5 – Fatiamento do modelo sólido . . . . .	21
Figura 6 – Fatiamento uniforme (a) e adaptativo (b) . . . . .	22
Figura 7 – Estratégias de preenchimento com variação de 90° entre camadas .	25
Figura 8 – Impressora 3D Delta . . . . .	26
Figura 9 – Máquina de medir por coordenadas LK G-80C . . . . .	28
Figura 10 – Geometria da peça . . . . .	29
Figura 11 – espessura de camada e tempo de fabricação . . . . .	30
Figura 12 – espessura de camada variável (fatiamento adaptativo) . . . . .	31
Figura 13 – Medição de forma e dimensão. . . . .	32
Figura 14 – Contorno do perfil medido do arco inferior (a) e superior (b) . . . .	38
Figura 15 – Diagrama de caixa para o raio do arco superior em função da peça .	39
Figura 16 – Diagrama de caixa para o raio do arco inferior em função da peça .	40
Figura 17 – Diagrama de caixa para a circularidade do arco superior em função da peça . . . . .	41
Figura 18 – Diagrama de caixa para a circularidade do arco inferior em função da peça . . . . .	42
Figura 19 – Acabamento com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,4mm. . . . .	43
Figura 20 – Acabamento com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,3mm. . . . .	44
Figura 21 – Acabamento com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm. . . . .	45
Figura 22 – Acabamento com fatiamento adaptativo em detalhe. . . . .	46
Figura 23 – Acabamento com fatiamento adaptativo. . . . .	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros fixos . . . . .	30
Tabela 2 – Tempo de fabricação . . . . .	34
Tabela 3 – Tabela ANOVA para as medidas do raio do arco superior . . . . .	34
Tabela 4 – Tabela ANOVA para as medidas de circularidade do arco superior .	35
Tabela 5 – Tabela ANOVA para as medidas do raio do arco inferior . . . . .	35
Tabela 6 – Tabela ANOVA para as medidas de circularidade do arco inferior .	35
Tabela 7 – Regressão linear das medidas do raio do arco superior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência . . . . .	36
Tabela 8 – Regressão linear das medidas do raio do arco inferior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência . . . . .	36
Tabela 9 – Regressão linear das medidas de circularidade do arco superior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência .	37
Tabela 10 – Regressão linear das medidas de circularidade do arco inferior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência .	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials - Sociedade Americana para Ensaios de Materiais
CAD	Computer Aided Design – Desenho assistido por computador
CNC	Computer Numerical Control - Controle Numérico Computadorizado
FA	Fatiamento adaptativo
FDM	Fused Deposition Modeling - Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	Fused Filament Fabrication - Fabricação por Filamento Fundido
MA	Manufatura Aditiva
PLA	Poly Lactic Acid - Poli Ácido Láctico
PR	Prototipagem rápida
SLS	Selective Laser Sintering - Sinterização Seletiva a Laser
STL	Standard Tessellation Language

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivos específicos	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	MANUFATURA ADITIVA (MA)	17
2.2	MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO	18
2.2.1	Processo de manufatura aditiva por extrusão	18
2.2.2	Equipamentos de manufatura aditiva por extrusão	19
2.3	CRIAÇÃO DO MODELO CAD	20
2.4	FORMATO STL	20
2.5	FATIAMENTO DO MODELO CAD	21
2.5.1	Fatiamento adaptativo	22
2.5.2	Softwares para o processo de fatiamento de peças	23
2.5.3	Parâmetros e estratégias de preenchimento para o processo FFF	24
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>26</b>
3.1	EQUIPAMENTO DE IMPRESSÃO 3D	26
3.2	MATÉRIA PRIMA UTILIZADA NO PROCESSO (FFF)	26
3.3	PEÇA PADRÃO	27
3.3.1	Procedimento de fatiamento	29
3.3.2	Condição experimental	31
3.4	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	31
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>34</b>
4.1	TEMPO DE FABRICAÇÃO	34
4.1.1	MEDIÇÃO DE DIMENSÃO E DE FORMA	34
4.2	ACABAMENTO SUPERFICIAL	43
4.3	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>49</b>
5.1	CONCLUSÕES	49
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>50</b>

<b>APÊNDICE A – PROGRAMA EM R . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE B – IMAGENS PERFIL CIRCULARIDADE . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE C – DADOS MMC . . . . .</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

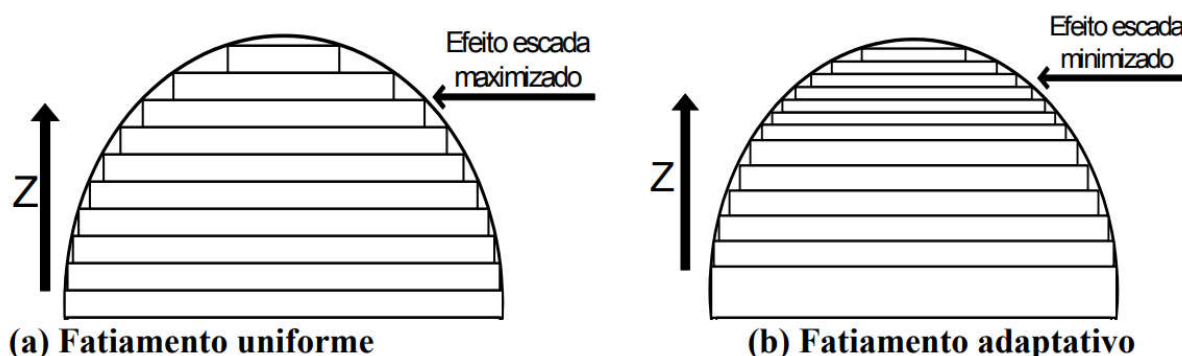
Com a globalização, a concorrência entre as empresas cresceu, e para manter a competitividade é necessário investir constantemente em pesquisas e desenvolvimento de tecnologias visando desenvolver novos produtos e processos.

A popularização da prototipagem rápida permitiu a redução de tempo e custo no ciclo de desenvolvimento de produto. Após a extinção da principal patente da tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM), da empresa Stratasys Ltd (CRUMP, 1992), o processo de manufatura aditiva, tornando-se largamente conhecido e abriu concorrência, reduzindo seus custos de processamento, e tornou-se a principal solução para obtenção de alta produtividade e baixo custo na construção de protótipos. Assim, o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de prototipagem rápida por fusão e deposição cresceu exponencialmente, e o processo FDM, tornou-se conhecido como *Fused Filament Fabrication* (FFF), que trabalha com a fabricação através da adição de material, ou seja, o sólido é construído a partir da extrusão contínua de um filamento pré-fabricado de polímero fundido, que permite a extrusão de camada por camada resultando na construção de objetos em 3D (WIMPENNY *et al.*, 2016).

Na manufatura aditiva, praticamente qualquer sólido possível de ser modelado em um software CAD (*Computer-Aided Design*) pode ser produzido, desde que aplicado técnicas e estratégias de construção adequadas para as diferentes geometrias, sabendo-se que a fabricação por filamento fundido é fortemente influenciada por fatores externos, como temperatura, umidade, características intrínsecas do polímero utilizado como matéria-prima e etc.

No planejamento de processo de manufatura aditiva, existe a possibilidade de dois tipos de fatiamento, o uniforme e o adaptativo. O método uniforme ou convencional consiste na obtenção de camadas de espessuras constantes ao longo do eixo Z de construção (Figura 1), ou seja, não consideram a geometria do modelo, como picos e vales, que podem ter sua reprodução afetada pelos parâmetros de fatiamento (MANI *et al.*, 1999). No fatiamento adaptativo (FA), a espessura das camadas varia de acordo com a geometria da região da peça para que o efeito de escada em relação à geometria CAD seja minimizado como na Figura 1.

Figura 1 – Efeito Escada



Fonte: Volpato *et al.* (2009)

Kulkarni e Dutta (1996) citam três principais vantagens do FA em relação ao fatiamento uniforme:

- a ) Melhoria da qualidade do acabamento superficial do protótipo, em função da diminuição do efeito escada (Figura 1);
- b ) Redução do tempo de construção do protótipo, pois em regiões onde não se verifica o efeito escada é possível utilizar camadas mais espessas, diminuindo assim, o número de camadas necessárias à fabricação;
- c ) Melhoria da precisão geométrica e dimensional do protótipo devido à amenização do efeito escada e da análise dos picos e vales.

### 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Os modelos produzidos pela tecnologia de manufatura aditiva, são normalmente construídos utilizando fatiamento uniforme, que consiste na obtenção de camadas de espessuras constantes ao longo do eixo z de construção do protótipo. O fatiamento uniforme não leva em consideração detalhes geométricos do modelo, podendo resultar em uma geometria indesejada caso a espessura de camada seja muito grande, ou, pode resultar em um tempo de processamento muito elevado, caso seja muito estreita.

O problema da manufatura aditiva é obter um protótipo com boa precisão geométrica e bom acabamento superficial (DOLENC; MAKELA, 1994). A melhoria dos fatores que influenciam na qualidade do protótipo torna o processo cada vez mais eficaz e veloz. O tempo de fabricação do protótipo se relaciona diretamente com os

custos envolvidos no projeto e com o tempo de lançamento do produto no mercado. Uma solução que proporcionaria melhoria no acabamento superficial, seria reduzir a espessura de camada, de forma que os efeitos de degrau na superfície da peça seriam minimizados, porém, isso resultaria no aumento do tempo de fabricação da peça.

A utilização do fatiamento adaptativo como estratégia de construção do protótipo, permite que o mesmo seja produzido com camadas bem refinadas, onde se faz necessário maior detalhamento da geometria, e utilizando camadas mais grosseiras onde não há detalhes relevantes na geometria, e conseqüentemente reduzindo o tempo de fabricação. Desta forma, é possível aproveitar as vantagens da parametrização de camadas mais estreitas e camadas mais espessas, entretanto, questões como acabamento superficial final da peça e qualidade dimensional precisam ser melhor investigadas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é identificar a influência do fatiamento adaptativo na geometria e superfície de um protótipo.

### 1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a ) Comparar a influência do fatiamento adaptativo no tempo de fabricação;
- b ) Avaliar a influência do fatiamento adaptativo na precisão dimensional e de forma da peça fabricada;
- c ) Comparar a influência do fatiamento adaptativo no acabamento superficial das peças fabricadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA (MA)

A tecnologia de Prototipagem Rápida (PR) emergiu na década de 80, com foco em criação de modelos tridimensionais a partir de sistemas computacionais de desenvolvimento. Com isso, várias tecnologias diferentes no campo da Prototipagem Rápida foram criadas, cada qual com suas particularidades e aplicações mais apropriadas (GLUTCO, 2017).

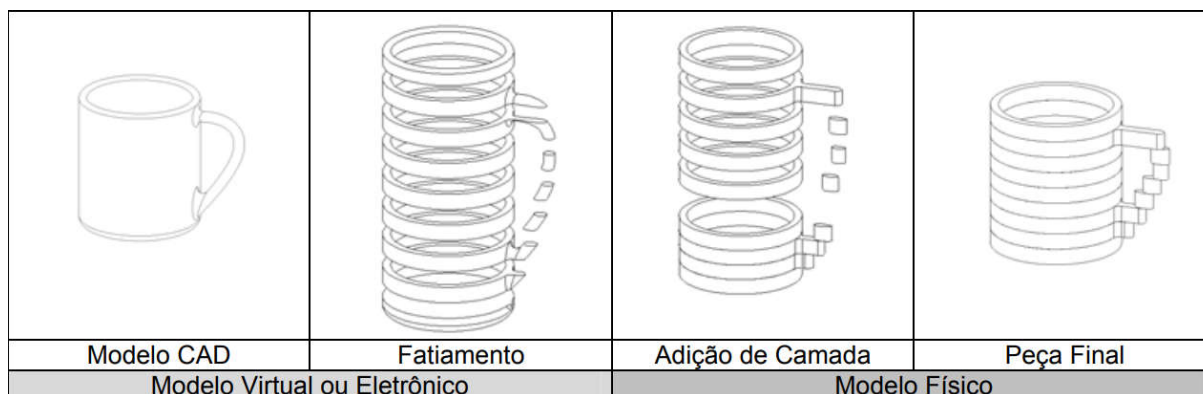
O termo manufatura aditiva adotado pela norma ASTM F2792 se aplica aos processos de fabricação a partir união camada à camada originada de um modelo tridimensional (ASTM International, 2010). O primeiro sistema de MA, a Estereolitografia (SL), criava objetos gradativamente, na qual cada camada é formada pela varredura de um *laser* sobre uma superfície xy de um volume de mistura de monômeros líquidos (LAN *et al.*, 1997). Desde então, os processos se tornaram cada vez mais diversificados e com aplicações mais abrangentes.

Segundo Tooren *et al.* (2017), as principais diferenças entre os processos de manufatura aditiva são os tipos de materiais processados e a forma como que eles são depositados e unidos. A fabricação por modelagem por fusão e deposição se baseia na extrusão de fluidos, como, por exemplo, polímeros fundidos e sólidos plastificáveis como argilas ou cerâmicas, de forma a produzir as camadas, seguido por solidificação espontânea ou controlada do material extrudado. Outros processos, em contrapartida, depositam sólidos na forma de pós ou filmes finos, seguido pela aplicação de energia e/ou aglutinantes, a fim de unir os sólidos depositados e formar uma única estrutura com a forma desejada.

O processamento FDM se dá basicamente em três etapas: a criação de um modelo CAD, seguida da exportação para o formato de arquivo STL, o qual contém apenas informações da geometria de superfície do modelo e do fatiamento, que é a etapa do processo onde o modelo é dividido em camadas horizontais e processado para gerar instruções de comando para o equipamento de MA (WIJK; WIJK, 2015).

A Figura 2 mostra de forma sintetizada as etapas dos processos de manufatura aditiva (DUDEK, 2013).

Figura 2 – Etapas do processo de manufatura aditiva



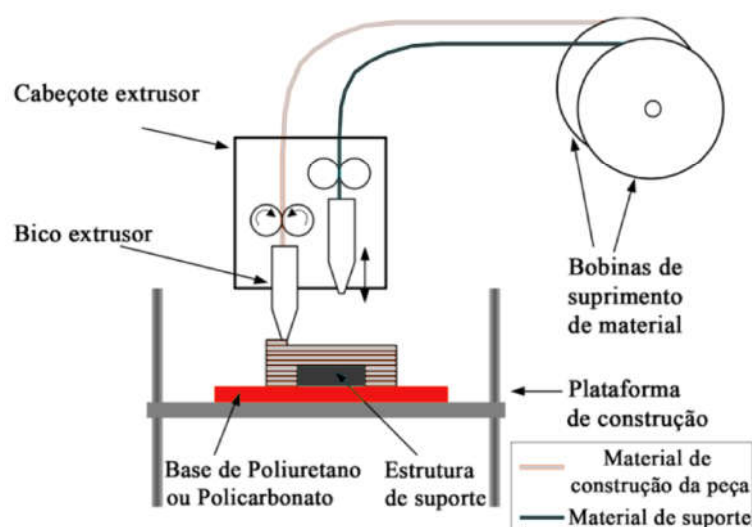
Fonte: Volpato *et al.* (2005)

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO

### 2.2.1 Processo de manufatura aditiva por extrusão

A tecnologia de manufatura aditiva por extrusão foi estabelecida pelo processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) desenvolvido pela empresa Stratasys. A patente do processo foi atribuída ao fundador das empresa, Scott Crump (GIBSON *et al.*, 2009). O princípio de funcionamento do processo, com base no modelo original desenvolvido pela empresa, é representado na Figura 3.

