



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS DE CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**E DE MATERIAIS - PPGEM**

**MARCOS VINICIUS ALVES DE LIMA**

**MODELO DE FATIAMENTO ADAPTATIVO PARA**  
**PROTOTIPAGEM RÁPIDA - IMPLEMENTAÇÃO NO**  
**PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E**  
**DEPOSIÇÃO (FDM)**

**CURITIBA**

**NOVEMBRO - 2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**MARCOS VINICIUS ALVES DE LIMA**

**MODELO DE FATIAMENTO ADAPTATIVO PARA  
PROTOTIPAGEM RÁPIDA  
IMPLEMENTAÇÃO NO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E  
DEPOSIÇÃO (FDM)**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

**Orientador:** Prof. Neri Volpato, Ph.D

**Co-orientador:** Prof. José Aguiomar Foggiatto,  
Dr.

**CURITIBA**

**NOVEMBRO - 2009**

## TERMO DE APROVAÇÃO

MARCOS VINICIUS ALVES DE LIMA

# MODELO DE FATIAMENTO ADAPTATIVO PARA PROTOTIPAGEM RÁPIDA

## IMPLEMENTAÇÃO NO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

---

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde  
Coordenador de Curso

### Banca Examinadora

---

Prof. Neri Volpato, Ph.D.  
(UTFPR)

---

Prof. Dr Carlos Henrique Ahrens,  
(UFSC)

---

Prof. Dr. José Aguiomar Foggiatto,  
(UTFPR)

---

Prof. Paulo André de Camargo  
Beltrão, Ph.D.  
(UTFPR)

Curitiba, 30 de novembro de 2009

Dedico este trabalho à minha noiva Ingrid  
e a minha família, meus grandes amores

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus pela oportunidade de viver e explorar o conhecimento de mais uma vida.

Aos meus pais que durante o desenvolvimento deste trabalho me deram o apoio para não desistir.

Agradeço a minha noiva Ingrid que por muitas noites e madrugadas permaneceu ao meu lado.

Ao meu orientador, Professor Neri Volpato, e ao meu co-orientador José Aguiomar Foggiatto que, apesar do meu tempo limitado para o desenvolvimento do trabalho, continuaram a acreditar e me mostraram o caminho certo.

Agradeço também ao pessoal do NUFER, que apoiou o desenvolvimento do trabalho, em especial ao Diogo e ao David.

Ao PPGEM e a UTFPR pela estrutura que me foi cedida.

A todos que de alguma maneira ajudaram para que este trabalho fosse desenvolvido.

Não existe motivação externa, somente interna.

LIMA, Marcos Vinicius Alves de, **ADAPTIVE SLICING MODEL FOR RAPID PROTOTYPING - IMPLEMENTATION PROCESS IN A FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)** 2009, Dissertation (Master's degree in engineering) - Graduate Program in Mechanical Engineering and Materials, Federal Technological University of Paraná, 103p.

## RESUMO

A tecnologia de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*-RP) se baseia no princípio da manufatura por adição de camadas. As informações geométricas das camadas são obtidas através do fatiamento de um modelo CAD 3D, geralmente no formato STL (*Standard Telecelation Language*), por um programa de planejamento de processo, gerando assim perfis 2D (fatias) que, sobrepostos, compõem o protótipo. Normalmente, a espessura da camada, ou seja, o distanciamento entre os perfis 2D no processo RP, é constante, tendo-se assim o denominado fatiamento uniforme do modelo. Este fatiamento não considera detalhes da geometria da peça que poderiam ser melhor reproduzidos com um refinamento da espessura localmente. Os programas de planejamento de processo dos sistemas de RP comerciais não permitem um refinamento das distâncias entre camadas localizadas em regiões com maior complexidade geométrica ou com grandes variações entre os perfis. O objetivo deste trabalho é gerar e implementar um algoritmo genérico que possibilite a identificação de regiões que necessitem de um refinamento de camada através de um fatiamento adaptativo. Esta implementação foi realizada no sistema RP<sup>3</sup> para o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*), e foi constatada a viabilidade do fatiamento adaptativo de maneira automática. Após a análise dos estudos de casos propostos neste trabalho foi concluído que as condições para detecção do fatiamento adaptativo foram aplicadas com sucesso no processo FDM, resultando em uma melhor precisão geométrica da peça na direção Z.

**Palavras-chave:** Prototipagem Rápida; Fatiamento Adaptativo, Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).

LIMA, Marcos Vinicius Alves de, **MODELO DE FATIAMENTO ADAPTATIVO PARA PROTOTIPAGEM RÁPIDA - IMPLEMENTAÇÃO NO PROCESSO DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)**, 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 95p.

## ABSTRACT

The Rapid Prototyping (RP) technology is based on the layer manufacturing principle. The geometric information of the layers are obtained through the slicing of a 3D CAD model, generally in STL format (*Standard Telecelation Language*), by using a process planning software. In this process, the 2D profiles (slices) are obtained, which are piled to build the prototype. The layer thickness, i.e. the distance between the 2D layers, is usually constant, obtained in a process called uniform slicing. This slicing do not consider some details of the part geometry, which could be better reproduced if a locally thickness refinement was performed. The process planning software's for commercial RP systems do not allow such refinement. The target of this work is to generate and implement an algorithm that allows the identification of regions that need layer refinement through an adaptive slicing. After preliminary tests performed on a FDM (Fused Deposition Modeling) process, it was proved the feasibility of the adaptive slicing in an automatic manner. After the case studies analysis, it was concluded that the conditions for the adaptive slicing were detected successfully for the FDM process, resulting in a better dimensional accuracy of the part, at Z direction.

**Keywords:** Rapid Prototyping; Adaptive Slicing , Fused Depostion Modeling (FDM).

## SUMÁRIO

RESUMO .....	<i>vi</i>
ABSTRACT .....	<i>vii</i>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>x</i>
LISTA DE TABELAS .....	<i>xi</i>
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	<i>xii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	<i>xiii</i>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do Problema .....	1
1.2 Hipótese .....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo Geral.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Justificativa .....	3
1.5 Organização do Trabalho .....	4
<b>2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Principais Tecnologias de RP.....	5
2.2 Planejamento de Processo.....	8
2.2.1 Arquivo STL.....	9
2.3 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).....	11
2.3.1- Princípio da tecnologia.....	11
2.3.1 Arquivo SML .....	15
2.4 Desvio Dimensional na Tecnologia RP.....	16
2.4.1 Estudos Dimensionais na Tecnologia FDM .....	19
2.4.2 Métodos de Fatiamento Adaptativo .....	21
2.4.3 Métodos de Fatiamento Adaptativo Baseado em Modelo STL.....	22
2.4.4 Método de Fatiamento Adaptativo Baseado em Modelo CAD.....	29
2.4.5 Métodos de Controle de Picos Associado ao Fatiamento Adaptativo.....	31
2.5 Aplicativo RP <sup>3</sup> .....	33
2.6 Discussão .....	35
<b>3 MODELO PROPOSTO DE FATIAMENTO ADAPTATIVO.....</b>	<b>37</b>
3.1 Determinações da espessura da camada .....	37
3.2 Modelo de Fatiamento Adaptativo .....	38

3.2.1	Algoritmo de Fatiamento Adaptativo pela inclinação da superfície.....	40
3.2.2	Algoritmo de Fatiamento Adaptativo considerando Controle de Picos .....	43
3.2.3	Implementação no Processo FDM.....	45
<b>4</b>	<b>VALIDAÇÃO do modelo .....</b>	<b>46</b>
4.1	Contextualização do Estudo de Caso.....	46
4.2	Estudo de Caso 1 – Fatiamento adaptativo pela inclinação dos triângulos .....	47
4.2.1	Geometria do Estudo de Caso 1.....	48
4.2.2	Recursos Utilizados.....	49
4.3	Estudo de Caso 2 - Fatiamento adaptativo pela condição de picos .....	51
4.3.1	Geometria do Estudo de Caso 2.....	51
4.3.2	Recursos Utilizados.....	53
4.4	Estudo de Caso 3 – Aplicação em geometria real.....	54
4.4.1	Geometria do Estudo de Caso 3.....	54
4.5	Estudo de Caso 4 - Dimensional .....	55
4.5.1	Geometria do Estudo de Caso 4.....	56
4.5.2	Recursos Utilizados.....	57
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
5.1	Estudo de Caso 1 - Fatiamento adaptativo pela inclinação dos triângulos.....	58
5.2	Estudo de Caso 2 - Fatiamento adaptativo pela condição de picos .....	62
5.3	Estudo de Caso 3 – Aplicação em Geometria Real.....	65
5.4	Estudo de Caso 4 - Dimensional .....	66
<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
6.1	Discussões .....	71
6.2	Conclusões.....	73
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	74
	<b>PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO (Março 2005 – Março 2009) .....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DOS ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE B – ARQUIVO .RP3 .....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio de manufatura por camada – principais estágios (VOLPATO <i>et al.</i> , 2005).....	6
Figura 2.2 – Ciclo do processo de RP (PANDEY <i>et al.</i> , 2003).....	8
Figura 2.3 – Modelo em STL de uma esfera (KULKARNI e DUTTA, 1996).....	9
Figura 2.4 – Composição de um triângulo do formato STL (Volpato <i>et al.</i> , 2005).....	10
Figura 2.5 – Vértices compartilhados repetidos (SILVA, 2007). ....	10
Figura 2.6- Princípio de funcionamento da tecnologia FDM (VOLPATO <i>et al.</i> , 2005). .....	11
Figura 2.7 - Estratégias de preenchimento do processo de RP FDM (VOLPATO <i>et al.</i> , 2005).....	13
Figura 2.8 - Preenchimento tipo raster com alternância de direção entre camadas – processo FDM (VOLPATO <i>et al.</i> , 2008). ....	14
Figura 2.9 – Necessidade de estrutura de suporte em regiões suspensas (Adaptado de SILVA, 2007).....	15
Figura 2.10 - Altura de crista máxima ( $\delta$ ) e efeito escada (KULKARNI e DUTTA, 1996). ....	17
Figura 2.11 - Perfil de uma esfera fabricada por RP ilustrando o efeito contenção (KULKARNI e DUTTA, 1996).....	18
Figura 2.12 – (a) Modelo original; (b) Modelo resultante do fatiamento (DOLENC e MAKELA, 1996). ....	18
Figura 2.13 – Perda da geometria entre camadas (DOLENC e MAKELA, 1994) .....	19
Figura 2.14– Erro Dimensional no eixo Z para as Geometrias estudadas: (a) Geometria 1; (b) Geometria 2; (c) Geometria 3 (Adaptado de SCHWARZ, 2009). .....	20
Figura 2.15 – Representação esquemática dos tipos de fatiamento. ....	22