Figura 3 – Princípio do processo FDM do equipamento Stratasys, Inc.



Fonte: Adaptado de Volpato *et al.* (2005)

O objeto de proteção da patente de Crump (1992), em uma tradução livre,

consiste na distribuição de um material a uma taxa controlada a partir de uma "cabeça de distribuição", mais conhecida como cabeçote extrusor, para um elemento de base, num padrão predeterminado ditado pela forma do objeto a ser formado, sendo o material distribuído em múltiplas camadas que solidificam e aderem umas as outras para construir o objeto. O processo é controlado de modo que o material na camada anterior solidifique antes de aplicar material adicional em cima dela para formar a camada posterior. A cabeça de distribuição é elevada de forma controlável ao longo de um eixo z de modo a formar, sequencialmente, camadas de material tão finas com a altura de 0,0001 polegadas ou tão espessas com a altura de 0,125 polegadas. A espessura de cada camada é controlada pela regulação do espaço entre a cabeça de distribuição e a camada previamente formada.

Para formar mecanicamente cada camada sucessiva, são proporcionados motores de acionamento para mover seletivamente a base e a cabeça de distribuição um em relação um ao outro, em um padrão predeterminado ao longo dos eixos x e y à medida que o material está sendo dispensado. O movimento vertical relativo ao eixo z também pode ser realizado durante a formação de cada camada, bem como na conclusão de cada camada para alcançar a forma e a espessura da camada desejada. Tais movimentos mecânicos são alcançados através de sinais de transmissão conectados aos motores de acionamento para a base e a cabeça de distribuição a partir de um sistema CAD/CAM de computador.

A matéria-prima utilizada é, de preferência, fornecida ao cabeçote de distribuição sob a forma de um fio flexível de material sólido a partir de uma fonte de fornecimento, tal como uma bobina.

Em especial, o equipamento desenvolvido pela Stratasys, prevê o uso de uma segunda "cabeça de distribuição", utilizado apenas em casos onde há a necessidade de adição de material de suporte. O material de suporte é necessário quando a peça apresenta regiões sem camada de apoio pois, se não houver camadas de ligação entre a plataforma de construção, e outra camada mais alta, não é possível sua construção, já que o material seria depositado em um espaço vazio.

### 2.2.2 Equipamentos de manufatura aditiva por extrusão

Apesar do equipamento ter sua patente extinta há alguns anos, o nome FDM ainda é propriedade da empresa Stratasys. Dado o crescimento do uso da tecno-

logia FDM, principalmente em meados de 2009 com o crescimento e proliferação dos equipamentos *open source*, o processo FDM tornou-se conhecido como Fabricação por Filamento Fundido (FFF), evitando assim, problemas legais com a Stratasys (CASTANHEIRA, 2010).

Segundo Castanheira (2010) as partes principais que constituem um equipamento FFF são muito semelhantes ao FDM e possibilitam o mesmo processo de deposição de material fundido sobre a plataforma aquecida.

Os modelos de equipamentos de fabricação 3D *open source* cartesianos permitiram o desenvolvimento desta tecnologia, incluindo a utilização de um robô com cinemática paralela do tipo delta para promover o deslocamento do cabeçote extrusor. Segundo Mueller *et al.* (2014), as impressoras 3D delta são particularmente mais rápidas, pois permitem que o bico extrusor se mova para cima e para baixo rapidamente. Além disso, segundo o mesmo autor, impressoras 3D de construção cartesiana convencional tendem a ser mais lentas ao longo do eixo vertical z.

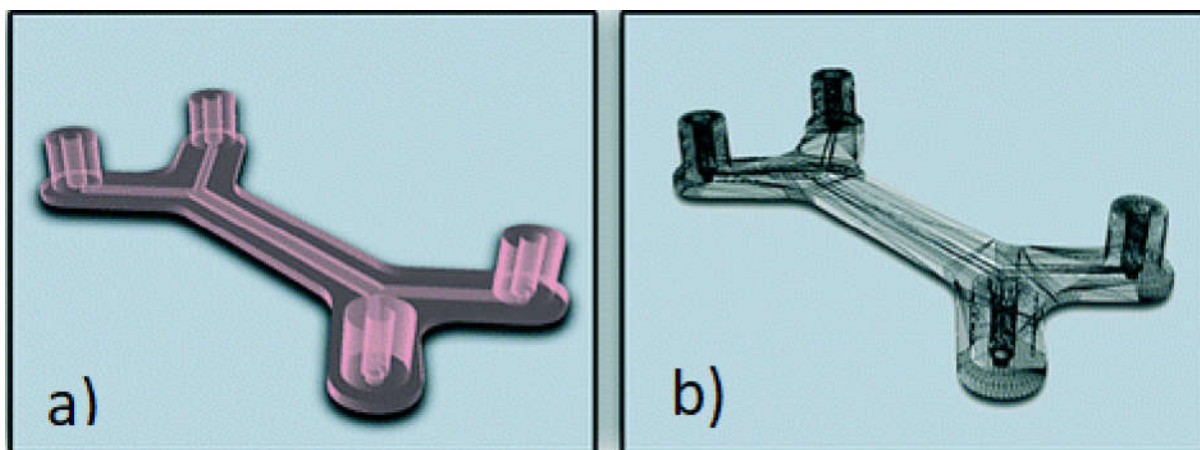
### 2.3 CRIAÇÃO DO MODELO CAD

O primeiro passo do processo é a criação de um modelo CAD que se deseja obter. O modelo CAD (Computer Aided Design) é o primeiro passo para fornecer as instruções que a impressora necessita para gerar os comandos de fabricação. Tais modelos podem ser criados com o auxílio de um digitalizador 3D ou a partir de software de modelamento CAD (WIJK; WIJK, 2015).

### 2.4 FORMATO STL

STL é um formato de arquivo suportado por diversos softwares CAD e amplamente utilizado na prototipagem rápida. O arquivo STL contém apenas a geometria de superfície do modelo, descrevendo-a a partir de uma malha triangulada, o que permite a obtenção, por exemplo, de cálculos de volume e massa (WIJK; WIJK, 2015). A Figura 4 mostra um modelo sólido 3D (a) e o arquivo STL gerado (b).

Figura 4 – Modelo sólido em CAD (a) convertido para o formato STL (b)

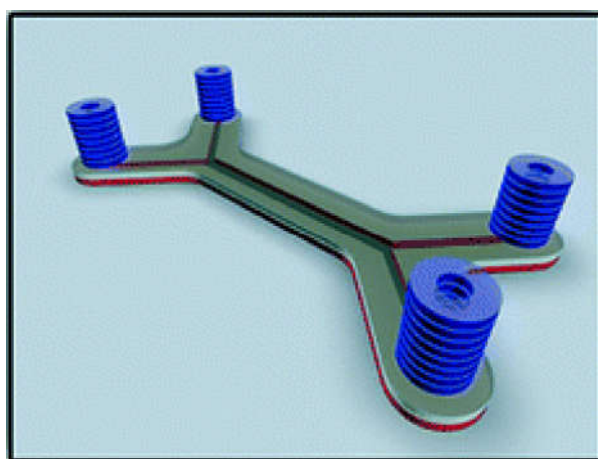


Fonte: Adaptado de Waheed *et al.* (2016)

## 2.5 FATIAMENTO DO MODELO CAD

O fatiamento é a etapa do processo em que o modelo é cortado em camadas horizontais e processado para gerar instruções de comando para o equipamento de MA (WIJK; WIJK, 2015). Existem dois tipos de fatiamento comumente utilizados, com foco na determinação da espessura de camada: o uniforme e o adaptativo (Figura 5) (MAGALHAES *et al.*, 2010).

Figura 5 – Fatiamento do modelo sólido



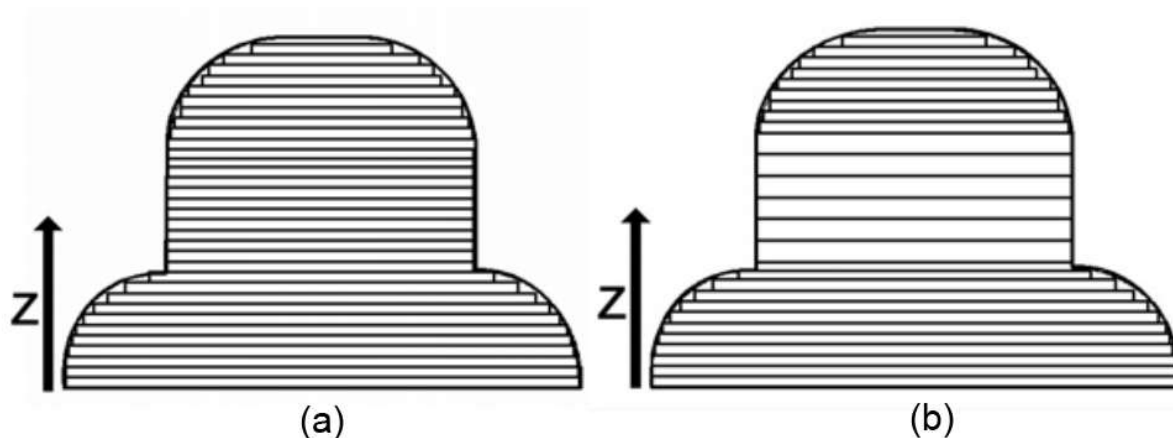
Fonte: Adaptado de Waheed *et al.* (2016)

### 2.5.1 Fatiamento adaptativo

O método de fatiamento uniforme é mais simples, onde cada fatia consiste em uma ou mais curvas que seguem a forma da peça em uma determinada altura particular, ou seja, em um chamado nível em  $z$  (GAJDOS; SLOTA, 2013), de forma que a altura do objeto é dividida em intervalos iguais. A redução do tempo de construção e o aumento da qualidade superficial são dois fatores que se contrapõem, uma vez que o tempo de construção decrescente prejudica a qualidade das peças por causa do efeito de escada (PANDEY *et al.*, 2003).

O objetivo do fatiamento adaptativo é variar as alturas de camadas nos diferentes níveis em  $z$  de construção da peça, baseado na forma geométrica do modelo ao longo da direção de construção (ZHOU *et al.*, 2004). Em relação ao fatiamento uniforme, o adaptativo une as vantagens de camadas mais grosseiras, que reflete na redução do tempo de construção, e de camadas mais refinadas, que reflete no melhoramento no acabamento das superfícies geradas e na precisão geométrica e dimensional das peças fabricadas (KULKARNI ; DUTTA, 1996). A Figura 6 representa os tipos de fatiamento citados.

Figura 6 – Fatiamento uniforme (a) e adaptativo (b)



Fonte: Adaptado de Volpato *et al.* (2009)

O equipamento responsável pela fabricação das peças recebe as instruções de trajetória. Estas instruções são a união das informações contidas no arquivo STL, com as informações de fatiamento escolhidas pelo usuário (FOGGIATTO *et al.*, 2005).

## 2.5.2 Softwares para o processo de fatiamento de peças

O conhecimento de funcionamento dos softwares é muito importante na hora de selecionar a melhor opção para atender às necessidades de fabricação (BELL, 2015).

De acordo com (BUGDAYCI *et al.*, 2014) apud Santana (2015) softwares li-vres comuns, como Cura, KISSlicer, apresentaram os seguintes desempenhos, no fatiamento de peças com geometria complexa:

- a ) Cura: ótima opção para usuários iniciantes, ou que precisam de uma ferramenta rápida e fácil. Dispõe de uma interface amigável e fatiamento rápido. No entanto, apresenta limitações no fatiamento de estruturas finas. As desvantagens do software são a geração de superfícies rugosas, baixa precisão de impressão e a ausência de configurações avançadas;
- b ) KISSlicer: a melhor opção para usuários avançados, com bons resultados de impressão na maioria dos testes. Apresenta boa precisão e perfis de configuração separados em impressão, materiais e suporte. No entanto, surgem falhas pontuais, principalmente nas peças com variação de níveis. Como desvantagens, apresenta o fato da versão com todos os recursos ser comercial, e que algumas configurações padrão podem causar problemas;
- c ) Slic3r: a melhor opção para usuários comuns que necessitam uma ferramenta grátis. Apresenta bons resultados na construção das peças avaliadas. De maneira geral, o software é simples de usar, apresenta grande precisão na impressão, dispões de uma interface de configuração dividida em ajustes de parâmetros de impressão, material e configurações do equipamento (impressora). Dentre as suas limitações estão a dificuldade de construção de estruturas em diagonais e muito finas: estruturas finas podem ser destruídas devido ao contato com o bico aquecido;
- d ) Skeinforge: melhor opção para usuários que necessitam de muitas configurações específicas. Uma das principais vantagens do software, segundo os autores, é a disponibilização de configurações detalhadas. Os resultados da fabricação das peças não são os melhores encontrados. O fatiamento de estruturas finas é instável. O software demonstra-se difícil de operar e não dispõe de uma interface amigável, além de apresentar baixa velocidade de fatiamento.

Quando a finalidade é imprimir peças com confiabilidade e qualidade para uso profissional, com aplicação de recursos avançados de impressão a fim de reduzir custos com tempo de impressão e minimizar falhas de impressão, o investimento em um bom software é perfeitamente justificável e absolutamente necessário. Segundo Bell (2015), o Simplify3D apresenta uma série de recursos úteis e controle mais rigoroso de fatiamento, o que faz do Simplify3D um excelente investimento se comparado ao Varislice, por possuir um custo muito inferior.

### 2.5.3 Parâmetros e estratégias de preenchimento para o processo FFF

Os parâmetros e estratégias de preenchimento influenciam diretamente nas características da peça obtida, tanto de acabamento como de resistência, além de impactarem os custos de material e de tempo de fabricação. O estudo realizado por Cwikla *et al.* (2017) levou em conta a influência dos parâmetros de impressão 3D, nas características finais da peça fabricada, como densidade e resistência mecânica, por exemplo. Os parâmetros discutidos foram:

- a ) Perímetros - a quantidade de linhas externas contínuas que se encontram lado a lado nos limites do modelo.
- b ) Camadas sólidas - o número de camadas sólidas que iniciam e terminam os limites de cada camada, paralelas ao plano da mesa de aquecimento;
- c ) Densidade de preenchimento - fração de preenchimento do espaço dentro dos perímetros e camadas sólidas;
- d ) Orientação padrão de construção - técnica de preenchimento, considerando a orientação de deslocamento do bico durante a deposição. Podendo apresentar variadas formas, como por exemplo: grade retangular, linhas, linhas concêntricas, colmeia, etc.
- e ) Temperatura de extrusão e aquecimento da plataforma de construção: refere-se a temperatura de trabalho escolhida para a plataforma de construção e também para o bico extrusor. Este parâmetro é selecionado conforme as características intrínsecas da matéria prima a ser utilizada, como por exemplo, temperatura de plastificação.

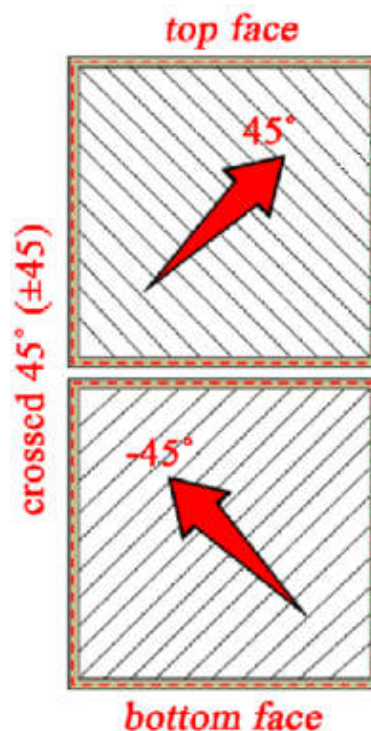
f ) Velocidade de impressão: é a velocidade com que o bico e/ou a plataforma de construção se deslocam percorrendo a trajetória de construção das camadas.

Cwikla *et al.* (2017) concluiu que para a obtenção de uma peça leve e durável, o melhor conjunto de parâmetros é o uso de uma orientação padrão de colmeia com densidade de preenchimento de cerca de 40% à 50% e espessura de camadas sólidas formada por de 2 à 3 camadas.

Se a resistência mecânica máxima for a prioridade, a espessura de camadas sólidas deve aumentar. O uso de um padrão de preenchimento diferente do favo de mel pode acelerar o tempo de impressão.

A deposição de camadas lineares de preenchimento, alternando-se a orientação de construção em 90 para cada camada subsequente, é a estratégia mais utilizada, pois garante maior resistência mecânica das peças produzidas (AHRENS; VOLPATO, 2007).

Figura 7 – Estratégias de preenchimento com variação de 90° entre camadas



Fonte: Adaptado de Alsoufi e Elsayed (2018)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 EQUIPAMENTO DE IMPRESSÃO 3D

Sabendo que as impressoras 3D Delta são particularmente mais rápidas, pois permitem que o bico extrusor se mova para cima e para baixo rapidamente (MUELLER *et al.*, 2014), o equipamento utilizado para a fabricação das amostras, compreende uma cadeia cinemática paralela composta por um robô do tipo delta, no qual o bico extrusor está acoplado, de forma a permitir que este se movimenta nas direções X, Y e Z, inclusive simultaneamente. O equipamento utilizado foi do modelo SeeMeCNC RostockMax V2 (Figura 8), e foi adquirido e montado no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), no grupo de pesquisa em processos de fabricação e tecnologia de materiais (PFBMAT) no ano de 2016.

Figura 8 – Impressora 3D Delta



Fonte: Adaptado de SeeMeCNC (2017)

#### 3.2 MATÉRIA PRIMA UTILIZADA NO PROCESSO (FFF)

O material escolhido para a realização deste estudo foi o poli(ácido láctico) (PLA), por ser amplamente utilizado, principalmente devido ao seu valor comercial e facilidade

trabalho. Além disso, o PLA possui boa adesão entre camadas, baixa temperatura de processo, é reciclável e biodegradável (CASTANHEIRA, 2010). O PLA geralmente é processado em temperaturas de extrusão entre 160C a 220C. A temperatura da base aquecida recomendada para a impressão com PLA é entre 0C e 70 C.

Segundo Langford (2012) apud Santana (2015), as características do filamento termoplástico usado para construir as peças apresentam um efeito significativo sobre as variações no fluxo de material em um cabeçote extrusor FFF. O autor referencia a patente da Stratasys para provar que o diâmetro do filamento contribui para o erro no fluxo volumétrico associado ao processo de extrusão. A equação (1) relaciona o movimento médio na zona de fusão da extrusora durante mudanças no fluxo de material ( $\Delta S_g$ ) o diâmetro médio do filamento ( $d_t$ ) o desvio-padrão do diâmetro ( $\sigma_f$ ).

$$V_{\text{erro}} = \frac{3\pi\Delta S_g\sigma_f d_t}{2} \quad (1)$$

Ou seja, com base na equação, quanto maior o diâmetro do filamento e o desvio-padrão do diâmetro, maior erro no fluxo de material. Portanto, deve-se escolher filamentos com diâmetros menores e com pequenas e precisas tolerâncias dimensionais. Sendo assim, para a realização do estudo proposto neste trabalho, utilizou-se uma bobina de PLA com 1,75 mm de diâmetro da marca RoHS com tolerância dimensional de  $\pm 0,03$  mm.

### 3.3 PEÇA PADRÃO

Segundo Hongbin *et al.* (2016) para obter uma peça com bom acabamento superficial e utilizando um curto tempo de fabricação, um valor de espessura de camada apropriado deve ser adotado conforme a curvatura presente no modelo. Onde a curvatura do modelo é grande, é necessário um menor valor de espessura de camada. Contudo, é necessário usar um valor de espessura maior onde não houver curvatura ou a mesma possuir dimensões insignificantes.

Para este estudo preliminar, foi planejada uma geometria, de forma a facilitar a aplicação do fatiamento adaptativo, e possibilitar a utilização da máquina de medir por coordenadas LK G-80C (Figura 9).

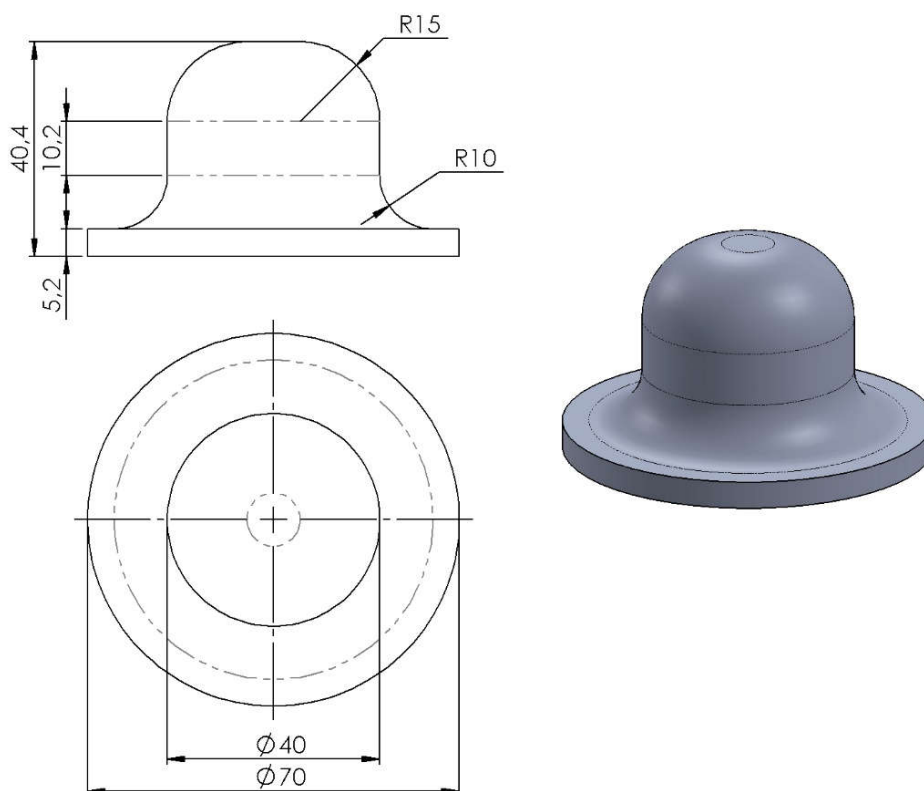
Figura 9 – Máquina de medir por coordenadas LK G-80C



Fonte: Solutions (2017)

Foi proposta uma geometria simples que favorecesse a visualização do efeito escada nas regiões arredondadas da base e topo além de possibilitar a medição da variação na forma da peça que podem ser resultantes do processo de construção utilizando o fatiamento adaptativo. A geometria se assemelha a um sino maciço tendo arco côncavo e outro convexo, bem como, regiões cilíndricas. A espessura total foi definida como múltiplo das espessuras de camadas utilizadas na fabricação. O modelo foi desenvolvido no software CAD SolidWorks, conforme Figura 10, e exportado no formato STL na opção de alta resolução.

Figura 10 – Geometria da peça



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

### 3.3.1 Procedimento de fatiamento

Utilizando o software Simplify3D, realizou-se o fatiamento uniforme e o fatiamento adaptativo do modelo desenvolvido para a realização dos testes. Para a fabricação das peças, utilizou-se um bico de extrusão com diâmetro de 0,5mm para todas elas. Em todos os fatiamentos realizou-se apenas a variação do parâmetro de espessura de camada, de forma que os demais parâmetros se mantiveram os mesmos para as peças produzidas com fatiamento uniforme e as peças produzidas com fatiamento adaptativo. Os parâmetros que se mantiveram inalterados para ambas as peças, são mostrados na tabela:



Tabela 1 – Parâmetros fixos.

Parâmetro	Valor
Velocidade de impressão	3600mm/min
Temperatura da mesa	60 °C
Temperatura do bico	205 °C
Estratégia de preenchimento	Raster+Contour 90°
Camadas solidas no topo	4
Camadas solidas na base	4
Numero de perímetros	3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A utilização de um bico com diâmetro de 0,5mm, permite a obtenção de camadas com espessura variando de 0,05mm até 0,4mm. As peças produzidas com espessura de camada de 0,2mm possuem uma resolução de acabamento muito boa, porém possuem tempo de fabricação muito elevado; já as peças fabricadas com espessura de camada maior, como por exemplo 0,3mm e 0,4mm, possuem maior velocidade de fabricação, porém, com baixa qualidade de acabamento (3DLAB, 2017), conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – espessura de camada e tempo de fabricação

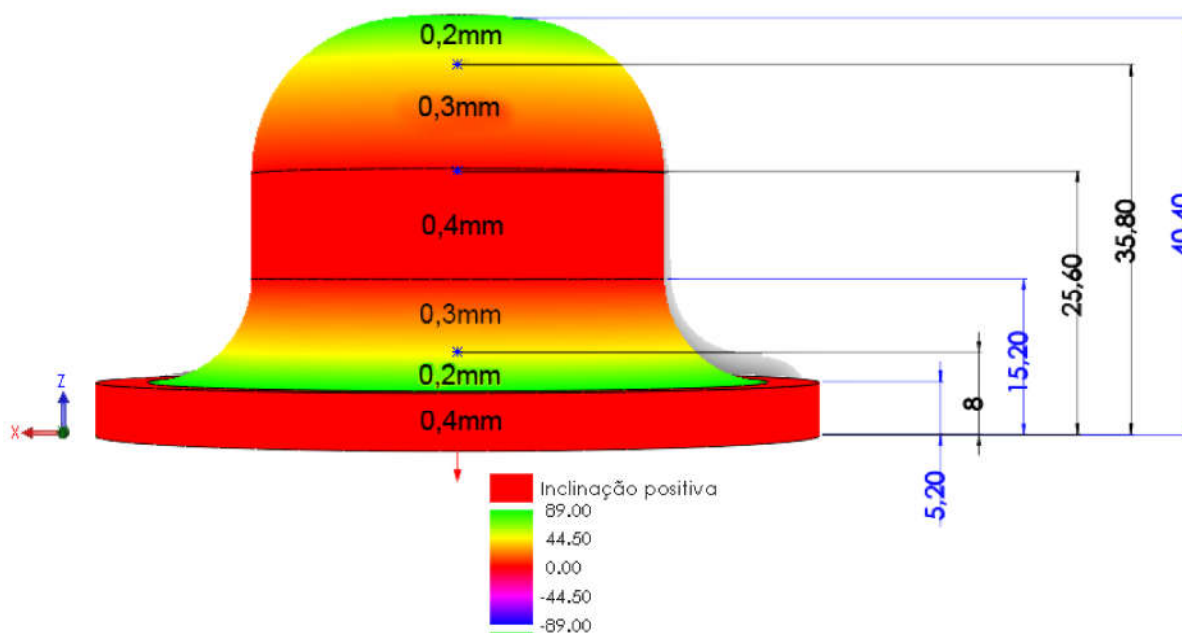
				
0,05 mm	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm	0,4 mm
171 min	87 min	45 min	31 min	24 min

Fonte: Adaptado de 3DLab (2017)

Para a realização deste estudo, as peças produzidas utilizando fatiamento uniforme, foram parametrizadas com espessura de camada de 0,4mm, 0,3mm e 0,2mm, afim de comparar tempo de fabricação entre as peças com fatiamento uniforme, e a peça com fatiamento adaptativo; já para as peças produzida utilizando fatiamento adaptativo, variou-se a espessura de camada de 0,2mm, 0,3mm e 0,4mm, na mesma peça, a fim de reduzir o efeito escada em regiões com curvatura mais acentuadas.

Utilizando o recurso de avaliação de inclinação, do software SolidWorks, identificou-se as intensidades de inclinação ao longo do perfil da peça de teste, e realizou-se o fatiamento adaptativo conforme a necessidade apresentada (Figura 11).

Figura 12 – espessura de camada variável (fatiamento adaptativo)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.3.2 Condição experimental

O estudo foi dividido em quatro grupos de peças. Foram fabricadas cinco peças de cada grupo. Todas as peças possuem a mesma geometria e dimensões, porém um grupo apresenta fatiamento adaptativo, outro grupo apresenta fatiamento uniforme com espessura de camada de 0,4mm, outro com fatiamento uniforme com espessura de camada de 0,3mm, e outro apresenta fatiamento uniforme com espessura de camada de 0,2mm.