Figura 2.16 - Efeito escada e o desvio da geometria $c$ (DOLENC e MAKELA, 1994). .....	23
Figura 2.17 - Recuo no fatiamento adaptativo (DOLENC e MAKELA, 1994).....	24
Figura 2.18 - Manufatura com interior rápido e exterior refinado (SABOURIN <i>et al.</i> , 1997). .....	26
Figura 2.19 - Duas camadas adjacentes subdivididas em contornos externos e internos (SABOURIN <i>et al.</i> , 1997).....	27
Figura 2.20 – Fatiamento adaptativo em ambas as geometrias realizadas (TYBERG e BOHN, 1998) .....	28
Figura 2.21 – Fatiamento das geometrias em lajes (TYBERG e BOHN, 1998) .....	28
Figura 2.22 - Fatiamento adaptativo aplicado independentemente em uma das geometrias realizadas (TYBERG e BOHN, 1998) .....	29
Figura 2.23 - Curvatura normal da superfície (KULKARNI e DUTTA, 1996).....	30
Figura 2.24 – Determinação do desvio da geometria permitido (KULKARNI e DUTTA, 1996) .....	30
Figura 2.25 – Refinamento de camada em picos (DOLENC e MAKELA, 1994) .....	31
Figura 2.26 - Picos não detectáveis (DOLENC e MAKELA, 1994). .....	32
Figura 2.27- Separação das áreas em negativas e positivas segundo suas normais (DOLENC e MAKELA, 1994) .....	33
Figura 2.28 - Contornos; (a) vista lateral de uma peça $W$ e uma fatia em $F_j$ , (b) vista topo do contorno $F_j$ , dividido em duas partes (DOLENC e MAKELA, 1994) .....	33
Figura 2.29 - Módulos Genéricos e Específicos do Sistema RP <sup>3</sup> (VOLPATO <i>et al.</i> , 2008). .....	34
Figura 3.1 – Fatias espessas (a) e refinadas (b). .....	38
Figura 3.2 – Intersecção do plano de fatiamento com a malha STL (Tata <i>et al.</i> , 1998). .....	39
Figura 3.3 – Diferenciação de contornos internos e externos.....	39
Figura 3.4 – Variação do ângulo para a aplicação do fatiamento adaptativo.....	41

Figura 3.5 – Ciclo de detecção do fatiamento adaptativo por camada. ....	42
Figura 3.6 – Normais identificadas pelo controle de picos.....	44
Figura 4.1 – Geometria do primeiro estudo com superfícies inclinadas.....	48
Figura 4.2 – Superfície ou seção utilizada para a verificação do fatiamento adaptativo. ....	50
Figura 4.3 – Geometria do estudo de caso de picos e superfícies inclinadas.....	52
Figura 4.4 – Condições de inclinação e de picos em uma mesma faixa de altura. ...	53
Figura 4.5 – Superfície ou seção utilizada para a verificação do fatiamento adaptativo. ....	53
Figura 4.6 – Geometria do estudo de caso real.....	55
Figura 4.7 – Geometria escada para análise do erro da geometria. ....	56
Figura 4.8 – Altura da camada para o fatiamento adaptativo por picos. ....	57
Figura 5.1 – Análise microscópica do estudo de caso 1 na região 4. ....	60
Figura 5.2– Gráfico dos erros dimensionais com a correção aplicada.....	61
Figura 5.3 – Condição de pico analisado pelo microscópio do último pico. ....	63
Figura 5.4 – Gráfico dos erros dimensionais com a correção aplicada.....	64
Figura 5.5 – Gráfico do erro do processo na direção Z em função da altura de camada.....	69
Figura 5.6– Gráfico dos erros dimensionais com a correção aplicada.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Tipo de processos de RP utilizados no mercado (Adaptado de VOLPATO, 2007).....	7
Tabela 2.2- Exemplo da linha de comando <i>PD</i> .....	16
Tabela 4.1 – Tipos de bicos para o equipamento FDM 2000. ....	46
Tabela 4.2 – Recursos utilizados no estudo de caso 1.....	51
Tabela 5.1 – Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada. ....	59
Tabela 5.2 – Alturas medidas nos programas de planejamento de processo. ....	61
Tabela 5.3 - Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada. ....	62
Tabela 5.4 – Alturas medidas nos programas de planejamento de processo. ....	64
Tabela 5.5 - Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada. ....	65
Tabela 5.6 - Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada. ....	67
Tabela 5.7 – Alturas medidas nos programas de planejamento de processo. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - *Acrylonitrile-Butadiene-Styrene*

ABSi - *(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Sterizable*

CAD - *Computer Aided Design*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

FDM - *Fused Deposition Modeling*

LOM - *Laminated Object Manufacturing*

RP - *Rapid Prototyping*

RP<sup>3</sup> - *Rapid Prototyping Process Planning*

SL - *Stereolithography*

SLS - *Selective Laser Sintering*

SML - *Stratasys Modeling Language*

STL - *STereoLithography ou Standard Telecelation Language*

3DP - *3D Printing*

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - *Acrilonitrila-butadieno-estireno*

ABSi - *(Acrilonitrila-butadieno-estireno) esterilizável*

CAD - *Desenho Assistido por Computador*

CAM - *Manufatura Assistida por Computador*

FDM - *Modelagem por Fusão e Deposição*

LOM - *Objeto Manufaturado por Lâminas*

RP - *Prototipagem Rápida*

RP<sup>3</sup> - *Planejamento de Processo de Prototipagem Rápida*

SL - *Estereolitografia*

SLS - *Sinterização Seletiva a Laser*

SML - *Linguagem Stratasys de Modelagem*

STL - *Estereolitografia ou Linguagem Padrão de Tecelagem*

3DP - *Impressão em 3D*

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $PD$  - Parâmetro para configuração da camada
- $\delta$  - Altura de crista
- $L$  - Espessura de camada
- $B_{OR}$  - Contorno da geometria original CAD
- $B_{LM}$  - Contorno da geometria manufaturada em camadas
- $S$  - Perfil 2D gerado pelo CAD
- $S'$  - Perfil transversal do modelo produzido RP
- $c$  - Desvio da geometria
- $C_{máx}$  - Desvio máximo da geometria
- $N$  - Normal do triângulo
- $N_x$  - Componente em x da normal do triângulo
- $N_y$  - Componente em y da normal do triângulo
- $N_z$  - Componente em z da normal do triângulo
- $C$  - *Desvio Geométrico Permitido*
- $l$  - Altura de camada padrão
- $L_{máx}$  - Altura de camada máxima
- $l_{mín}$  - Altura de camada mínima
- $\alpha_{slab}$  - Número máximo de subdivisões de uma camada
- $n_{zbase}$  - Normal em z da base da camada
- $n_{ztopo}$  - Normal em z do topo da camada
- $xt$  - Direção de um plano tangente a curvatura
- $N_s$  - Secção normal
- $n$  - Camada
- $C(n)$  - Contorno da camada

$F_-$  - Área plana negativa

$F_+$  - Área plana positiva

$\alpha$  - Ângulo da normal do triângulo

$\alpha_{adapt}$  - Ângulo mínimo para realização do fatiamento adaptativo

$\alpha_{pico}$  - Ângulo para detecção de picos

# 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping* - RP) se baseia no princípio da manufatura por camadas. As informações geométricas das camadas são obtidas através do fatiamento de um modelo CAD 3D, geralmente no formato STL (*Standard Telecelation Language*), por um programa de planejamento de processo, gerando assim perfis 2D (fatias) que, sobrepostos, compõem o protótipo.

A manufatura por adição de camadas possui variáveis de processo que podem ser modificadas, objetivando-se melhorias nas características da fabricação do protótipo. Uma das variáveis que permite ser otimizada é o processo de deposição de camadas de maneira adaptativa durante a construção do protótipo. A deposição adaptativa se baseia na utilização de espessuras distintas de camadas permitidas pelo processo, mesclando-as durante a manufatura do protótipo. Este processo permite que regiões onde existam detalhes complexos na geometria, sejam melhor reproduzidos pela tecnologia de prototipagem rápida.

Um dos processos de RP é a Modelagem por Fusão e Deposição - FDM (*Fused Deposition Modeling*). Durante a manufatura de um protótipo no processo FDM, um cabeçote realiza a deposição dos filamentos de material, compondo camadas paralelas ao longo do eixo Z. Para cada camada, geram-se coordenadas (X e Y) sobre as quais, o bico extrusor percorre para deposição dos filamentos extrudados. Este por sua vez, é controlado por um programa proprietário da tecnologia que transmite todas as coordenadas e variáveis necessárias para a construção do protótipo.

## 1.1 Definição do Problema

Normalmente, a espessura da camada, ou seja, o distanciamento entre os perfis 2D no processo RP, é constante, tendo-se assim o denominado fatiamento uniforme do modelo. Este fatiamento não considera detalhes da geometria da peça que poderiam ser melhor reproduzidos com um refinamento da espessura localmente.

Os programas de planejamento de processo dos sistemas de RP comerciais não permitem um refinamento das distâncias entre camadas localizadas em regiões com maior complexidade geométrica, com grandes variações entre os perfis gerando picos e vales. Os picos e vales são regiões planas da geometria, seja ao longo da mesma ou em suas últimas camadas, que por falta de refinamento nas mesmas podem resultar na imprecisão ao longo do eixo Z do modelo geométrico. Para se obter um refinamento na espessura de camada destas regiões, é necessário utilizar uma espessura constante menor em toda a peça, mesmo esta possuindo regiões em que uma espessura maior atenderia os requisitos de acabamento. Assim, em alguns casos, têm-se protótipos com tempo de produção elevado ou então com menor precisão dimensional.

No estudo realizado por LIMA *et al.* (2005) foi visto que o erro dimensional em Z é proporcional a altura da camada, sendo que quanto maior a camada maior o erro dimensional. Este erro poderia ser parcialmente atribuído a falta de refinamento nas regiões onde se encontram picos e vales.

Observa-se que algumas tecnologias de RP poderiam utilizar uma variação de espessura de camada ao longo da construção da peça. Em um estudo inicial com a tecnologia FDM, motivador para este trabalho, foi identificado que, através da alteração das configurações padrões do programa proprietário, é possível variar as espessuras das camadas de maneira independente (LIMA *et al.*, 2006).

Atualmente, está sendo desenvolvido no NUFER um aplicativo de planejamento de processo para prototipagem rápida, denominado RP<sup>3</sup> (*Rapid Prototyping Process Planning*). Este programa possui uma maior flexibilidade na entrada de parâmetros em relação ao programa proprietário da Stratasys, possibilitando a inserção da variação de espessuras de camadas durante a construção de um protótipo.

## 1.2 Hipótese

Como hipótese principal deste trabalho, supõe-se que seja possível reduzir o erro dimensional na direção Z através da criação de um modelo genérico de fatiamento adaptativo que, de maneira automática, detecte regiões de uma geometria que devam ser refinadas.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é criar um algoritmo genérico que possibilite localizar as regiões que necessitem do fatiamento adaptativo durante o planejamento de processo de RP e implementar o mesmo no sistema RP<sup>3</sup>.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para a criação e implementação deste algoritmo, de maneira genérica, propõe-se:

- a) Analisar os diversos estudos realizados com fatiamento adaptativo, verificando possíveis melhorias no processo que potencialize o fatiamento adaptativo com controle de picos, áreas planas, dentre outros;
- b) Propor um modelo de fatiamento adaptativo e implementar o mesmo no programa de planejamento de processo RP<sup>3</sup> (que será detalhado nas próximas seções).
- c) Viabilizar uma melhor precisão dimensional de geometrias complexas, mantendo-se a qualidade atual dos protótipos produzidos pelo processo FDM de RP.