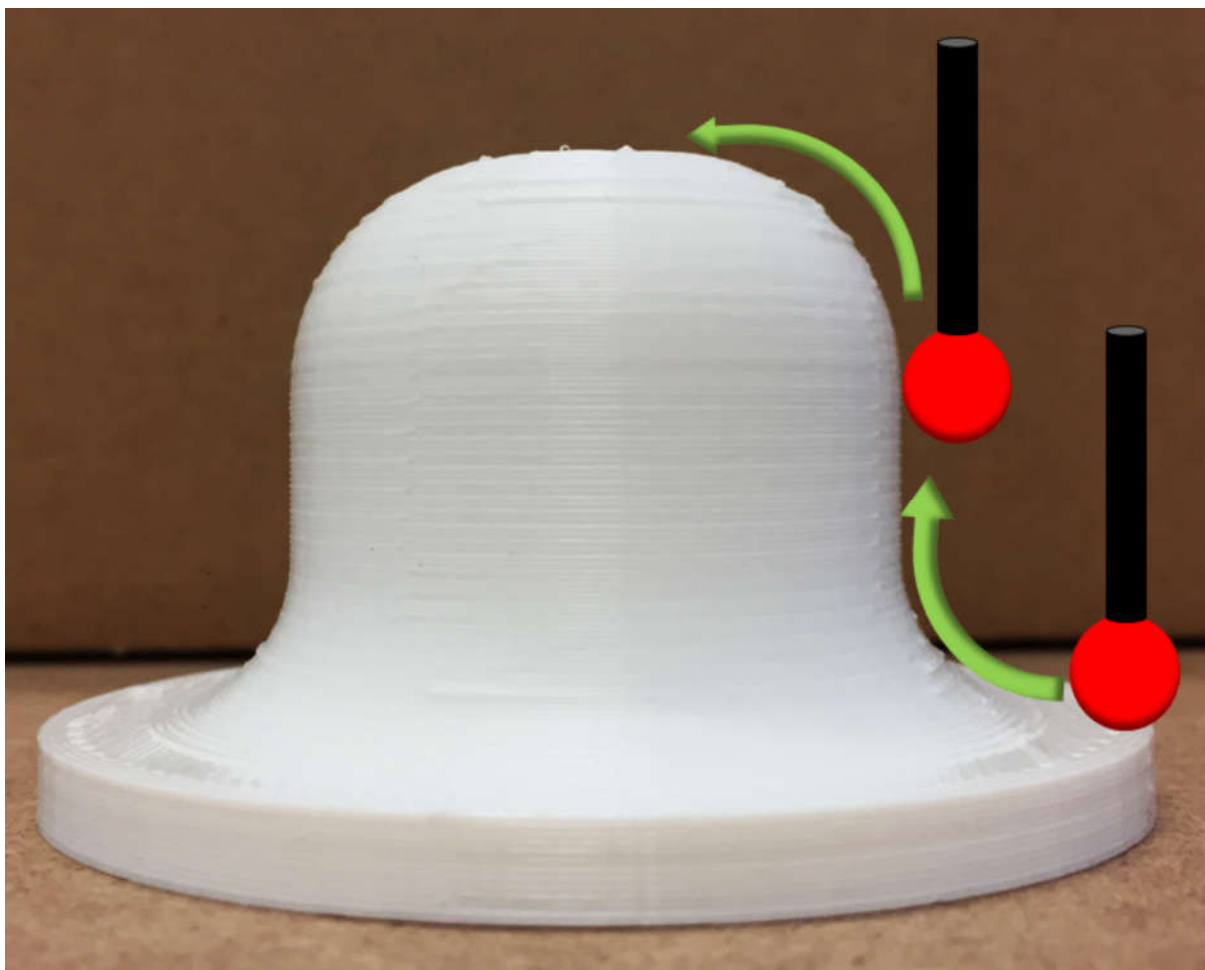
## 3.4 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Durante a fabricação das peças, a temperatura ambiente foi controlada em 24 °C, e a umidade relativa do ar manteve uma variação entre 30% e 35% ao longo dos dias de fabricação. Foi cronometrado o tempo de fabricação das peças com fatiamento adaptativo e das peças com fatiamento uniforme com espessuras de camadas de

0,4mm, 0,3mm e 0,2mm.

Utilizando a máquina de medir por coordenadas, e um cabeçote de medição Renishaw SP25M com um módulo SM25-2 e apalpador esférico de 5mm de diâmetro, realizou-se a medição dos arcos, inferior e superior, da peça, por varredura, conforme Figura 13.

Figura 13 – Medição de forma e dimensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados de medição obtidos na máquina de medir por coordenadas foram analisados estatisticamente. A fim de verificar a relevância da alteração do parâmetro de fabricação espessura de camada, nas medições de raio e circularidade realizadas neste estudo, desenvolveu-se algoritmo (APÊNDICE A) utilizando linguagem de Programação R. A linguagem de programação R é geralmente aplicada à análise estatística de dados,

e foi utilizada para aplicar o método de análise de variância (ANOVA) ao estudo do efeito dos grupos de peças, que são influenciados pela espessura de camada, sobre as respostas raio do arco superior, raio do arco inferior, circularidade do raio superior e circularidade do raio inferior.

Realizou-se também a regressão linear, incluindo a comparação com o valor nominal, para cada resposta em relação aos níveis do fator peça, assim obteve-se o grau de efeito do nível em relação ao valor do nominal, sendo portanto representativo da variação em relação ao valor desejado.

Como resultado gráfico, optou-se pela apresentação dos dados em diagramas de caixa, que fornece informação sobre as seguintes características do conjunto de dados: localização, dispersão, assimetria, comprimento da cauda e *outliers*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 TEMPO DE FABRICAÇÃO

O primeiro parâmetro a ser medido, foi o tempo de fabricação das peças. Sendo assim, foi cronometrado o tempo de fabricação das peças com fatiamento adaptativo, e das peças com fatiamento uniforme com espessuras de camadas de 0,4mm, 0,3mm e 0,2mm. Os resultados obtidos são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 2 – Tempos de fabricação para as peças com fatiamento uniforme e adaptativo.

UNIFORME 0,4		UNIFORME 0,3		UNIFORME 0,2		ADAPTATIVO	
Peça	Tempo	Peça	Tempo	Peça	Tempo	Peça	Tempo
1	56min17s	1	1h7min13s	1	1h29min44s	1	1h3min14s
2	56min18s	2	1h7min13s	2	1h29min45s	2	1h3min16s
3	56min18s	3	1h7min14s	3	1h29min45s	3	1h3min15s
4	56min18s	4	1h7min13s	4	1h29min44s	4	1h3min16s
5	56min17s	5	1h7min13s	5	1h29min44s	5	1h3min15s

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Segundo a Tabela 2, verificou-se, como esperado, que o tempo de fabricação com a utilização do fatiamento uniforme, foi maior para espessura de camadas menores, e menor para espessuras de camadas maiores. Pode-se observar também, que o tempo de fabricação da peça foi otimizado utilizando o fatiamento adaptativo, e manteve a qualidade do acabamento superficial, como será ilustrado no item 4.2 deste capítulo.

#### 4.1.1 MEDIÇÃO DE DIMENSÃO E DE FORMA

Ao realizar a análise de variância (ANOVA), verificou-se a relevância dos grupos de peças para o estudo proposto, com relação às medidas dos raios das circularidades obtidos. Os resultados são apresentados na Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 3 – Tabela ANOVA para as medidas do raio do arco superior

	Graus de liberdade	SQT	SQM	F-valor	p-valor
Grupos	3	3.55	1.18	2.71	0.0800
Residuais	16	6.99	0.44		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 4 – Tabela ANOVA para as medidas de circularidade do arco superior

	Graus de liberdade	SQT	SQM	F-valor	p-valor
Grupos	3	0.01	0.00	2.20	0.1279
Residuais	16	0.03	0.00		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 5 – Tabela ANOVA para as medidas do raio do arco inferior

	Graus de liberdade	SQT	SQM	F-valor	p-valor
Grupos	3	6.61	2.20	10.64	0.0004
Residuais	16	3.31	0.21		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 6 – Tabela ANOVA para as medidas de circularidade do arco inferior

	Graus de liberdade	SQT	SQM	F-valor	p-valor
Grupos	3	0.01	0.00	1.38	0.2855
Residuais	16	0.03	0.00		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Em primeira análise, não foi considerado de qualquer forma o valor nominal desejado para cada resposta, apenas a relevância de alterar a propriedade de espessura de camadas nas peças em comparação à variabilidade aleatória de fabricação. Demonstrou-se que apenas as medidas dos raios do arco inferior e superior sofreram efeito significativo da variação de camada na peça, com um p-valor inferior ao nível de significância  $\alpha$  escolhido de 10%. Ou seja, a probabilidade de que o parâmetro escolhido para o estudo (espessura de camada) influencia no valor da dimensão obtida na medida do raio inferior e superior, ou seja, a dimensão medida é influenciada pela variação na espessura de camada, tanto uniforme quanto adaptativa. Já o p-valor obtido para as medidas de circularidades indica alta probabilidade de que o parâmetro escolhido para o estudo não influencia no valor de circularidade medido, ou seja, a forma obtida não é influenciada pela variação na espessura de camada, tanto uniforme quanto adaptativa.

Em uma análise *post-hoc*, apresenta-se uma tabela-resumo da regressão linear para cada resposta em relação aos níveis do fator peça, em Tabela 7, 9, 8 e 10. A coluna *Estimate* representa o grau de efeito do nível em relação ao valor do nominal, sendo portanto representativo da variação em relação ao valor desejado, onde a linha

ADAPT se refere ao grupo de peças com fatiamento adaptativo, U2 se refere ao grupo de peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm, U3 se refere ao grupo de peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,3mm, e U4 se refere ao grupo de peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,4mm.

Tabela 7 – Regressão linear das medidas do raio do arco superior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	15.0000	0.2644	56.72	0.0000
ADAP	-1.6774	0.3740	-4.49	0.0002
U2	-1.5684	0.3740	-4.19	0.0004
U3	-1.1998	0.3740	-3.21	0.0044
U4	-2.3644	0.3740	-6.32	0.0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Na Tabela 7, percebe-se que o valor das medidas do raio do arco superior que mais se distancia do valor nominal, é o grupo das peças produzidas com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,4mm. Neste caso, o grupo das peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,3mm foi o que mais se aproximou do valor nominal, seguido do grupo das peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm e pelo grupo das peças com fatiamento adaptativo.

Tabela 8 – Regressão linear das medidas do raio do arco inferior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	10.0000	0.1820	54.93	0.0000
ADAP	0.6112	0.2575	2.37	0.0277
U2	0.6306	0.2575	2.45	0.0236
U3	-0.1884	0.2575	-0.73	0.4728
U4	-0.7354	0.2575	-2.86	0.0098

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Já na Tabela 8, é possível verificar um comportamento muito semelhante ao apresentado na Tabela 7, pois verifica-se que o valor do raio do arco inferior que mais se distancia do valor nominal, é o grupo das peças produzidas com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,4mm. Neste caso, o grupo das peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,3mm foi o que mais se aproximou do valor nominal, seguido do grupo das peças com fatiamento adaptativo e do grupo das peças com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm.

Tabela 9 – Regressão linear das medidas de circularidade do arco superior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	-0.0000	0.0186	-0.00	1.0000
ADAP	0.2448	0.0263	9.32	0.0000
U2	0.2450	0.0263	9.33	0.0000
U3	0.2042	0.0263	7.78	0.0000
U4	0.1832	0.0263	6.98	0.0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

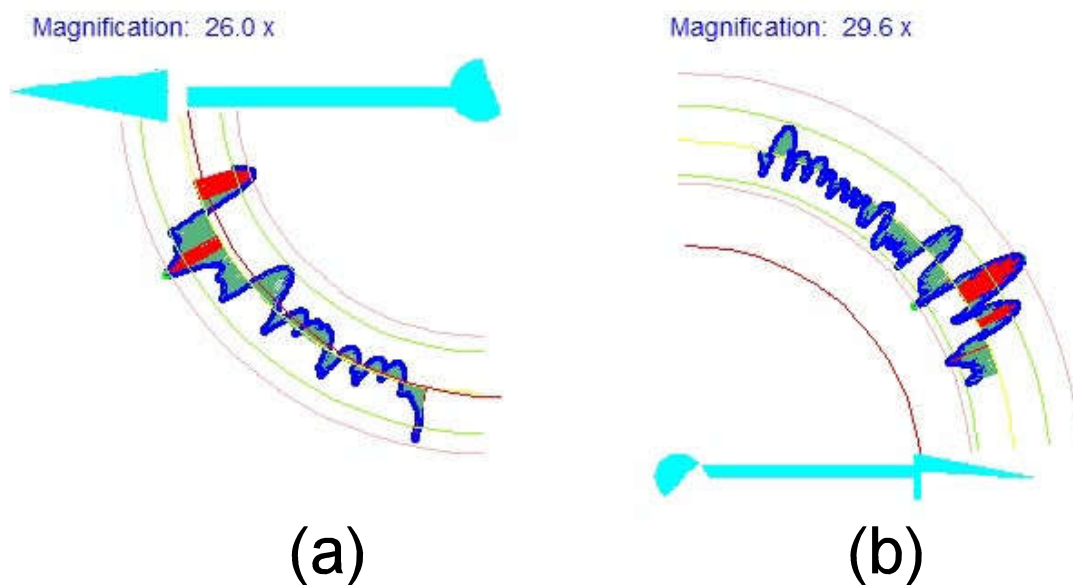
Tabela 10 – Regressão linear das medidas de circularidade do arco inferior em função da peça usando o valor nominal como grupo de referência

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.0000	0.0183	0.00	1.0000
ADAP	0.1812	0.0259	7.00	0.0000
U2	0.2024	0.0259	7.82	0.0000
U3	0.1510	0.0259	5.83	0.0000
U4	0.1552	0.0259	5.99	0.0000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Com relação à circularidade, que representa a media entre da variação na forma do perfil, a regressão linear apresentada apenas comprova que a forma das peças pouco foi afetada pela variação do fatiamento e da espessura de camada dos grupos de peças. Obteve-se as imagens dos contornos de perfil das peças fabricadas (APÊNDICE B). Na Figura 14, é possível visualizar o contorno do perfil medido do arco inferior (Figura 14a) e superior (Figura 14b) de uma peça produzida com fatiamento adaptativo. É possível observar ainda, a variação da espessura de camada conforme o fatiamento adaptativo.

Figura 14 – Contorno do perfil medido do arco inferior (a) e superior (b)

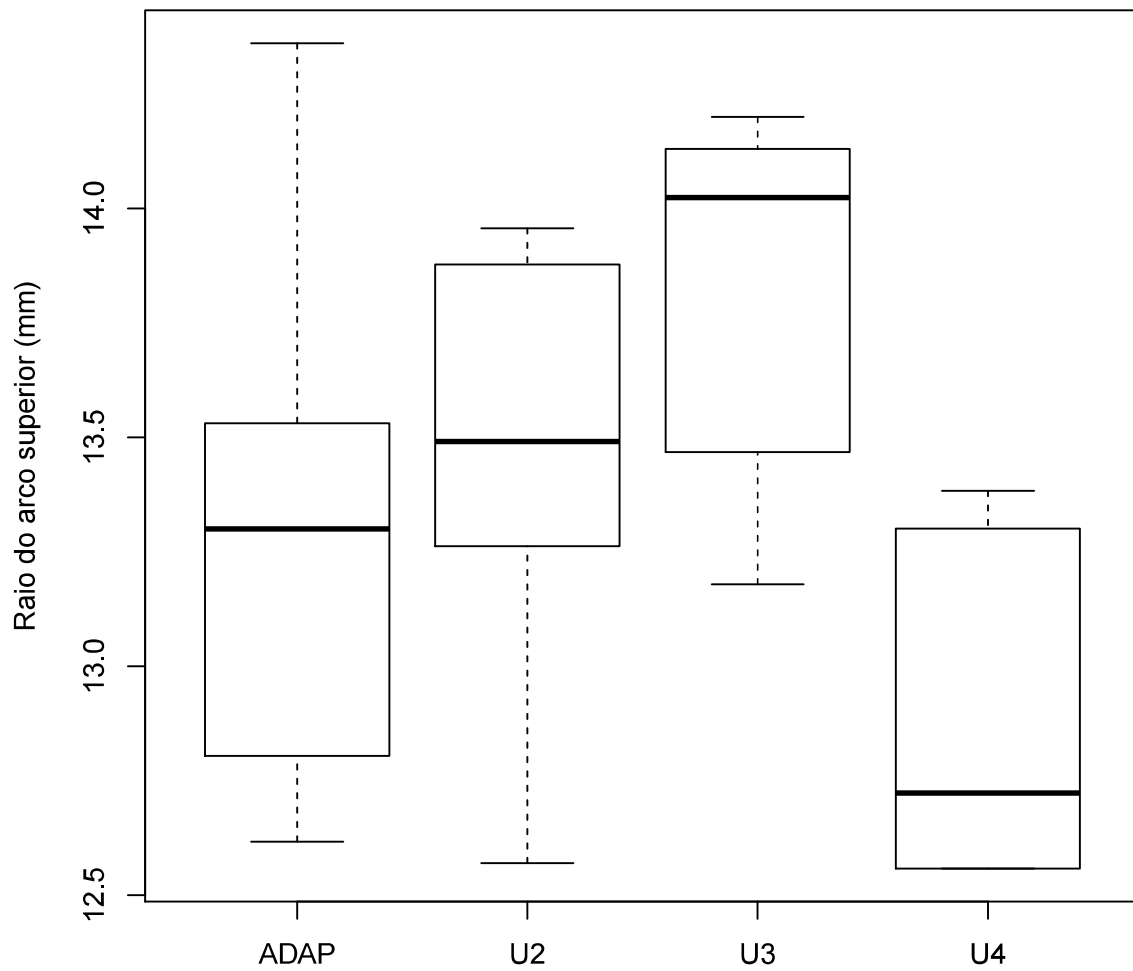


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Visualmente observa-se que apesar de ambas as circularidades apresentarem um valor médio próximo de zero, o que representa uma precisão de forma razoável a aplicação, percebe-se na Figura 14b que o perfil formado pelo contorno do arco superior esta bastante deslocado em relação ao perfil (representado em vermelho) do raio nominal, o que indica a inexatidão da dimensão do raio neste arco.

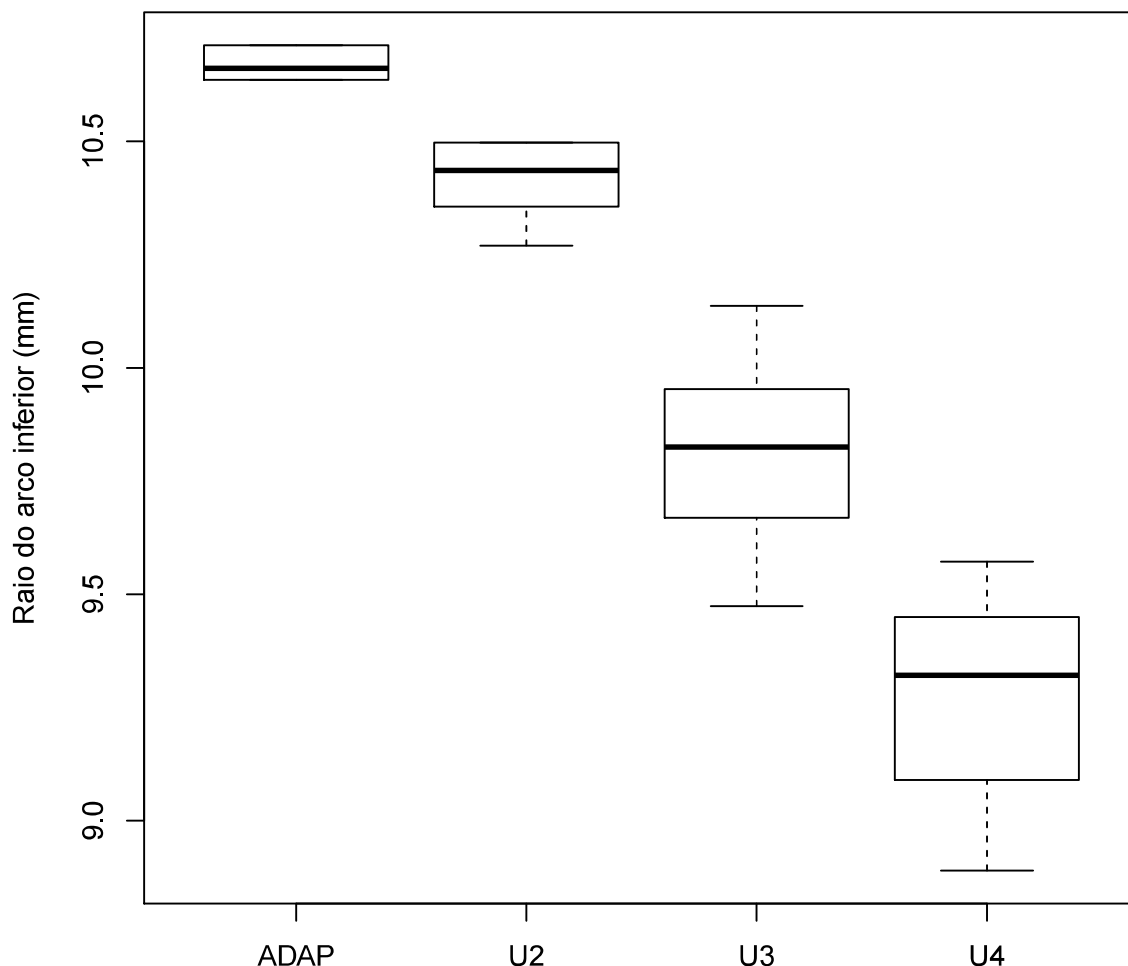
Os resultados podem ser observados graficamente a partir dos diagramas de caixa (*boxplot*) para cada resposta, dados nas Figuras 15, 16, 17 e 18.

Figura 15 – Diagrama de caixa para o raio do arco superior em função da peça



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 16 – Diagrama de caixa para o raio do arco inferior em função da peça



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Analisando o diagrama de caixa das medidas do raio do arco superior, percebe-se que quanto maior a espessura de camada, as exatidão e precisão das medidas do raio diminuem. Nota-se que nenhum dos grupos de peças obteve uma medida média do valor do raio, que alcançasse o valor nominal de 15mm. Todavia, a peça produzida com espessura de camada constante de 0,3mm, teve o menor erro médio medido, e a peça produzida com espessura de camada constante de 0,4mm, obteve o maior erro, na ordem de 2,8mm. As peças produzidas com fatiamento adaptativo e fatiamento com espessura de camada constante de 0,2mm, apresentaram valores médios de raio muito

próximos, porém com erro entre 1mm e 1,5mm.

Já na análise do raio inferior, o maior erro médio foi medido nas peças produzidas com espessura de camada constante de 0,4mm, e teve maior concentração de medida de raio entre 9mm e 9,5mm. Neste arco, as peças produzidas com fatiamento adaptativo e fatiamento com espessura de camada constante de 0,2mm, apresentaram o menor erro dimensional de raio, sendo que o fatiamento adaptativo apresentou maior precisão.

Figura 17 – Diagrama de caixa para a circularidade do arco superior em função da peça

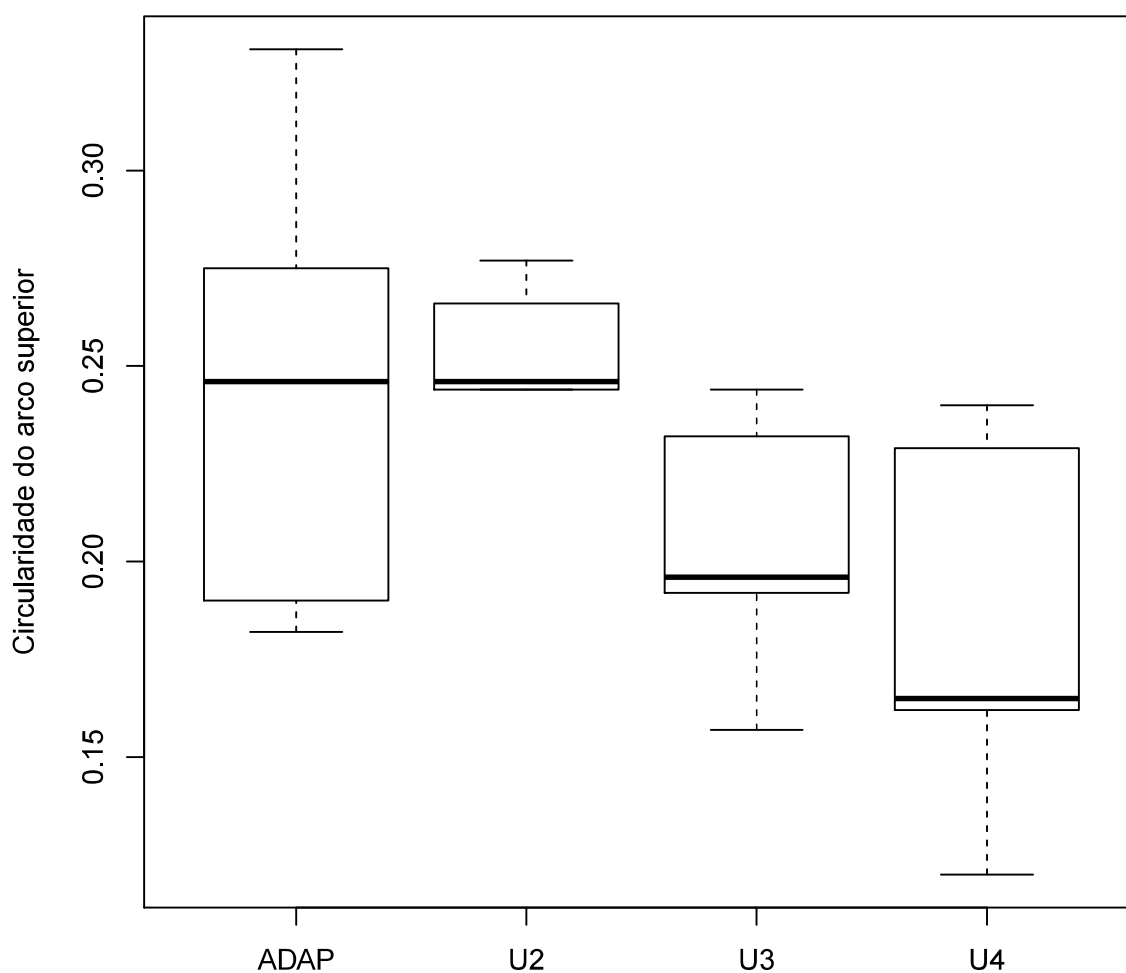
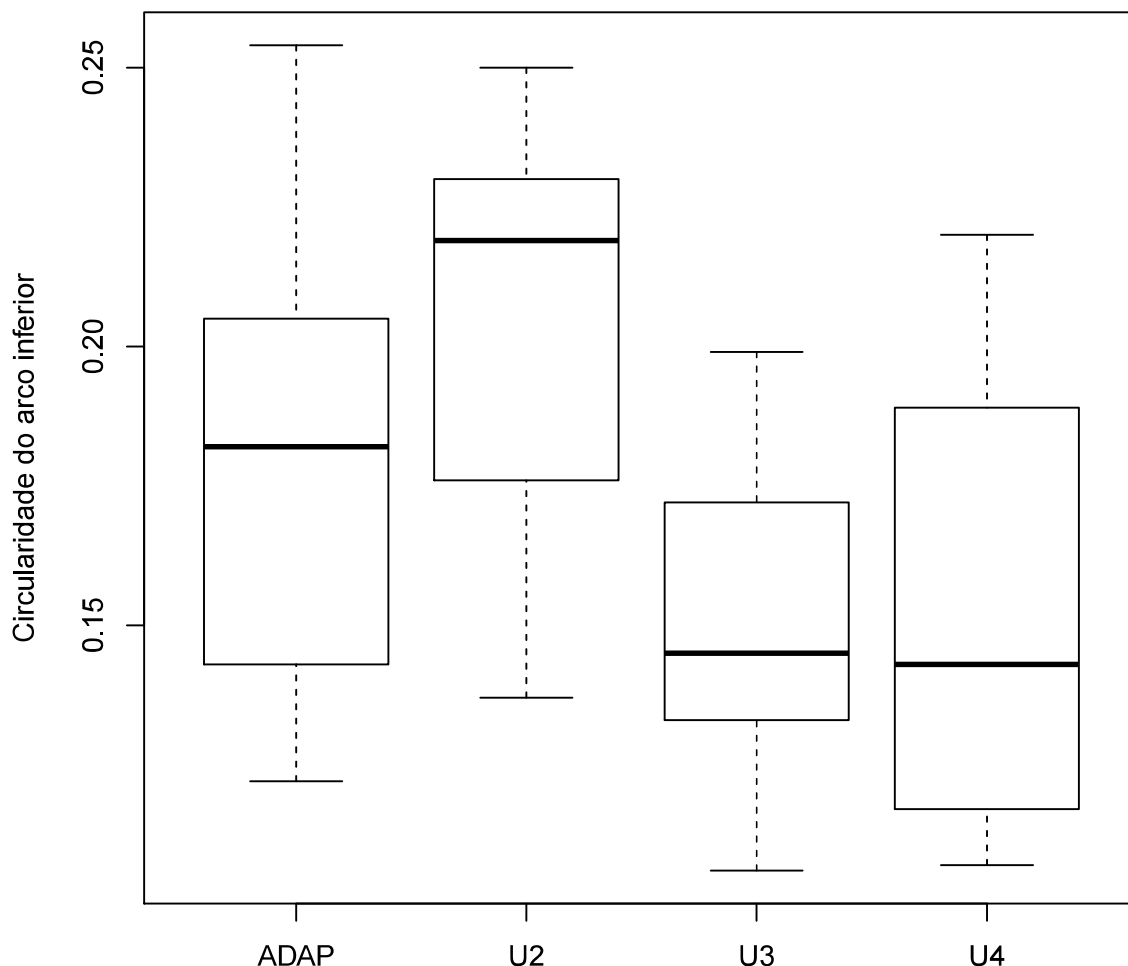


Figura 18 – Diagrama de caixa para a circularidade do arco inferior em função da peça