## 1.4 Justificativa

Através do processo de RP é possível reduzir o tempo de lançamento de um produto no mercado. Considera-se então que a melhoria de fatores que viabilizem a sua produção de maneira mais eficaz seja de extrema importância no desenvolvimento de produto.

A precisão geométrica é um fator importante para a manufatura do protótipo, devido à necessidade de se obter um protótipo mais próximo do produto final. Para a obtenção deste fator, através do processo de RP convencional, é necessária a produção do protótipo inteiro com camadas bem refinadas. Conseqüentemente, tem-se um maior número de camadas, resultando em um tempo maior de produção do protótipo. O tempo de construção do protótipo também é considerado um fator importante dentro do processo de desenvolvimento de produtos, pois envolve custos e pode tardar o seu lançamento no mercado. O aumento do mesmo pode implicar em mais gastos para empresa. Por esta razão o protótipo pode deixar de ser confeccionado, o que comprometeria o desenvolvimento do produto e, conseqüentemente, a qualidade do mesmo.

Melhorias como o fatiamento adaptativo, agilizam o processo de construção do protótipo além de permitir uma flexibilidade durante o processo de manufatura. Porém, atualmente os parâmetros de processo são controlados por programas dedicados para o planejamento do processo de manufatura, impossibilitando uma maior flexibilidade no mesmo. Programas como o RP<sup>3</sup> propõem um planejamento de processo genérico podendo ser adequado as tecnologias comerciais, possibilitando assim uma exploração na área e, conseqüentemente, viabilizando melhorias nos diversos processos de RP. Esta flexibilidade favorece o desenvolvimento de pesquisas em torno dos processos de RP, o que por sua vez, tende a resultar na diminuição do tempo de produção do protótipo e, conseqüentemente, do produto.

## **1.5 Organização do Trabalho**

O trabalho está organizado da seguinte forma: uma breve introdução e objetivos são apresentados no Capítulo 1. Os processos de prototipagem rápida, o princípio de funcionamento e maiores detalhes sobre a tecnologia FDM, são discutidos no Capítulo 2, em uma revisão bibliográfica. O modelo proposto para o fatiamento adaptativo é tratado no Capítulo 3. A validação do modelo e os estudos de casos realizados são apresentados no Capítulo 4. Os resultados e discussões acerca dos estudos de caso são realizados no Capítulo 5. O trabalho finaliza no capítulo 6 com as discussões, conclusões e considerações para trabalhos futuros.

## 2 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Este capítulo apresenta uma revisão a respeito do processo de prototipagem rápida (*Rapid Prototyping* - RP), assim como uma abordagem mais detalhada do processo Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling* - FDM). São abordados também os desvios dimensionais que são inerentes a esta tecnologia e apresentada uma revisão sobre os modelos propostos para contorná-los através do fatiamento adaptativo.

### 2.1 Principais Tecnologias de RP

A tecnologia de RP é definida como um processo de fabricação baseado no princípio da manufatura por adição de camada, ou seja, que realiza a construção do protótipo físico através da adição de sucessivas camadas planas de material. O processo de fatiamento é muito utilizado nos processos de CAD/CAM/RP, pois este transforma uma peça tridimensional em camadas bidimensionais (CHUA *et al.*, 2003). Com o processo de simplificação do modelo, a RP possibilita a fabricação de uma peça utilizando-se informações obtidas diretamente de um modelo geométrico tridimensional (3D) do CAD (*Computer Aided Design*) (DOLENC e MAKELA, 1996; GIBSON, 2002).

A RP tem um papel importante no desenvolvimento de produtos, pois possibilita a utilização facilitada de protótipos, que permitem a detecção de problemas durante a etapa inicial do projeto, evitando erros no produto final (CARVALHO e VOLPATO, 2007).

Para auxiliar no desenvolvimento do produto existem, atualmente, diversas tecnologias de RP, sendo todas capazes de produzir modelos físicos diretamente do CAD por adição de material ao invés de processos convencionais como remoção ou conformação (YAN e GU, 1996). As tecnologias de RP podem ser classificadas em três categorias principais, de acordo com o estado inicial do material de adição utilizado: líquido, sólido ou pó (KULKARNI e DUTTA, 1996).

Todas as tecnologias de RP seguem basicamente o mesmo princípio de manufatura por camada, como mostrado na Figura 2.1.

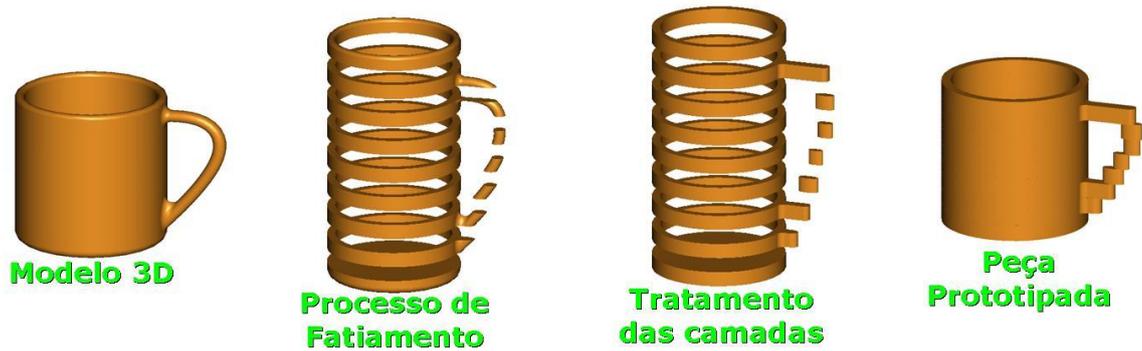


Figura 2.1 – Princípio de manufatura por camada – principais estágios (VOLPATO *et al.*, 2005).

Dentre os processos de RP existentes no mercado podem-se citar alguns dos mais relevantes: Estereolitografia (*StereoLithography* - SL), Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS), Manufatura de Objetos por Lâminas (*Laminated Object Manufacturing* - LOM), Impressão Tridimensional (*3D Printing* - 3DP), Impressão por Jato de Tinta (*Ink Jet Printing* - IJP) e Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling* - FDM) (CARVALHO e VOLPATO, 2007). A diferença básica entre estas tecnologias é o método em que cada matéria-prima é adicionada. De acordo com o processo, algumas tecnologias dependem de um laser para a solidificação do material (CHUA *et al.*, 2003). Uma breve descrição e principais características de alguns dos processos existentes são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1– Tipo de processos de RP utilizados no mercado (Adaptado de VOLPATO, 2007)

Processo / Características	Baseado em líquido		Baseado em Sólido		Baseado em Pó	
	SL	IJP	LOM	FDM	SLS	3DP
Precisão	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Baixa
Velocidade de construção	Média	Média	Média-Alta	Baixa	Média	Alta
Necessidade de suporte	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não
Acabamento superficial	Excelente	Bom	Regular-Ruim	Regular	Bom	Regular
Principais materiais utilizados	Resinas líquidas foto curáveis	Resinas líquidas foto curáveis e ceras	Papel	ABS, ABSi, PC e PPSF	Náilon, poliamida, elastômeros, cerâmica e metal	Polímero, cerâmica, metal, gesso e material a base de amido
Princípio	· Através da movimentação de um feixe de laser a resina é curada, passando de estado líquido a sólido.	· Sistema a jato de tinta que deposita uma resina em pequenas gotas, sendo curado através de uma luz UV (Ultra-Violeta).	· Um feixe de laser corta as folhas já depositadas, que se unem após serem aquecidas pela ativação de um adesivo em um dos lados,	- Deposita, através de um cabeçote aquecido, o termoplástico que é fundido e logo depois de depositado se resfria e solidifica.	· Através de um laser o material em pó é sinterizado com a passagem do laser.	· O material em pó é agregado por aglutinante depositado por impressão jato de tinta.

## 2.2 Planejamento de Processo

Em todos os processos de RP, o modelo 3D de um componente é criado utilizando-se um sistema CAD e fatiado antes de seus dados serem transferidos para esta tecnologia. Todo o processo que ocorre durante a passagem de dados do CAD ao equipamento de RP é mostrado na Figura 2.2 (PANDEY *et al.*, 2003).

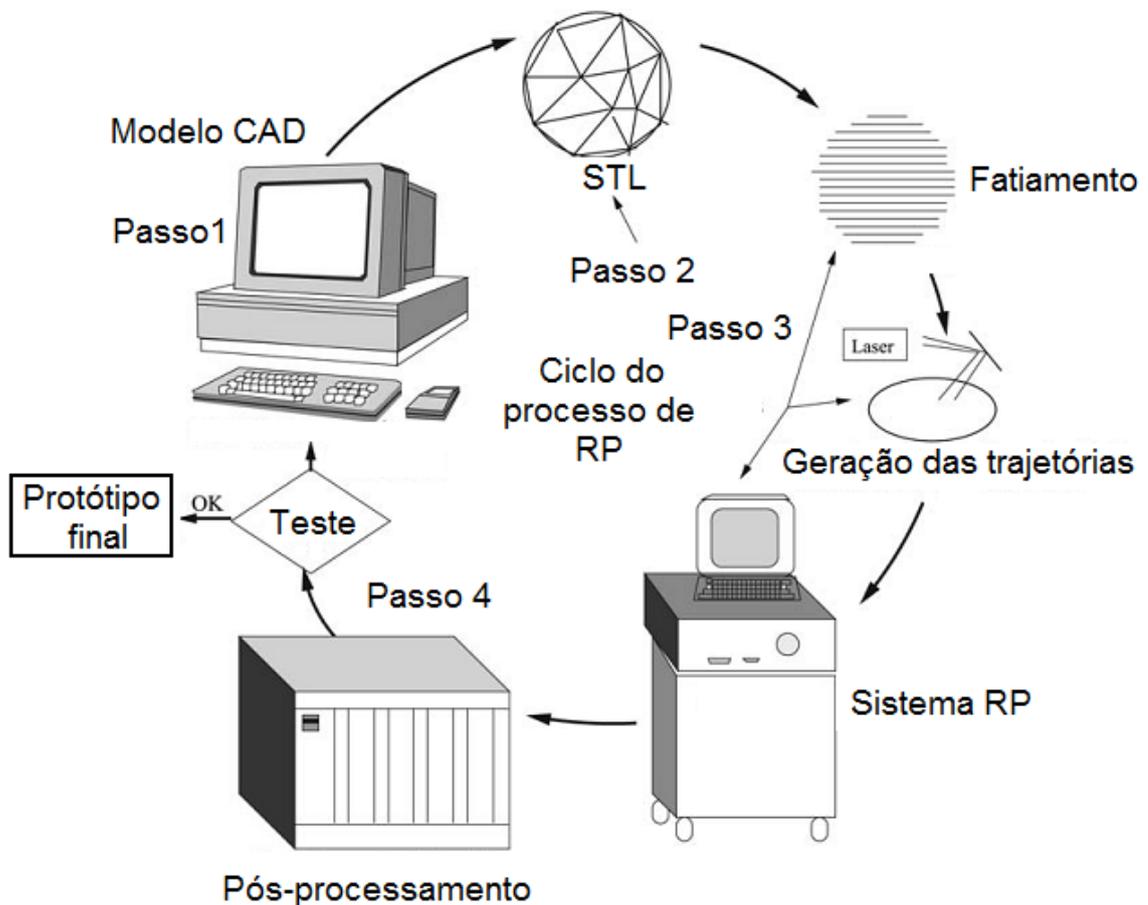


Figura 2.2 – Ciclo do processo de RP (PANDEY *et al.*, 2003).