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

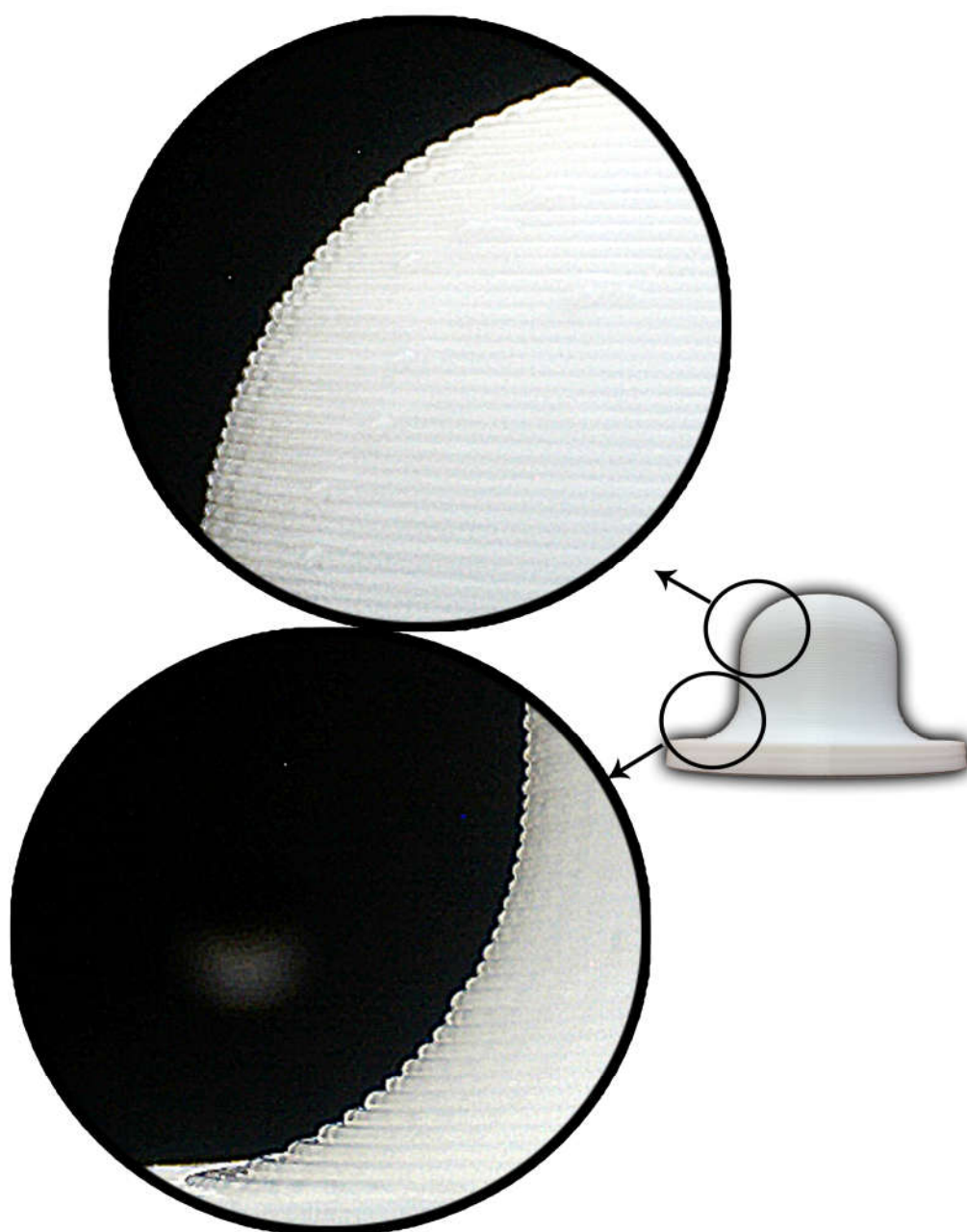
Com relação à circularidade, observa-se que em ambos os arcos, os produzidos com espessura de camada constante de 0,4mm e 0,3mm apresentam menor erro de forma. As peças produzidas com fatiamento adaptativo e fatiamento com espessura de camada constante de 0,2mm, apresentam erro médio muito similar para as medidas do arco superior, porém o grupo com fatiamento adaptativo apresenta um resultado mais impreciso. Entre as medidas dos grupos com espessura de camada constante, é possível verificar um efeito similar ao das medidas do raio do arco inferior, onde quanto maior a espessura de camada, as exatidão e precisão das medidas do raio diminuem.

Para o arco inferior, as peças produzidas com fatiamento adaptativo apresentam erro médio menor que o grupo com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm.

## 4.2 ACABAMENTO SUPERFICIAL

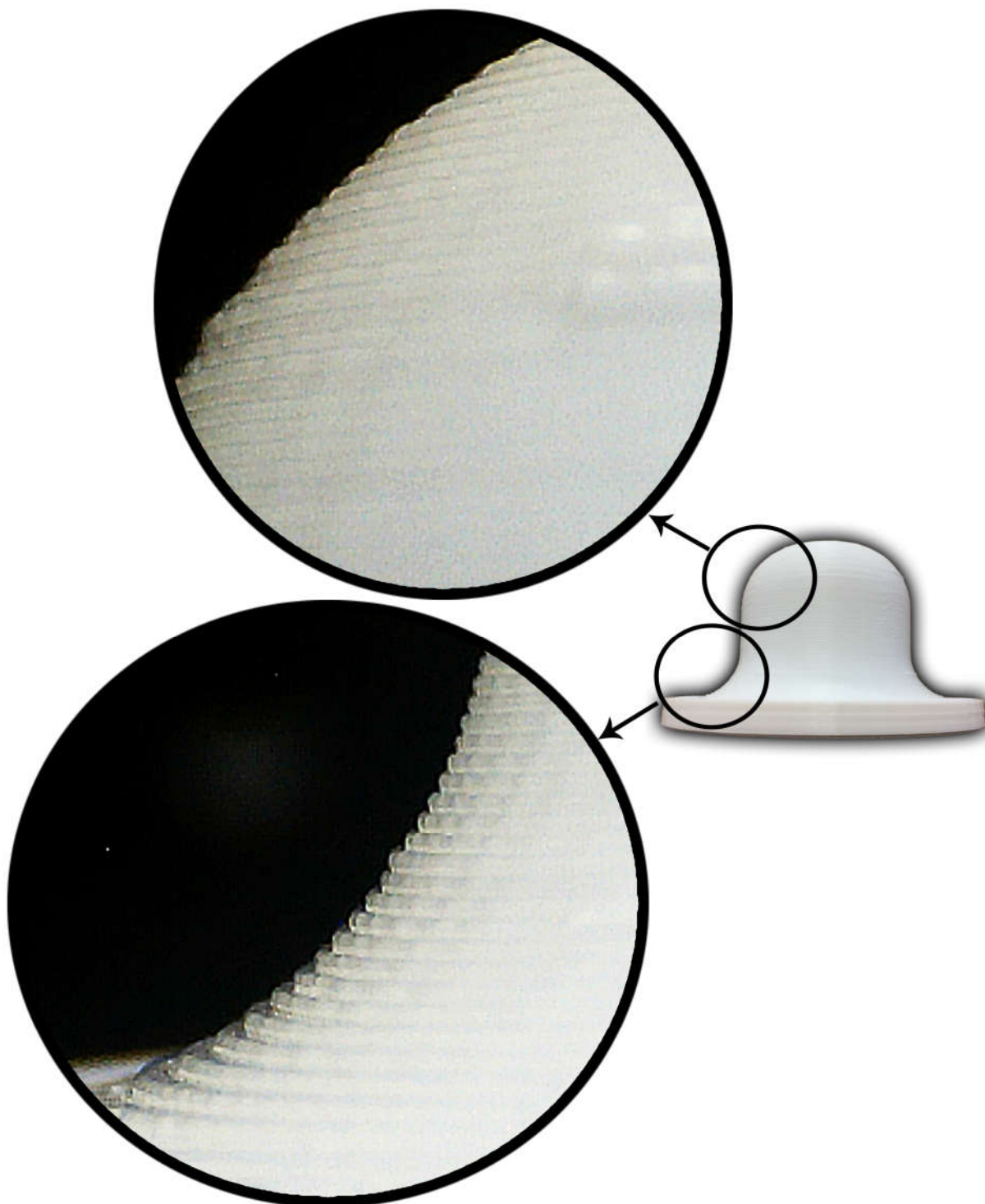
As características de acabamento das diferentes configurações de parâmetros, pode ser observada por meio de fotos ampliadas. A Figura 19, evidencia o acabamento da peça produzida com fatiamento uniforme com espessura de camada de 0,4mm.

Figura 19 – Acabamento com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,4mm.



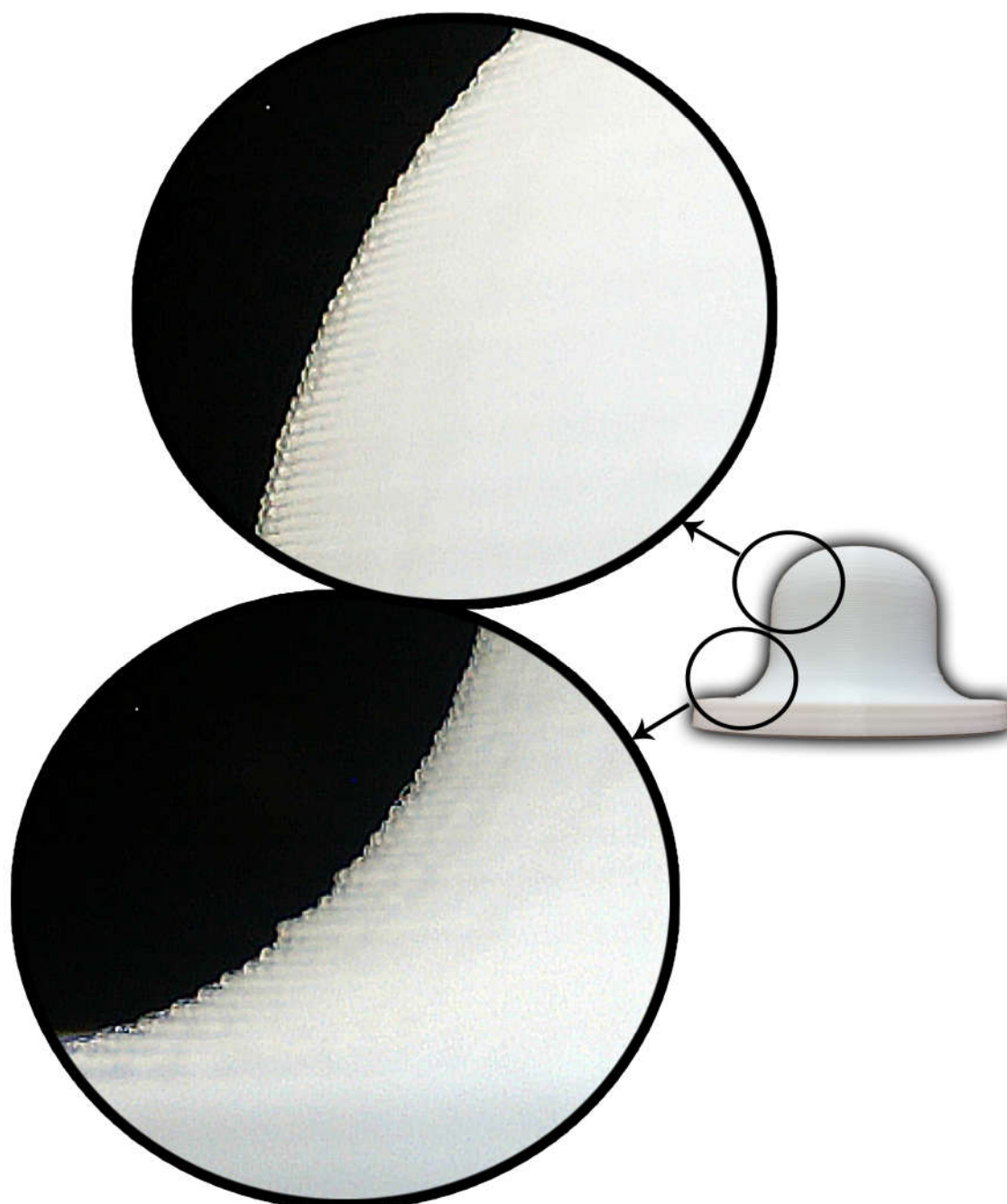
A peça produzida com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,3mm, apresenta melhor acabamento, porém, ainda é possível verificar a baixa resolução do acabamento nas regiões com curvatura mais acentuada (Figura 20)

Figura 20 – Acabamento com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,3mm.



Já para a peça produzida com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm, o acabamento é muito superior, e mais difícil de se verificar o efeito escada a olho nu, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Acabamento com fatiamento uniforme e espessura de camada de 0,2mm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Comparando o resultado obtido nas peças produzidas com fatiamento adaptativo e espessura de camadas de 0,4mm, 0,3mm, e 0,2mm, pode-se concluir que a região que não possui inclinação, não apresenta grande diferença no acabamento para as três

espessuras de camadas distintas. As regiões com pouca inclinação, apresentam um bom acabamento superficial, tanto para a peça produzida com espessura de camada de 0,3mm quanto para a peça produzida com espessura de camada de 0,2mm. As regiões com grandes inclinações, apenas apresentam bom acabamento superficial para as peças produzidas com espessura de camadas de 0,2mm.

Desta forma, as peças produzidas com fatiamento adaptativo, visaram unir as melhores características de acabamento em menor tempo de fabricação, das peças produzidas com fatiamento uniforme. As Figuras 22 e 23, mostram o resultado de acabamento obtido com o fatiamento adaptativo, executado conforme Figura 11, de forma que nas regiões com maior inclinação, utilizou-se a menor espessura de camada, nas regiões com pequenas inclinações utilizou-se espessura de camada média, e regiões sem inclinação utilizou-se espessura de camada maior.

Figura 22 – Acabamento com fatiamento adaptativo em detalhe.

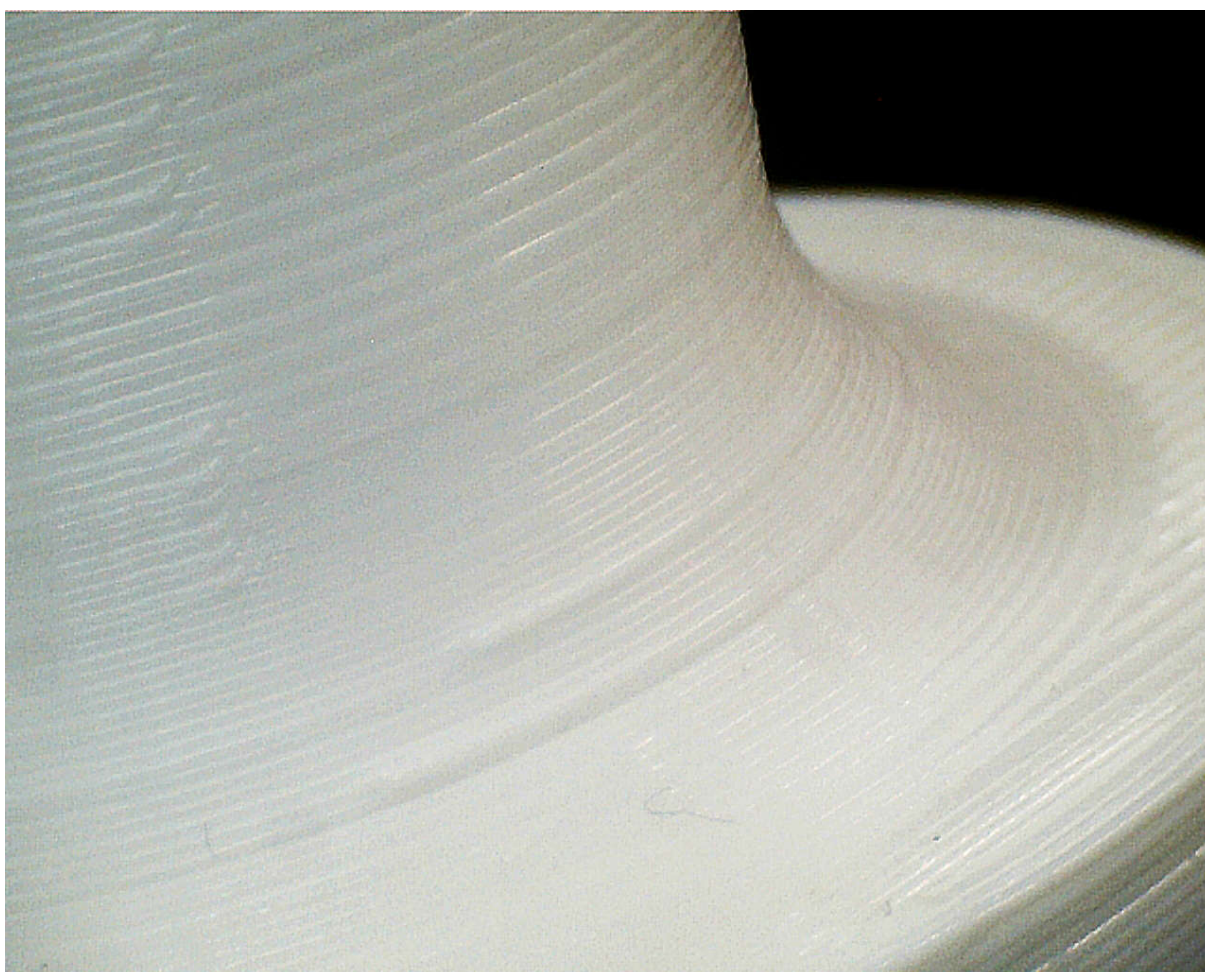
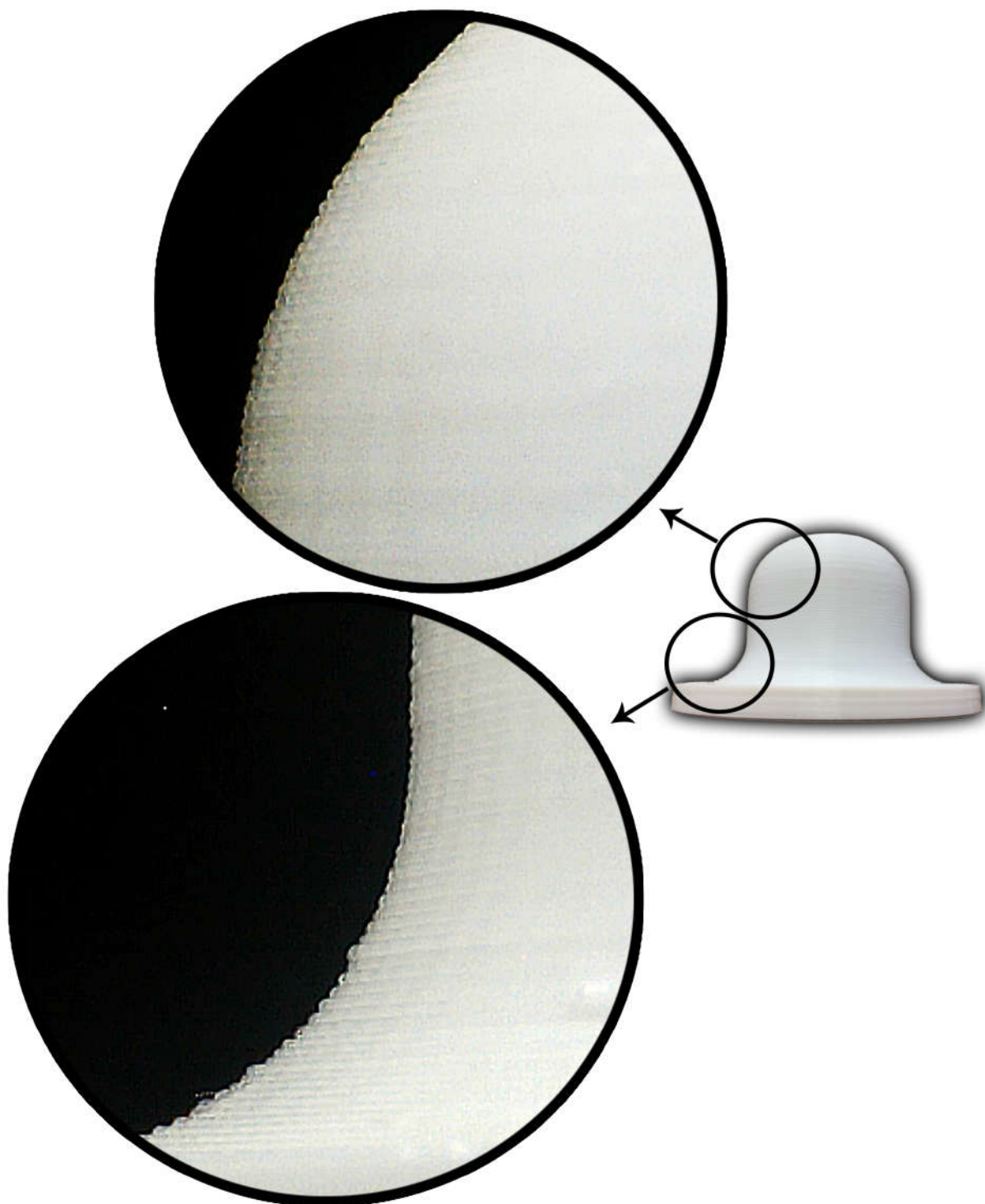


Figura 23 – Acabamento com fatiamento adaptativo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 4.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos mostram que para o bico extrusor de 0,5mm de diâmetro, a espessura de camada que apresenta melhor precisão e exatidão dimensional da medida do raio, de forma geral, é a espessura de camada de 0,3mm.

Para este mesmo bico, a espessura e camada que apresentou melhor acabamento superficial, foi a espessura de 0,2mm.

Contudo, o melhor tempo de fabricação foi obtido utilizando espessura de camada de 0,4mm.

Desta feita, é possível concluir que a seleção da espessura de camada, deve ser feita baseado no resultado que se mais se deseja.

O fatiamento adaptativo contempla as características presentes nos fatiamentos uniformes,

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, verificou a influência do fatiamento adaptativo nas características dimensionais e de forma de peças produzidas utilizando este recurso, além de verificar as características estéticas resultantes nas peças e a influência no tempo de fabricação das mesmas.

Conforme apontado nos estudos de Zhou *et al.* (2004), Kulkarni e Dutta (1996), as características de melhoria do acabamento superficial e redução de tempo de fabricação, foram comprovadas pelo presente estudo.

Neste estudo demonstrou-se também a relação entre a espessura de camada e precisão dimensional e de forma nas peças produzidas. Verificando que a precisão dimensional é diretamente afetada pelo fatiamento escolhido. Desta feita, uma das principais causas atribuídas às medidas que representam os *outliers*, foram falhas aleatórias presentes no processo, e a limitação de precisão do equipamento utilizado, visto que prevê-se a perda de passo do motor de passo quando trabalhado com altas velocidades de fabricação (AZEVEDO, 2013).

As constatações deste estudo, evidenciam a necessidade de priorizar características como: tempo de fabricação, acabamento superficial, precisão e exatidão dimensional e de forma, a fim de selecionar os parâmetros adequadamente para obter o melhor resultado possível.

### 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para a realização de trabalhos futuros:

- a ) Pesquisar a influência do diâmetro do bico extrusor na precisão e exatidão dimensional e de forma na produção de peças com espessura de camadas distintas.
- b ) Verificar a relação entre diferentes materiais e a precisão dimensional e de forma em peças produzidas com espessuras de camadas uniformes e variáveis.

## REFERÊNCIAS

3DLAB. *Qual é a influência da altura da camada em suas peças 3D?* 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/altura-da-camada-na-impressao-3d/>>.

AHRENS, C. H.; VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007. OCLC: 817120454. ISBN 978-85-212-0388-9.

ALSOUFI, M. S.; ELSAYED, A. E. Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3d Printer. **Materials Sciences and Applications**, v. 09, n. 01, p. 11–40, 2018. ISSN 2153-117X, 2153-1188.

ASTM International. **Standard terminology for additive manufacturing technologies: designation F2792-12a**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. OCLC: 900464224.

AZEVEDO, F. M. d. Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3d. 2013.

BELL, C. Delta Printer Software. In: **3D Printing with Delta Printers**. [S.l.]: Apress, Berkeley, CA, 2015. p. 71–118. ISBN 978-1-4842-1174-8 978-1-4842-1173-1. DOI: 10.1007/978-1-4842-1173-1\_3.

BUGDAYCI, H.; GRUNERT, J.; KELLER, F. Analysis of slicing-tools for fused deposition modeling 3d-printers and comparison of different printers. 2014.

CASTANHEIRA, A. T. G. **Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico**. Tese (Mestrado), 2010.

S. Scott Crump. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. 1992. US5121329 A. U.S. Classification 700/119, 425/174.4, 228/180.5, 264/239, 264/401, 228/4.5, 264/482; International Classification G05B19/41, B29K105/24, B29C67/00, B29C41/36, G05B19/4099, B29C35/02, B22F3/115; Cooperative Classification B29C64/40, G05B19/41, B29C64/106, B33Y40/00, B33Y10/00, B33Y30/00, B33Y50/02, Y02P90/265, B29C41/36, G05B19/4099, B22F3/115, B22F2998/00, G05B2219/49015, G05B2219/45238, Y10T156/1798, G05B2219/49241, Y10T156/1038; European Classification B29C67/00R8D, B29C41/36, G05B19/4099, B22F3/115, G05B19/41, B29C67/00R2.

CWIKLA, G.; GRABOWIK, C.; KALINOWSKI, K.; PAPROCKA, I.; OCIEPKA, P. The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3d-printed parts. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.]: IOP Publishing, 2017. v. 227, p. 012033.

DOLENC, A.; MAKELA, I. Slicing procedures for layered manufacturing techniques. **Computer-Aided Design**, v. 26, n. 2, p. 119–126, fev. 1994. ISSN 0010-4485.

DUDEK, P. FDM 3d Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 58, n. 4, p. 1415–1418, 2013. ISSN 2300-1909.

FOGGIATTO, J. A.; VOLPATO, N.; LIMA, M. V. A. de; FRANÇA, G. v. Z. de; D'ESTEFANI, P. ESTUDOS DE PARÂMETROS DA TECNOLOGIA DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA FDM PARA MELHORIAS NO PLANEJAMENTO DE PROCESSO. 2005.

GAJDOS, I.; SLOTA, J. Influence of printing conditions on structure in FDM prototypes. **Tehnički vjesnik**, v. 20, n. 2, p. 231–236, 2013.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. [S.l.]: Springer US, 2009. ISBN 978-1-4419-1120-9.

GLUTCO. **3D Printer**. 2017.

HONGBIN, L.; TAIYONG, W.; JIAN, S.; ZHIQIANG, Y. The adaptive slicing algorithm and its impact on the mechanical property and surface roughness of freeform extrusion parts. v. 11, jan. 2016. ISSN 1745-2759.

KULKARNI, P.; DUTTA, D. An accurate slicing procedure for layered manufacturing. **Computer-Aided Design**, v. 28, n. 9, p. 683–697, set. 1996. ISSN 0010-4485.

LAN, P.-T.; CHOU, S.-Y.; CHEN, L.-L.; GEMMILL, D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus. **Computer-Aided Design**, v. 29, n. 1, p. 53–62, jan. 1997. ISSN 0010-4485.

LANGFORD, W. K. **Achieving Precise Flow in Fused Deposition Modeling Extruders**. [S.l.: s.n.], 2012.

MAGALHAES, L. C.; VOLPATO, N.; LUERSEN, M. A. A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas Pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM). In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba**. [S.l.: s.n.], 2010.

MANI, K.; KULKARNI, P.; DUTTA, D. Region-based adaptive slicing. **Computer-Aided Design**, v. 31, p. 317–333, abr. 1999.

MUELLER, S.; IM, S.; GUREVICH, S.; TEIBRICH, A.; PFISTERER, L.; GUIMBRETIERE, F.; BAUDISCH, P. WirePrint: 3d printed previews for fast prototyping. In: . [S.l.]: ACM Press, 2014. p. 273–280. ISBN 978-1-4503-3069-5.

PANDEY, P. M.; REDDY, N. V.; DHANDE, S. G. Real time adaptive slicing for fused deposition modelling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 1, p. 61–71, jan. 2003. ISSN 0890-6955.

SANTANA, L. **Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA**. Tese (Mestrado), 2015.

SEEMECNC. **ROSTOCK MAX™ v3 Desktop 3D Printer RTP™**. 2017. Disponível em: <<https://www.seemecnc.com/products/rostock-max-v3-desktop-3d-printer-rtp>>.

SOLUTIONS, L. M. A. **LK G80C CMM Machine Renishaw PH10M head TP2 Probe PHC10-2 Micron Drive JAE0013B1**. 2017. Disponível em: <<http://www.lmias.com/product/lk-g80c>>.

Michael Johannes Leonardus Van Tooren, Igor Luzinov, Nikolay Borodinov, Wout De Backer e Arturs Peteris Bergs. **Composite Continuous Filament for Additive Manufacturing**. 2017. 20170341301.

VOLPATO, N.; FOGGIATTO, J. A.; LIMA, M. V. A. de. Modelos de Fatiamento Adaptativo em Processo de Prototipagem Rápida. In: **V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Belo Horizonte-MG–Brasil (CD-ROM)**. [S.l.: s.n.], 2009.

VOLPATO, N.; OLIVEIRA, J.; SOUZA, T. d. A process planning applicative for rapid prototyping technology. In: **Annals of the 18th International Congress of Mechanical Engineering COBEM, November, Ouro Preto, Brazil. CD-ROM**. [S.l.: s.n.], 2005.

WAHEED, S.; CABOT, J. M.; MACDONALD, N. P.; LEWIS, T.; GUIJT, R. M.; PAULL, B.; BREADMORE, M. C. 3d printed microfluidic devices: enablers and barriers. **Lab on a Chip**, v. 16, n. 11, p. 1993–2013, 2016. ISSN 1473-0197, 1473-0189.

WIJK, A. v.; WIJK, I. v. **3D printing with biomaterials: towards a sustainable and circular economy**. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2015. OCLC: ocn904183282. ISBN 978-1-61499-485-5.

WIMPENNY, D. I.; PANDEY, P. M.; KUMAR, L. J. **Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies**. [S.l.]: Springer, 2016. ISBN 978-981-10-0812-2.

ZHOU, M. Y.; XI, J. T.; YAN, J. Q. Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping. **Int J Adv Manuf Technol**, v. 23, n. 1-2, p. 20–27, jan. 2004. ISSN 0268-3768, 1433-3015.