Inicialmente modelo tridimensional é projetado em um CAD é apresentado no Passo 1. Em uma próxima etapa (Passo 2) o modelo é convertido em um formato padrão, utilizando um processo de aproximação por faces planas (facetado), denominado STL (*Standard Tessellation Language*) (KULKARNI e DUTTA, 1996).

Este modelo, por simplificar a geometria do CAD convertendo superfícies complexas em facetas, possibilita a simplificação no processo de fatiamento. Esta representação será mais bem detalhada nas seções seguintes. No Passo 3 o processo de fatiamento realizado, onde planos horizontais intersectam o modelo CAD, resultando em curvas fechadas ou polígonos. O espaço entre dois planos horizontais adjacentes é denominado camada (PANDEY *et al.*, 2003). Depois disso, toda a informação é transferida para o equipamento de RP a ser utilizado. Dependendo da tecnologia o Passo 4 é realizado para um pós processamento do protótipo, como lixamento, pintura dentre outros. Todo o ciclo do processo pode-se repetir quantas vezes se faz necessário até que seja completado satisfatoriamente, com o protótipo atendendo as necessidades do projeto (SILVA, 2007).

### 2.2.1 Arquivo STL

Como visto nas seções anteriores nos processos de manufatura por camadas, existe a necessidade da utilização de um modelo geométrico 3D em CAD para a produção do protótipo. Este modelo pode ser desenvolvido, através de uma ferramenta CAD, podendo ser sólido ou em superfície. Para que seja possível a conversão dos modelos em formato STL é necessário que estes estejam como um objeto fechado e consistente (SILVA, 2007).

O formato STL aproxima as superfícies do modelo utilizando faces triangulares, criando uma representação facetada da geometria da peça (JACOB, 1999). A Figura 2.3 apresenta um exemplo de uma geometria STL.

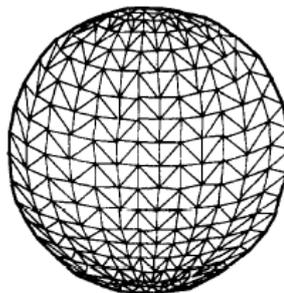


Figura 2.3 – Modelo em STL de uma esfera (KULKARNI e DUTTA, 1996).

O formato STL é caracterizado como uma maneira robusta de representar modelos tridimensionais utilizando-se de triângulos irregulares, que compõem uma malha em toda superfície do modelo obtido do CAD (SILVA, 2007). Esta simplificação da geometria permite a implementação de algoritmos de fatiamento mais facilmente, assim como a orientação do modelo e a geração da estrutura do suporte (PANDEY *et al.*, 2003). Cada triângulo gerado no modelo em STL é composto pelas coordenadas cartesianas (X, Y, Z) para os três vértices e um vetor normal à superfície (Figura 2.4).

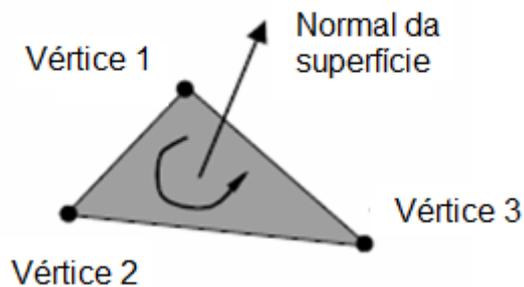


Figura 2.4 – Composição de um triângulo do formato STL (Volpato *et al.*, 2005).

A representação STL através de coordenadas dos vértices de cada triângulo é uma forma redundante de representar um modelo tridimensional, pois os valores de coordenadas são repetidos para qualquer vértice compartilhado (SILVA, 2007). A Figura 2.5 mostra os vértices compartilhados repetidos dos triângulos.

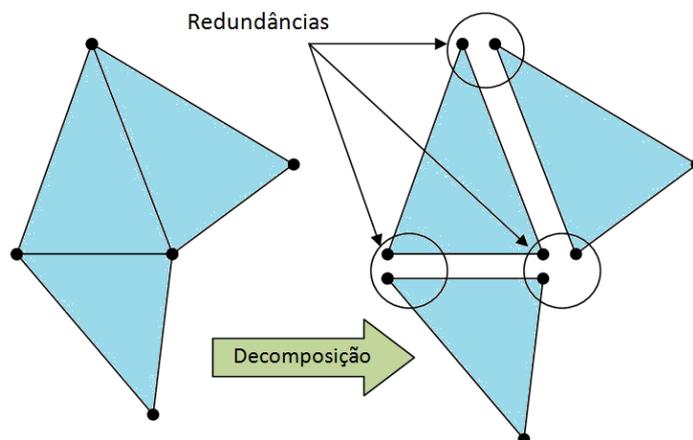


Figura 2.5 – Vértices compartilhados repetidos (SILVA, 2007).

O processo de obtenção de contornos 2D para cada camada a partir do modelo 3D é denominado de fatiamento e ocorre em três etapas: a) intersecção dos planos horizontais com o modelo; b) geração de pontos nas intersecções; c) a construção de contornos 2D da geometria (CHUA *et al.*, 2003).

## 2.3 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

### 2.3.1- Princípio da tecnologia

A tecnologia FDM adiciona material na forma de um filamento polimérico extrudado (Figura 2.6). O princípio da adição de material consiste na extrusão de um filamento termoplástico aquecido (em estado semi-líquido). A construção do protótipo é realizada através do cabeçote de extrusão que se move num plano X-Y e uma plataforma que, conforme decorrida a deposição de uma camada, se movimenta no eixo Z.

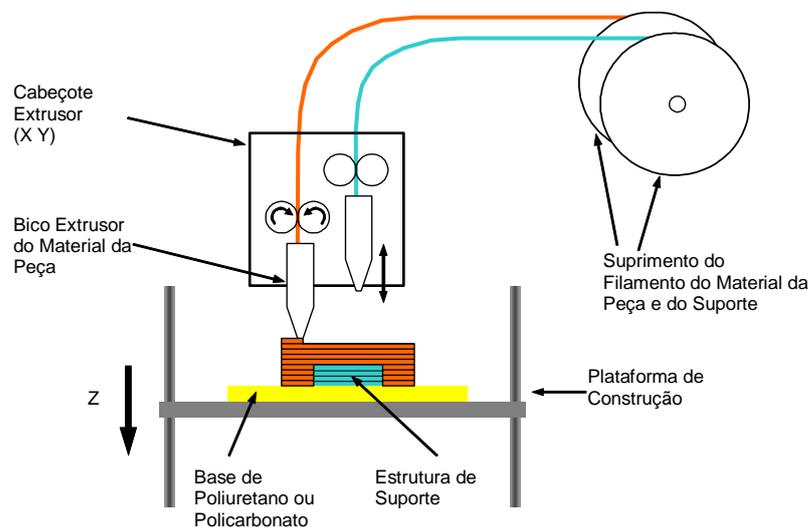


Figura 2.6- Princípio de funcionamento da tecnologia FDM (VOLPATO *et al.*, 2005).

A cabine da máquina é mantida sob uma temperatura inferior à do material sendo depositado, de forma que o mesmo endurece rapidamente ao contato com a

camada anterior. Após esse endurecimento a plataforma é abaixada ligeiramente e o bocal de extrusão deposita uma nova camada sobre a anterior (VOLPATO *et al.*, 2007).

A plataforma é movida na direção do eixo Z ao término de cada camada, deslocando-se numa distância equivalente à espessura da mesma. Nesta plataforma, existe uma base de poliuretano poroso rígido ou uma placa de policarbonato que garante a planicidade da superfície e serve de âncora para a fixação do protótipo.

A tecnologia FDM utiliza dois bicos no cabeçote de extrusão, um para deposição do material do protótipo, e o outro para a construção das estruturas de suporte. Como este processo utiliza um único bico para extrusão do material do protótipo, o tempo despendido para o preenchimento de uma área grande é elevado, tornando o processo lento. O bico dos equipamentos FDM, controla, juntamente com o arquivo de programação SML (*Stratasys Modeling Language*), que será visto na próxima seção, as espessuras permitidas para o filamento a ser depositado. Sendo que para a bico padrão do equipamento a espessura pode variar de 0,178 a 0,254 mm.

O material do suporte possui uma fragilidade maior que o material da peça permitindo que sua remoção seja facilitada.

Entre os materiais disponíveis para este processo, encontram-se: o ABS (*Acrylonitrile-Butadiene-Styrene*), o policarbonato, a polifenilsulfona, o poliéster ABSi (material esterilizável) e a cera (VOLPATO *et al.*, 2007).

Segundo ZIEMINAN e CRAWN (2001), as principais variáveis do processo FDM que interferem no tempo de confecção, precisão dimensional e qualidade de acabamento do protótipo são:

- a) Orientação de construção;
- b) Espessura da camada;
- c) Espessura do filamento de material;
- d) Tipo de preenchimento da camada.

Outra característica presente no processo comercial é a utilização de camadas eqüidistantes, devido ao fatiamento horizontal (ao longo do eixo Z). Obtêm-se então o perfil 2D de cada camada a ser manufaturada.

O processo de manufatura de cada camada inicia-se com a construção do perímetro ou perfil da seção transversal da peça. Cada perímetro ou perfil deve ser um contorno fechado com um ponto inicial e final coincidentes. Uma vez definido o perímetro, o preenchimento interno é feito a uma determinada espessura e largura.

No caso específico da tecnologia FDM esta pode ser de três formas:

- a) *Raster* – um contorno realizado, constitui-se em movimentos de passes paralelos (Figura 2.7a);
- b) *Contour* ou *Offset* – vários ciclos fechados eqüidistantes são depositados conforme o perímetro ou perfil da camada (contorno) (Figura 2.7b);
- c) *Contour* e *Raster* – são combinados as duas estratégias de preenchimento em cada camada (Figura 2.7c).

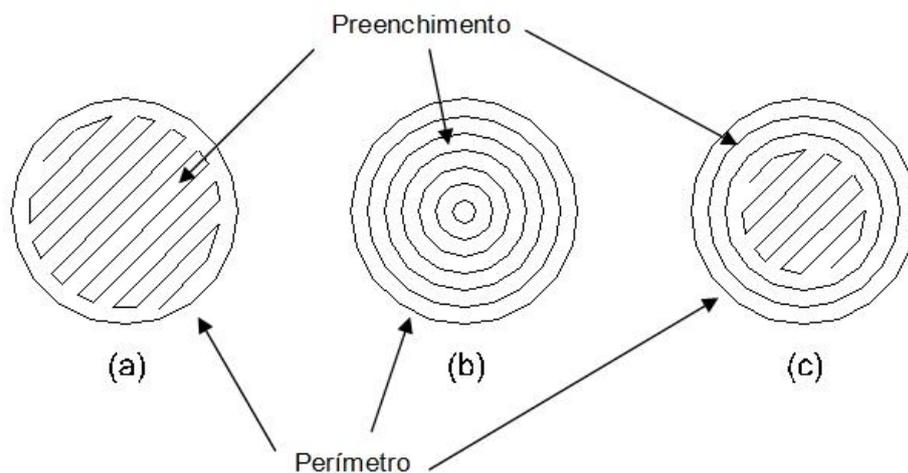


Figura 2.7 - Estratégias de preenchimento do processo de RP FDM (VOLPATO et al., 2005).