## APÊNDICE A – Programa em R

```
1   library(readr)
2 measure <- read_delim("~/Downloads/measure.csv",
3                       ";",
4                       escape_double = FALSE,
5                       trim_ws = TRUE)
6 View(measure)
7
8 measure$part <- as.factor(measure$part)
9
10 partWithoutPerfect <- droplevels(measure$part, "perfect")
11
12 response <- list()
13
14 response$top$radius <- na.omit(data.frame(partWithoutPerfect,
15                                           measure$arc2r))
16 response$bottom$radius <- na.omit(data.frame(
17   partWithoutPerfect, measure$arc1r))
18 response$top$circularity <- na.omit(data.frame(
19   partWithoutPerfect, measure$arc2c))
20 response$bottom$circularity <- na.omit(data.frame(
21   partWithoutPerfect, measure$arc1c))
22
23 label <- list()
24
25 label$top$radius <- "Raio do arco superior (mm)"
26 label$top$circularity <- "Circularidade do arco superior"
27 label$bottom$radius <- "Raio do arco inferior (mm)"
28 label$bottom$circularity <- "Circularidade do arco inferior"
29
30 file.remove('tables.tex')
31
32 for (position in names(response)) {
33   for (property in names(response[[position]])) {
34     pdf(paste0(position, property, ".pdf"))
35     model <- response[[position]][[property]][[2]] ~ response
36       [[position]][[property]][[1]]
37     write(paste0(position, property, "\n", sep = " "),
38          'tables.tex',
```

```

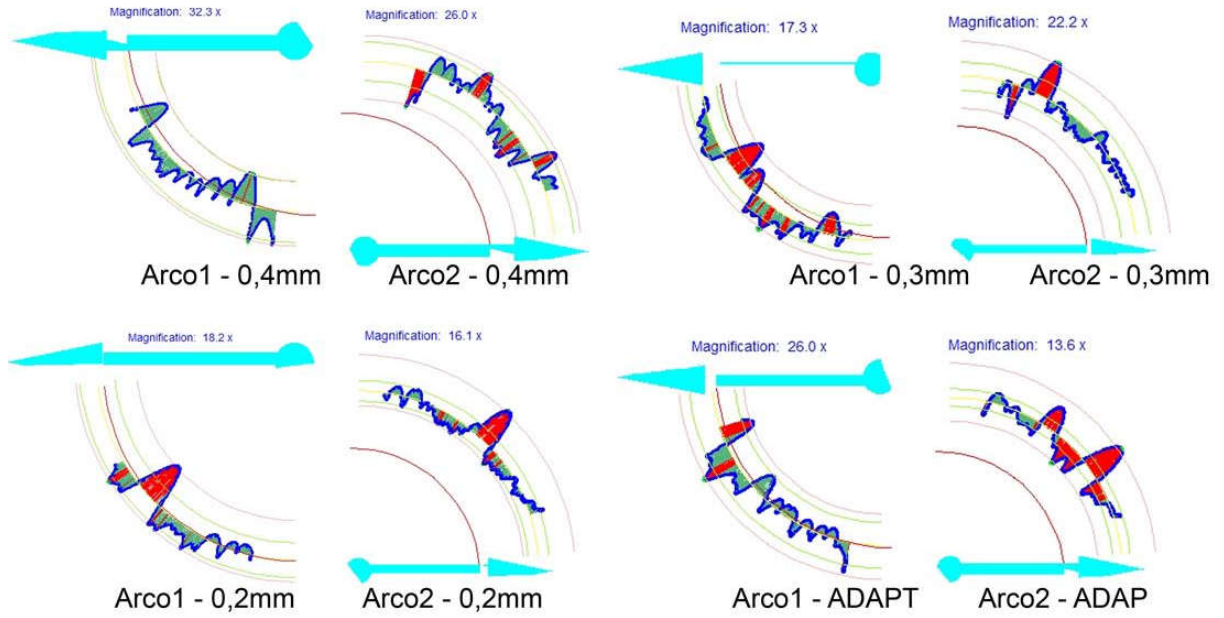
34         append = TRUE)
35 write(print(xtable(anova(lm(
36     model
37 )))), 'tables.tex', append = TRUE)
38 boxplot(model,
39         outline = FALSE,
40         ylab = label[[position]][[property]])
41 dev.off()
42 }
43 }
44
45 response$top$radius <- data.frame(measure$part, measure$arc2r
46 )
47 response$bottom$radius <- data.frame(measure$part, measure$
48     arc1r)
49 response$top$circularity <- data.frame(measure$part, measure$
50     arc2c)
51 response$bottom$circularity <- data.frame(measure$part,
52     measure$arc1c)
53
54 response$top$radius <-
55     within(response$top$radius,
56         measure.part <- relevel(measure.part, ref = 2))
57 response$top$circularity <-
58     within(response$top$circularity,
59         measure.part <- relevel(measure.part, ref = 2))
60 response$bottom$radius <-
61     within(response$bottom$radius,
62         measure.part <- relevel(measure.part, ref = 2))
63 response$bottom$circularity <-
64     within(response$bottom$circularity,
65         measure.part <- relevel(measure.part, ref = 2))
66
67 for (position in names(response)) {
68     for (property in names(response[[position]])) {
69         write(paste0(position, property, "\n", sep = " "),
70             'tables.tex',
71             append = TRUE)
72         write(print(xtable(summary(

```

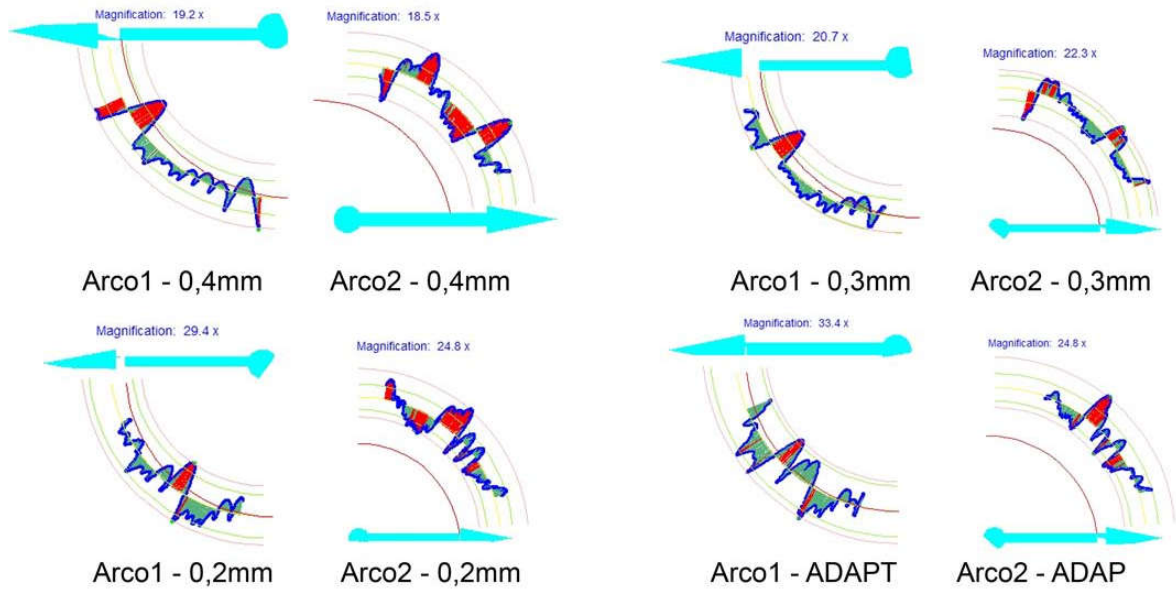
```
69 |         lm(response[[position]][[property]][[2]] ~ response[[
70 |             position]][[property]][[1]])
71 |     ))) , 'tables.tex', append = TRUE)
72 | }
```

## APÊNDICE B – Imagens perfil circularidade

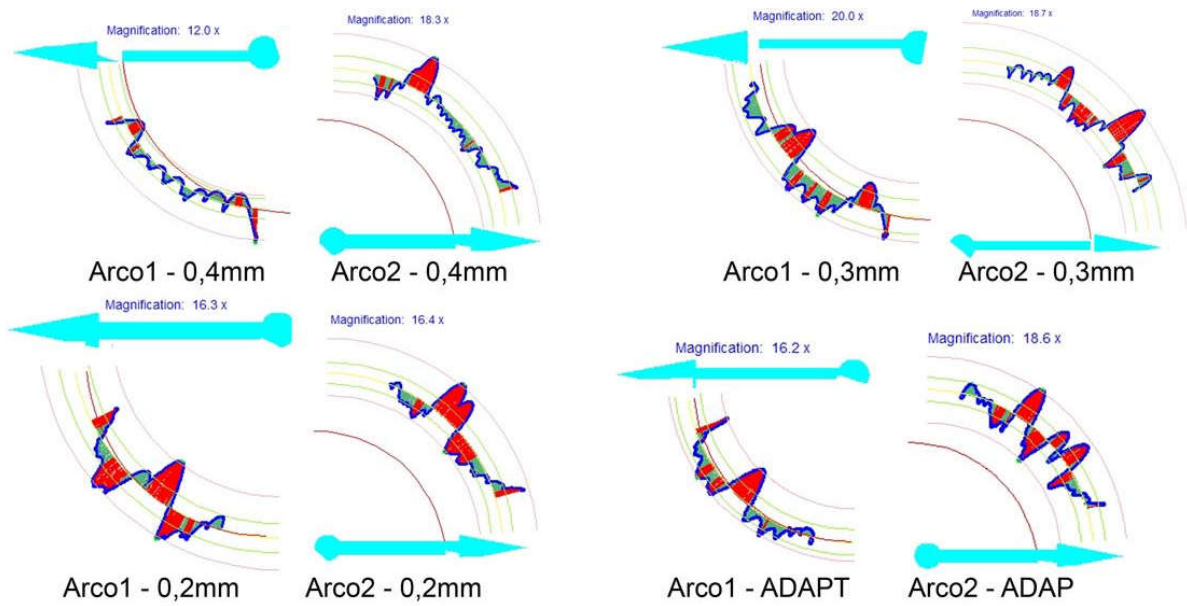
### PEÇAS 1



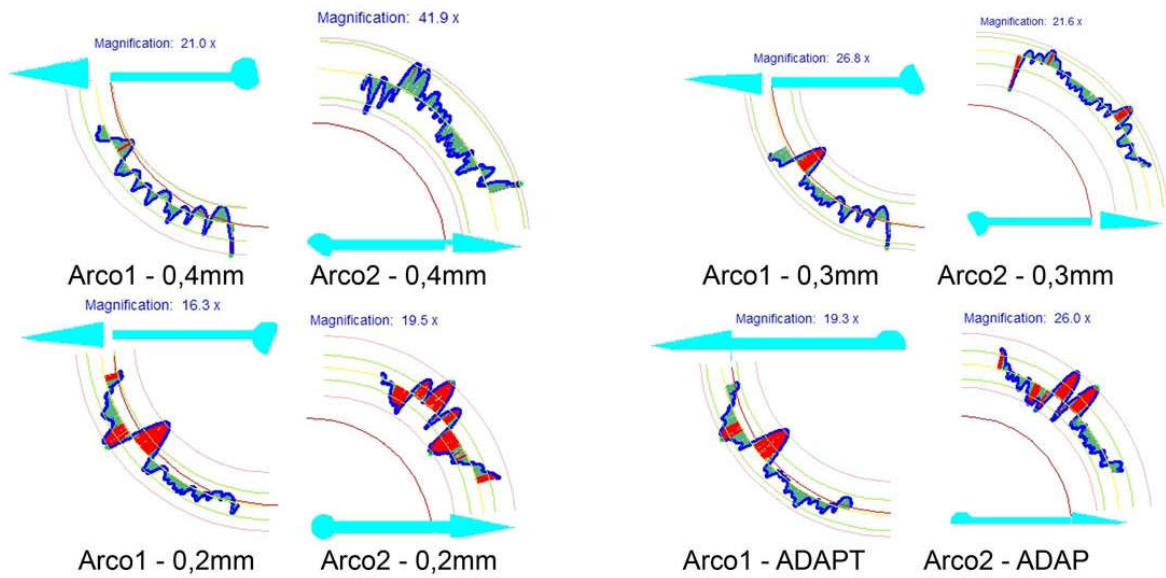
### PEÇAS 2



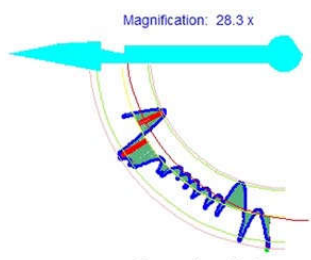
PEÇAS 3



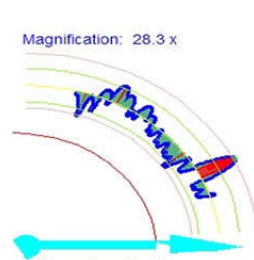
PEÇAS 4



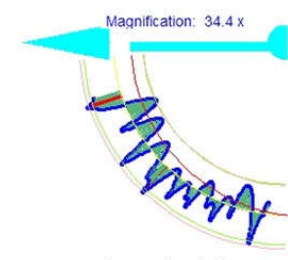
PEÇAS 5



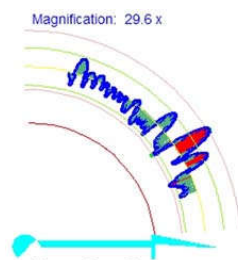
Arco1 - 0,4mm



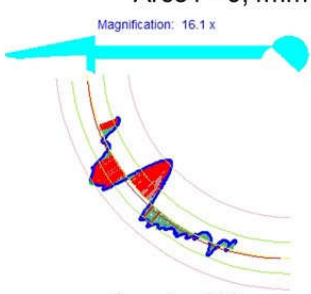
Arco2 - 0,4mm



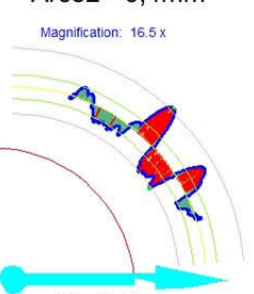
Arco1 - 0,3mm



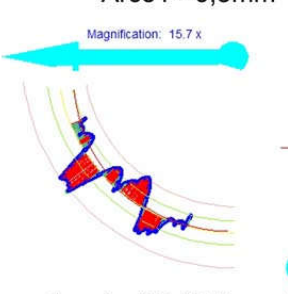
Arco2 - 0,3mm



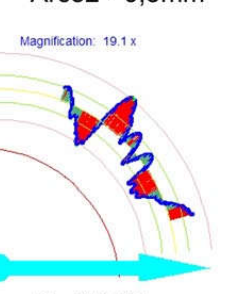
Arco1 - 0,2mm



Arco2 - 0,2mm



Arco1 - ADAPT



Arco2 - ADAP

### APÊNDICE C – Dados MMC

Peça	GRUPOS Fatiamento	Arco 1		Arco 2	
		Circ.(mm)	Raio(mm)	Circ.(mm)	Raio(mm)
1	Uniforme 0.2mm	0.176	10.356	0.246	13.957
2	Uniforme 0.2mm	0.137	10.436	0.192	13.878
3	Uniforme 0.2mm	0.250	11.594	0.266	13.262
4	Uniforme 0.2mm	0.219	10.270	0.244	12.570
5	Uniforme 0.2mm	0.230	10.497	0.277	13.491
1	Uniforme 0.3mm	0.199	10.137	0.232	13.468
2	Uniforme 0.3mm	0.145	9.669	0.192	13.179
3	Uniforme 0.3mm	0.172	9.953	0.244	14.130
4	Uniforme 0.3mm	0.133	9.474	0.196	14.024
5	Uniforme 0.3mm	0.106	9.825	0.157	14.200
1	Uniforme 0.4mm	0.107	9.090	0.165	12.723
2	Uniforme 0.4mm	0.189	9.450	0.240	11.213
3	Uniforme 0.4mm	0.220	9.321	0.229	12.558
4	Uniforme 0.4mm	0.143	9.572	0.120	13.301
5	Uniforme 0.4mm	0.117	8.890	0.162	13.383
1	Adaptativo	0.143	9.648	0.331	13.300
2	Adaptativo	0.122	10.636	0.182	13.531
3	Adaptativo	0.205	10.661	0.275	12.804
4	Adaptativo	0.182	10.712	0.190	14.361
5	Adaptativo	0.254	11.399	0.246	12.617