Segundo VOLPATO *et al.* (2005), o preenchimento *raster* é o mais empregado devido sua a maior velocidade de construção.

Geralmente, a direção do *raster* é alternada em 90° de uma camada para outra, conforme a Figura 2.8, conferindo maior resistência mecânica à peça e minimizando espaços vazios entre filamentos e camadas (VOLPATO *et al.*, 2008).

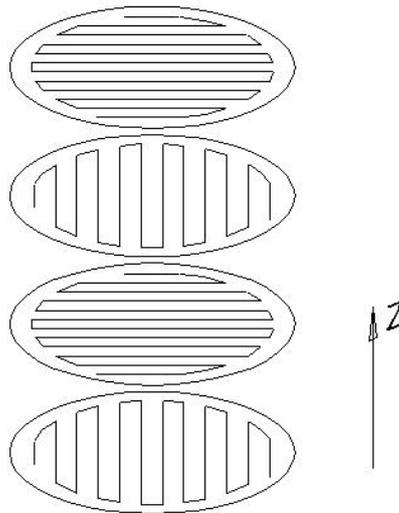


Figura 2.8 - Preenchimento tipo raster com alternância de direção entre camadas – processo FDM (VOLPATO *et al.*, 2008).

Em casos onde a geometria da peça apresenta regiões suspensas e/ou partes desconectadas, dependendo da tecnologia, são necessárias as construções de estruturas e/ou utilização da estrutura já existente de suporte para que a manufatura das camadas possa ocorrer, sem interferir na geometria desejada (Figura 2.9).

A variável que controla a espessura de camada (a distância entre camadas) tem efeito direto sobre o tempo de construção e da qualidade do acabamento superficial da peça, bem como no seu dimensional. Camadas mais espessas diminuem o tempo de construção, porém a superfície de acabamento é prejudicada (ZIEMIAN e CRAWN, 2001). Este é conhecido com o efeito escada, que será apresentado em maiores detalhes nas próximas seções.

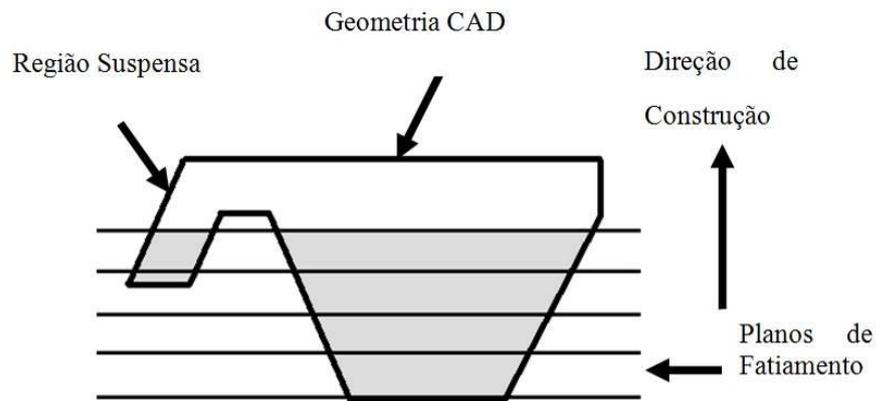


Figura 2.9 – Necessidade de estrutura de suporte em regiões suspensas (Adaptado de SILVA, 2007).

### 2.3.1 Arquivo SML

Uma vez concluída as etapas de processamento do sólido para o processo de fabricação FDM, deve-se gerar um arquivo SML (*Stratasys Modeling Language*) que será enviado à máquina para construção do protótipo. Este arquivo contém todas as informações necessárias para controlar a máquina, tais como espessura de camada, velocidade de alimentação do filamento, velocidade de deslocamento linear do cabeçote, coordenadas da trajetória do mesmo e comentários.

A configuração de cada camada a ser depositada é realizada por um parâmetro denominado *PD* (*Pause Delay*). Este parâmetro determina para cada nova camada a ser escrita: a espessura de camada, a espessura de *raster* ou de contorno e o tipo de material, suporte ou modelo. A partir destes dados, os parâmetros da linha *PD* são retirados de uma tabela interna ao programa, onde possui as condições de *PD* para cada combinação existente destes fatores. Um exemplo da linha de comando é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Exemplo da linha de comando PD

COMANDO	EXEMPLO	DESCRIÇÃO
PD.08,41;MM;MM0,53;MM006,100;MM-70,175;SR800;AC5		
PD	PD.08,41	O primeiro número é o tempo que a servo bomba funciona antes que o cabeçote se mova. Controla a largura do filamento no início da trajetória. (PD = pause delay) O número 41 refere-se a velocidade angular das polias da servo bomba em rpm para o escoamento inicial.
MM		Limpa informações sobre a largura
MM0,53		Comando de início de extrusão de uma curva. O número, em milésimos de polegada, indica a distância de início da extrusão. O outro número deve ser ímpar (ex 53) e é uma medida de vazão do ABS durante o início da extrusão
MM006,100		$\delta$ é a distância em milésimos de polegada do início da extrusão. O valor 100 indica a nova vazão a partir deste ponto. Esta vazão, denotada por números pares, varia diretamente com a velocidade do cabeçote. É medida em rpm/(in/sec), onde in/sec é a veloc. do cabeçote, e rpm a veloc. angular das polias extrusoras.
MM-70,175		O número 70 corresponde a distância em milésimos de mm antes do final da curva, a partir da qual a vazão da matéria prima muda. 175 é um número para a vazão (impele o ABS) no final da curva
SR	SR800	Comando que define a velocidade do cabeçote. É dado em milésimos de polegada por segundo.
AC	AC5	É a aceleração do cabeçote, neste caso, 5in/(sec*sec)

## 2.4 Desvio Dimensional na Tecnologia RP

No estudo realizado por KULKARNI e DUTTA (1996), dois fatores que provocam a imprecisão geométrica foram estudados: o efeito escada (*staircase*) e o problema de contenção do material depositado dentro do modelo geométrico do CAD (*containment*). Estes dois fatores estão associados diretamente ao fatiamento do modelo CAD.

O efeito escada ocorre naturalmente nos processos de RP devido à deposição por camadas (Figura 2.10). Este efeito pode ser quantificado considerando a altura de crista (*cusp height*)  $\delta$ . A altura de crista de uma camada de espessura  $L$  pode ser definida pela distância máxima entre o perfil da geometria original do CAD ( $B_{OR}$  na Figura 2.10) e o perfil da geometria resultante de uma peça realizada pelo processo

de manufatura por camada ( $B_{LM}$ ) como mostrado na Figura 2.10 (KULKARNI e DUTTA, 1996).

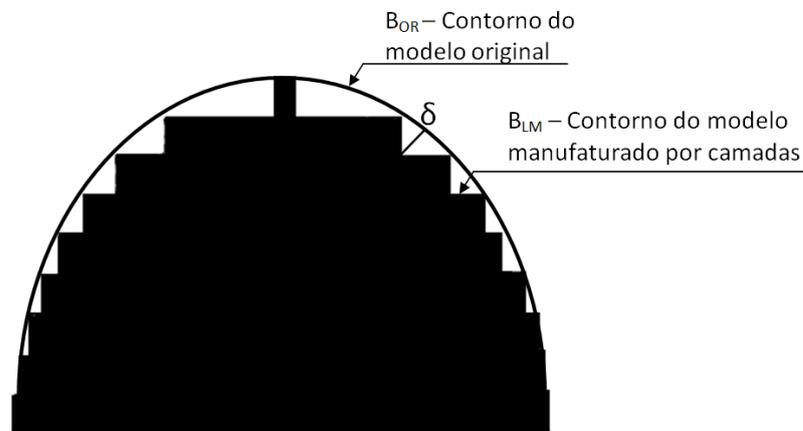


Figura 2.10 - Altura de crista máxima ( $\delta$ ) e efeito escada (KULKARNI e DUTTA, 1996).

O efeito contenção pode ser descrito usando-se os perfis transversais à adição de camadas planas conforme a Figura 2.11. Nesta figura, considera-se que  $S$  seja o perfil 2D gerado pelo modelo CAD, e  $S'$  o perfil transversal aproximado produzido pela construção do modelo por RP. A situação (a) da Figura 2.11 implica em maior quantidade de material para fabricação da peça. Na situação (b), menor quantidade de material é utilizada, obtendo-se uma peça menor que o desejado. A situação (c) gera um desvio em relação à geometria original, pois se a peça sofresse um polimento em sua superfície, a sua geometria final seria alterada, conforme é representada pela situação (d) (KULKARNI e DUTTA, 1996).

Outra fonte de desvio dimensional quando se utiliza a RP é a omissão de geometrias do modelo. Normalmente, áreas planas (paralelas ao sentido de fatiamento) e detalhes (geometrias) tipo picos ou vales, situadas na base e no topo necessitam ser reproduzidos com precisão dimensional. Com a utilização do fatiamento uniforme (detalhado na seção a seguir) não é possível reproduzir algumas geometrias, como mostrado na Figura 2.12.

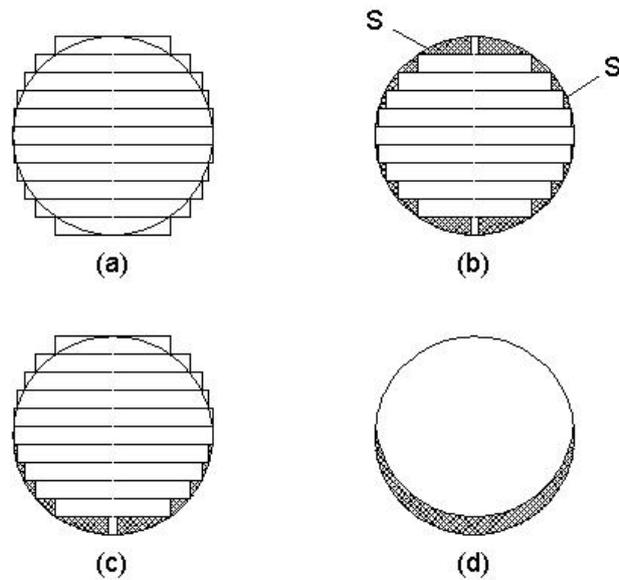


Figura 2.11 - Perfil de uma esfera fabricada por RP ilustrando o efeito contenção (KULKARNI e DUTTA, 1996).

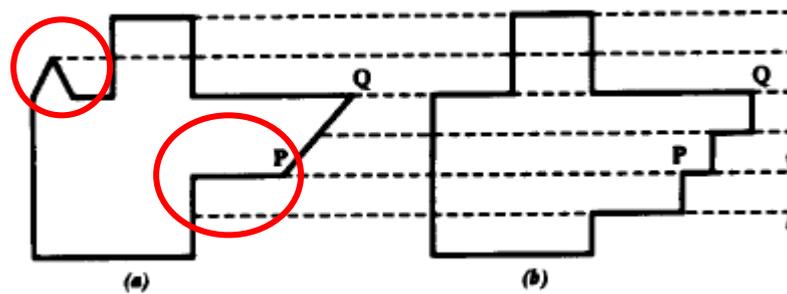


Figura 2.12 – (a) Modelo original; (b) Modelo resultante do fatiamento (DOLENC e MAKELA, 1996).

Através do fatiamento do modelo original, problemas relacionados à perda da geometria são encontrados. Detalhes na base e no topo da geometria, que possuam uma altura inferior à altura da camada, podem ser perdidos. O mesmo problema ocorre durante a reprodução de áreas planas que são omitidas devido as suas alturas estarem entre uma camada e outra, impossibilitando a geração das mesmas (Figura 2.13).

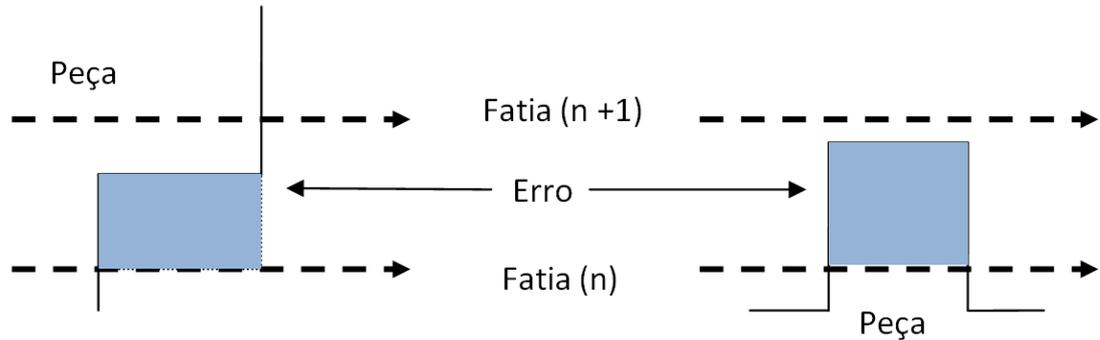


Figura 2.13 – Perda da geometria entre camadas (DOLENC e MAKELA, 1994).

Considerando que o acabamento superficial e o tempo de fabricação do protótipo são fatores determinantes no processo de RP, verifica-se que diversos estudos tem sido realizados com o intuito de otimizar estas características (FRANK e FADEL, 1995).

#### 2.4.1 Estudos Dimensionais na Tecnologia FDM

Na análise realizada por NETO *et. al* (2004), analisou-se o dimensional e o acabamento superficial de peças realizadas pelo processo FDM. Neste estudo evidenciou a tolerância dimensional linear nas três direções principais de fabricação (X, Y e Z) e a rugosidade das peças fabricadas no equipamento FDM 2000.

Através da análise dos resultados obtidos de três protótipos realizados, foi verificado na análise linear, para a faixa de dimensões estudadas (0-40mm), o processo apresenta uma variação de  $\pm 0,18\text{mm}$  nas medidas nominais nas direções X e Y. Para a direção Z a variação encontrada foi dentro da faixa  $\pm 0,25\text{mm}$  (NETO *et. al*, 2004).

De acordo com NETO *et. al* (2004) na análise de rugosidade das peças, as mesmas apresentam superfícies bastante rugosas, sendo que para a confecção de moldes ou modelos para cópia é necessário um pós-processamento para melhorar o acabamento superficial.



### 2.4.2 Métodos de Fatiamento Adaptativo

Uma característica importante da tecnologia de RP é que, a fabricação de um componente independe da sua complexidade geométrica. É igualmente fácil manufaturar um cubo simples ou um objeto complexo limitado por superfícies. A exatidão do objeto manufaturado na direção de construção (Z) é relacionada diretamente a espessuras de suas camadas, ou seja, quanto menor a espessura desta melhor a precisão geométrica do mesmo.

Na manufatura por adição de camada, existe a possibilidade de dois tipos de fatiamento, o uniforme e o adaptativo (Figura 2.15 a e b) (KULKARNI e DUTTA, 1996). O método uniforme ou convencional consiste na obtenção de camadas de espessuras constantes ao longo do eixo Z de construção do protótipo. No caso do fatiamento adaptativo, a espessura das camadas pode variar de acordo com a geometria da região da peça para que se diminua o desvio da geometria CAD.

Os processos atuais de RP comerciais utilizam o fatiamento uniforme do modelo, não considerando detalhes da geometria da peça, como picos, vales e regiões planas, que poderiam ser melhor reproduzidos com um refinamento da espessura local (KULKARNI *et al.*, 1999).

Para se obter um refinamento na espessura de camada, é necessário utilizar uma espessura constante menor em toda a peça, mesmo a peça possuindo regiões em que uma espessura maior atenderia os requisitos de acabamento. Assim, em alguns casos, têm-se protótipos com tempo de produção elevado ou então com baixa precisão dimensional.

De acordo com KULKARNI e DUTTA (1996), o método adaptativo possui três vantagens em relação ao uniforme. Primeiro, a qualidade do acabamento superficial do protótipo é melhorada, em função da diminuição do efeito escada (Figura 2.15b). Segundo, o tempo de construção do protótipo é reduzido, pois em regiões onde não se verifica o efeito escada, é possível utilizar camadas mais espessas, diminuindo assim, o número de camadas necessárias na fabricação. Terceiro, com a redução do efeito escada há a possibilidade também de se ter uma melhor precisão geométrica e dimensional no protótipo fabricado.

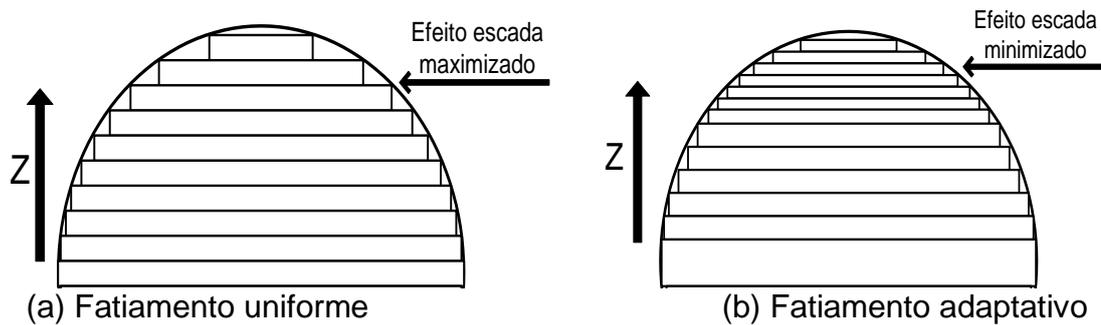


Figura 2.15 – Representação esquemática dos tipos de fatiamento.

### 2.4.3 Métodos de Fatiamento Adaptativo Baseado em Modelo STL

Para DOLENC e MAKELA (1994), o problema da manufatura por camada é obter um protótipo com uma boa precisão geométrica e com um bom acabamento superficial. Para contornar tal problema, os autores desenvolveram um método que identifica em quais regiões é necessário o fatiamento adaptativo. O método desenvolvido se aplica ao modelo CAD 3D, no formato STL.

No método proposto, o modelo STL é fatiado iniciando na sua base até o seu topo. Para a determinação do desvio da geometria, *i.e.* altura de crista, denominada de  $c$  (equivalente ao  $\delta$  utilizado no trabalho de KULKARNI e DUTTA, (1996), Figura 2.10), é utilizado o desvio máximo permitido  $C_{máx}$ , sendo este especificado pelo usuário. De acordo com a superfície sendo fatiada a variável  $c$  determinará quando será necessário o fatiamento adaptativo. Tendo-se uma primeira fatia, a altura  $l$  da próxima camada pode ser estimada utilizando o ângulo da normal obtida da faceta (do triângulo STL) no ponto  $P$ , referente ao plano horizontal. Este ponto  $P$  é gerado pela intersecção do plano que fatia a peça horizontalmente com a faceta gerada pelo STL (Figura 2.16).

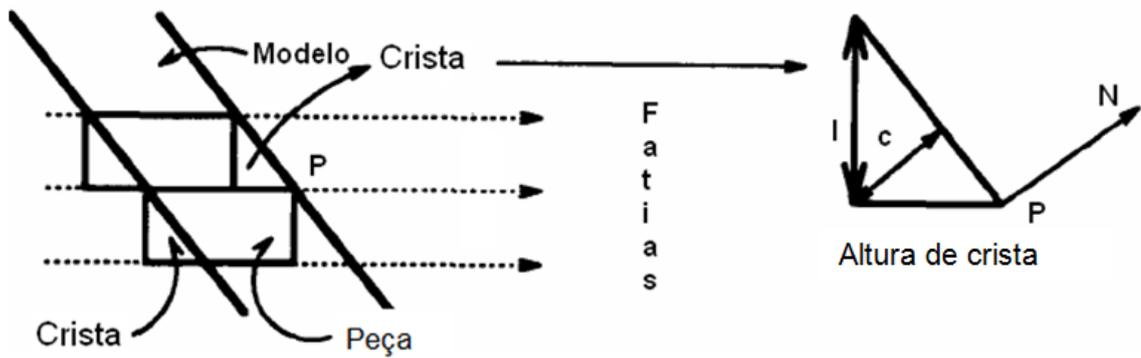


Figura 2.16 - Efeito escada e o desvio da geometria  $c$  (DOLENC e MAKELA, 1994).

Considerando que  $N=(N_x, N_y, N_z)$  é o vetor normal da faceta mais próxima, então tem-se a Equação 2.1.

$$C=cN \tag{Eq.(2.1)}$$

Que deve satisfazer condição apresentada na Equação 2.2.

$$\|C\|_2=c \leq C_{m\acute{a}x} \tag{Eq.(2.2)}$$

Sendo que  $C$  é o desvio permitido e  $c$  a altura de crista dada pela normal do triângulo pertencente ao modelo facetado.

Desde que  $C_{m\acute{a}x}$  seja dado, os cálculos são simplificados como mostrado na Equação 2.3.

$$l= C_{m\acute{a}x}/N_z \tag{Eq.(2.3)}$$

Sendo que  $l$  é a altura de camada e  $N_z$  a normal no eixo Z da face do triângulo. Com  $N_z \neq 0$ , pois de outra maneira ter-se-ia  $l=\infty$ .

A espessura estimada a ser escolhida ao longo de uma fatia, ou seja, analisando-se todos os triângulos que interceptam com o plano de fatiamento sendo considerado é o mínimo de  $\{L_{máx}, \min \{\}\}$ , determinado ao longo de todo o contorno da fatia. Valores menores que  $l_{mín}$  podem ser descartados com ressalvas, e  $l$  podem ser determinados por  $l_{mín}$ .

Sendo assim, se  $C$  tiver um valor elevado, acima do valor definido pelo usuário ( $C_{máx}$ ) é necessário realizar o fatiamento adaptativo nesta região, caso contrário o fatiamento uniforme continua e a mesma análise é feita para a camada subsequente.

Deve-se tomar cuidado quando a superfície externa muda sua suavidade abruptamente, como na Figura 2.17. Neste caso, a espessura é recalculada a partir dos dados obtidos da fatia  $n+1$ , resultando na espessura  $l$ , ao invés de  $L$ , onde  $l < L$ . Assim, é criada uma camada  $l$  entre as duas camadas já existentes, possibilitando a intersecção da superfície antes da mudança do ângulo da normal da mesma. Este procedimento pode evitar a degeneração do contorno da geometria, o tornando mais suave.

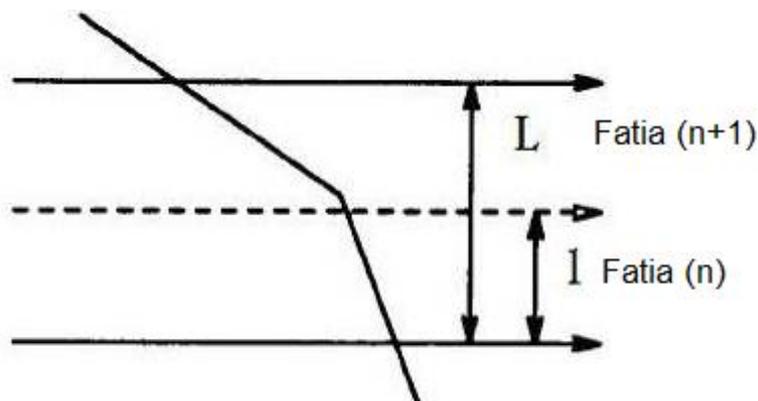


Figura 2.17 - Recuo no fatiamento adaptativo (DOLENC e MAKELA, 1994).

Utilizando como base o método de DOLENC e MAKELA (1994), SABOURIN *et al.* (1996) desenvolveram uma teoria para implementar melhorias no fatiamento adaptativo. Este método diferencia-se do anterior por realizar o fatiamento analisando-o em duas direções; de cima para baixo e de baixo para cima. Com isso

o modelo evita o problema da perda de regiões paralelas à base, encontrado no modelo original de DOLENC e MAKELA (1994).

Segundo SABOURIN *et al.* (1996), o modelo é inicialmente fatiado de maneira uniforme na espessura máxima permitida pelo programa ou processo. A partir deste pré-fatiamento são geradas subdivisões em cada camada, possibilitando uma maior precisão do fatiamento adaptativo e evitando a perda de características geométricas.

SABOURIN *et al.* (1996) apresentam uma teoria na qual a partir das normais do ponto  $P$ , obtidas na base e no topo da camada, é possível estipular um número máximo de subdivisões desta camada com uma espessura constante. Este número máximo é dado por  $\alpha_{slab}$  como mostrado na Equação 2.4,

$$\alpha_{slab} = \text{int} \left( \frac{L_{max}}{C_{max}} \max \{ n_{z \text{ base}}, n_{z \text{ topo}} \} \right) \quad \text{Eq.(2.4)}$$

$$\alpha_{slab} \in [1, \alpha_{max}], \alpha_{max} = \text{int} \left( \frac{L_{max}}{L_{min}} \right)$$

na qual  $n_{z \text{ base}}$  e  $n_{z \text{ topo}}$  são as componentes dos vetores normal no eixo Z obtidos a partir da normal  $z$ , equivalentes ao  $Nz$  utilizado por DOLENC e MAKELA (1996), no ponto  $P$  entre a base e o topo de uma camada específica. Obtém-se a altura máxima destas subcamadas  $l$  através da Equação 2.5.

$$l = L_{max} / \alpha_{slab} \quad \text{Eq.(2.5)}$$

Este método definido por SABOURIN *et al.* (1996) foi implementado experimentalmente no equipamento da *Stratasys* FDM 1600. Foi constatada uma redução de 50% no tempo de fabricação, quando comparado com um protótipo realizado com um refinamento maior.

Partindo desta teoria de subdivisão das camadas, SABOURIN *et al.* (1997) apresentam um método alternativo de fabricação de uma peça que possibilita uma

manufatura com um tempo reduzido, mantendo-se a qualidade superficial da peça. Este novo método consiste em dividir o modelo em duas partes básicas: interna e externa. Na primeira aplica-se a máxima altura de camada  $L$ , determinada pelo equipamento, e na segunda, um refinamento das camadas, compostas por subdivisões da altura interna. Nesta proposta as alturas das camadas externas,  $l$ , são proporcionais à altura máxima da camada interna (Figura 2.18).

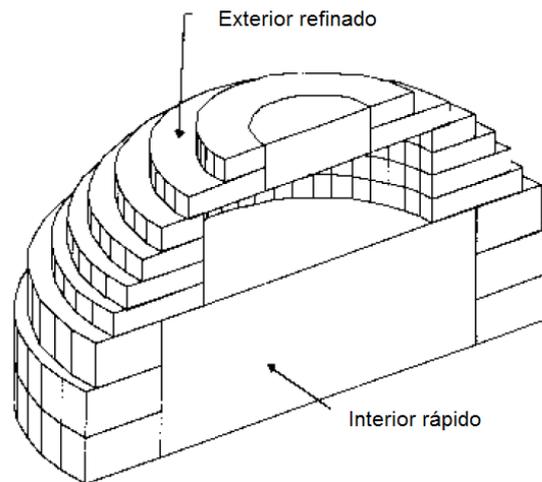


Figura 2.18 - Manufatura com interior rápido e exterior refinado (SABOURIN *et al.*, 1997).

Neste método, para se identificar a geometria da parte interna, o modelo 3D é fatiado utilizando-se a máxima espessura de camada permitida pelo processo. A partir disto, geram-se dois perfis 2D sendo um interno e outro externo. Para gerar o perfil interno é realizada a projeção de dois perfis externos de duas camadas adjacentes, fazendo-se então a intersecção dos mesmos. Assim, uma área comum é obtida e utilizada para a geração de um perfil equidistante (*offset*) interno da peça. Com isso os contornos ficam divididos em externo e interno, como mostrado na Figura 2.19.

Após a divisão dos contornos, os mesmos são preenchidos individualmente. Sendo que a parte externa é preenchida primeira, de maneira refinada, e depois a interna, em uma só camada, com a espessura máxima permitida pelo equipamento.

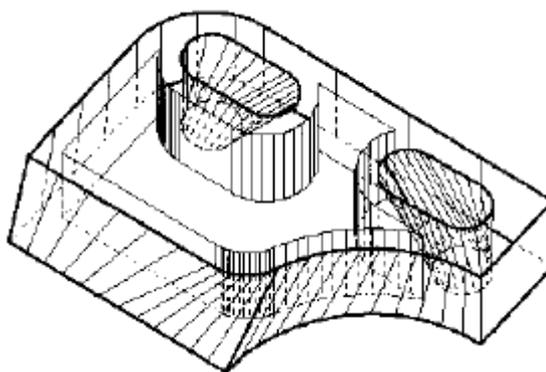


Figura 2.19 - Duas camadas adjacentes subdivididas em contornos externos e internos (SABOURIN *et al.*, 1997).

Através de testes realizados no equipamento FDM 1600 foi verificado uma redução que varia de 50% a 80 % do tempo dispendido anteriormente com um protótipo manufaturado com refinamento uniforme.

Já no estudo realizado por TYBERG e BOHN (1998 e 1999) foi analisado que, quando existe a produção de mais de uma peça ao mesmo tempo, o potencial econômico do tempo no fatiamento adaptativo é reduzido. Como se pode notar na Figura 2.20, onde são mostradas duas geometrias distintas, sendo ambas produzidas com a aplicação do fatiamento adaptativo. Nota-se que na geometria esférica, onde é necessário o fatiamento adaptativo foi reduzido o efeito escada, porém no cubo existe pouca necessidade da utilização do fatiamento adaptativo já que o mesmo possui uma geometria relativamente simples.

Para evitar o desperdício de tempo, com a utilização de camadas refinadas, em geometrias relativamente simples, foi proposta a utilização do fatiamento adaptativo local. Este método consegue gerar geometrias com configurações de fatiamento independentes entre si. Para realizar esta tarefa os modelos em CAD são transformados em STL e posteriormente fatiados em camadas uniformes usando a espessura máxima permitida pelo equipamento utilizado (denominadas pelos autores de “laje”). Na Figura 2.21 é possível observar os contornos resultantes pertencem às fatias do topo ( $U1$  referente à peça 1 e  $U2$  referente à peça 2) e da base ( $L1$  e  $L2$ ) da laje, que são analisados de maneira isolada das demais camadas. Neste estágio, todas as lajes secundárias possuem espessura constante. Finalmente, cada laje secundária é dividida independentemente (peça isolada), se

necessário, em um número distinto de camadas mais finas de acordo com a configuração estabelecida pelo fatiamento adaptativo, obtendo-se um fatiamento adaptativo otimizado para o caso de mais de uma peça (Figura 2.22) (TYBERG e BOHN, 1998, TYBERG e BOHN, 1999). O método utilizado para a realização individual do fatiamento adaptativo foi o mesmo utilizado por DOLENC e MAKELA (1996).

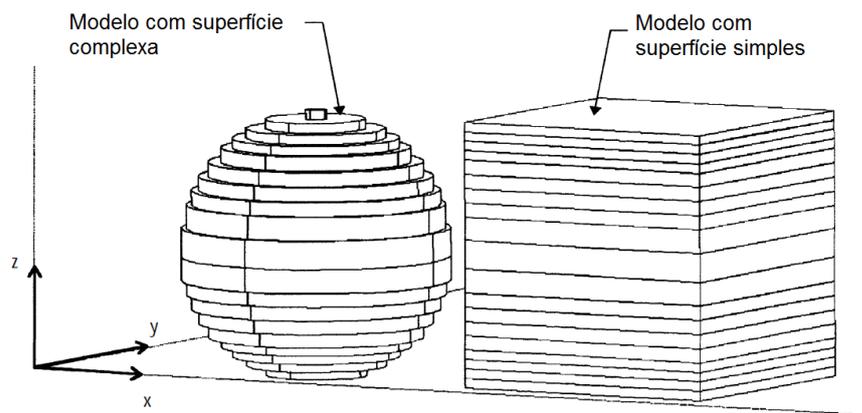


Figura 2.20 – Fatiamento adaptativo em ambas as geometrias realizadas (TYBERG e BOHN, 1998).

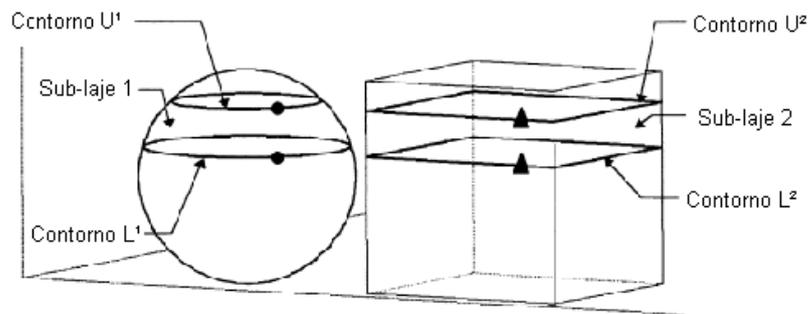


Figura 2.21 – Fatiamento das geometrias em lajes (TYBERG e BOHN, 1998).

O método sugerido por TYBERG e BOHN (1998) também foi aplicado em um equipamento FDM 1600. Foi visto que com a aplicação deste método pode-se reduzir de 17 a 37% do tempo de produção convencional de um protótipo, sendo

que a maior redução é obtida quando mais de uma geometria é produzida ao mesmo tempo.

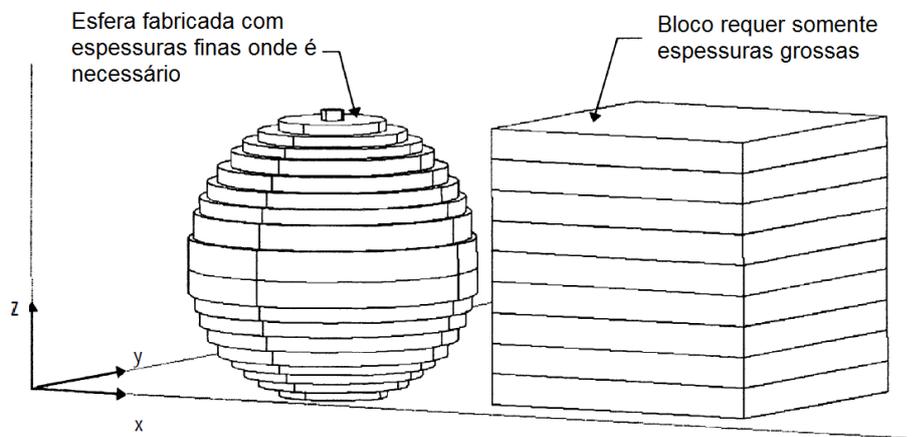


Figura 2.22 - Fatiamento adaptativo aplicado independentemente em uma das geometrias realizadas (TYBERG e BOHN, 1998).

#### 2.4.4 Método de Fatiamento Adaptativo Baseado em Modelo CAD

O método para a detecção do fatiamento adaptativo baseado diretamente no modelo CAD foi denominado de fatiamento adaptativo direto, pois não possui uma etapa de conversão para outro formato específico (CHEN *et al.*, 2001).

Segundo KULKARNI e DUTTA (1996), a partir de um modelo CAD é possível obter o contorno da peça. Através do perfil da geometria a curvatura desta é obtida. Analisando a Figura 2.23 observa-se que após o fatiamento de uma superfície (fatias  $S$  e  $D$ ) o ponto  $P$  de uma superfície é obtido, sendo assim criado um plano tangente à curvatura  $T$ , possuindo uma direção  $xt$ . Considera-se qualquer curva contida na superfície que está tangente à direção  $xt$  no ponto  $P$ . Após este processo, é gerado um plano normal a esta curvatura e ao plano  $T$  conseqüentemente. Em seguida é gerado um plano  $L$ , que contém a normal  $N$  da curvatura. Finalmente, realizando a intersecção do plano  $L$  com a superfície obtêm-se a secção normal  $Ns$  e a curvatura da secção normal é exatamente a curvatura normal da superfície.

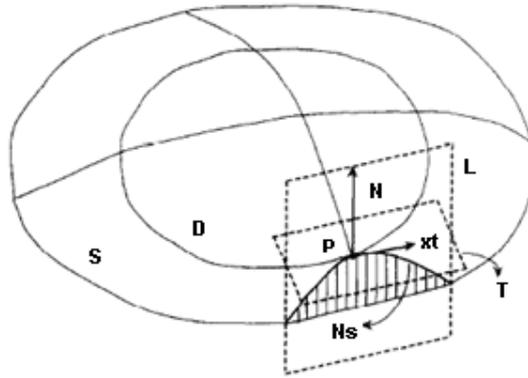


Figura 2.23 - Curvatura normal da superfície (KULKARNI e DUTTA, 1996).

Após a obtenção da normal é possível então a aproximação da secção normal com um círculo (Figura 2.24). Este procedimento ocorre para simplificar o perfil obtido para a medição da máxima camada permitida. Inicialmente, a aproximação circular é determinada partindo-se do ponto  $P$  na superfície. Considera-se que  $N$  é a superfície normal feita horizontalmente do ponto  $P$ , sendo  $\rho$  o raio da curvatura no ponto  $P$ ,  $\delta$  é o desvio da geometria permitido (Figura 2.24).

A partir do ângulo determinado pela normal no ponto é estabelecido em quais regiões será necessário o fatiamento adaptativo.

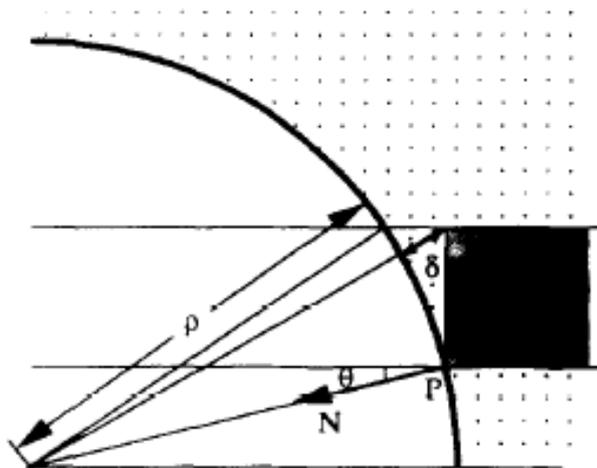


Figura 2.24 – Determinação do desvio da geometria permitido (KULKARNI e DUTTA, 1996).

### 2.4.5 Métodos de Controle de Picos Associado ao Fatiamento Adaptativo

No estudo realizado por DOLENC e MAKELA (1994), foi proposto um método para controlar o problema de picos e vales. Estas regiões têm que ser tratadas de forma independente, pois o método que detecta a necessidade do fatiamento adaptativo, não consegue tratar as mesmas. Desta forma, é possível reproduzir geometrias que possuam uma altura inferior à altura de fatiamento utilizada. Considerando um modelo que não possua vales, e assumindo que este seja fatiado com uma precisão muito grande e seja realizado da base até o topo, tem-se uma camada  $n$  com um contorno  $C(n)$  (Figura 2.25). Se o contorno adjacente ( $C(n+1)$ ) a este se resumir a um ponto ou, se o número de contornos reduzirem, então este será considerado degenerativo. Com isto, tem-se a camada  $n$  e a próxima camada com o contorno degenerativo  $n+1$  que é descartada, pois é realizado um novo fatiamento com uma altura de camada menor (Figura 2.25).

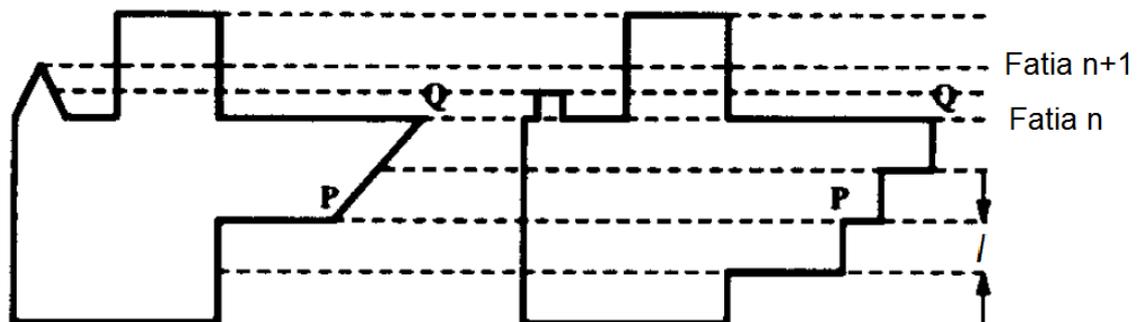


Figura 2.25 – Refinamento de camada em picos (DOLENC e MAKELA, 1994).

Porém, segundo DOLENC e MAKELA (1994), esta teoria apresenta um problema prático quando não é possível detectar o pico, uma vez que a camada pode não possuir um contorno degenerativo, como mostrado na Figura 2.26. Este problema, por não ocorrer com tanta frequência, não é considerado grave pelos autores.

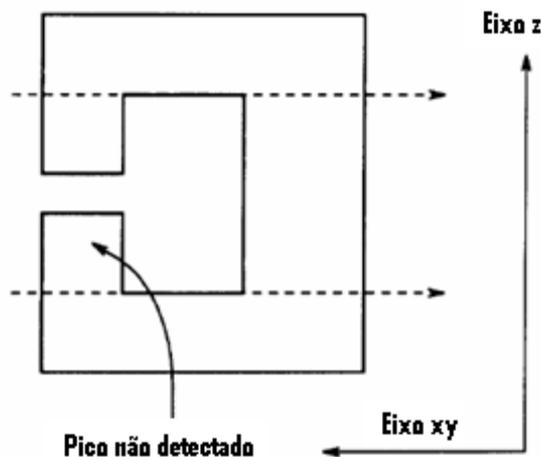


Figura 2.26 - Picos não detectáveis (DOLENC e MAKELA, 1994).

Em outro estudo realizado por ZHOU *et al.* (2004), o controle de picos foi realizado através do comparativo dos números de contornos. Se este número variar de uma camada para outra, então, será detectado um pico. Após a detecção de um pico é realizado um fatiamento refinado nesta região. Neste caso não se detecta a existência de áreas planas, e, no entanto também podem apresentar erros no fatiamento. Segue-se basicamente o princípio do pico, podendo estar entre duas camadas, sendo assim, não detectada pelo processo, gerando uma degeneração ou acréscimo de geometria como foi visto na Figura 2.13.

Para tratar este erro, DOLENC e MAKELA (1994) sugerem um método no qual, primeiramente, as áreas planas são classificadas em áreas positivas e negativas, dependendo da direção de suas normais (Figura 2.27).

A notação  $F+$  e  $F-$  é utilizada para classificar áreas planas positivas e negativas respectivamente, que estão localizadas entre uma camada e a outra. Para exemplificar a proposta, foi considerada uma área plana negativa  $Fj-$  que precisa ser manufaturada precisamente (Figura 2.28a). Para isto, é necessário que se coloque uma camada intermediária entre ela e a próxima camada a ser fatiada. A camada  $Fj-$  será desconsiderada, ficando apenas o contorno  $C$  na camada (Figura 2.28b).

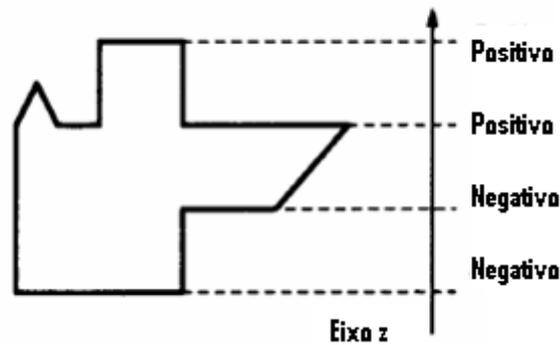


Figura 2.27- Separação das áreas em negativas e positivas segundo suas normais (DOLENC e MAKELA, 1994).

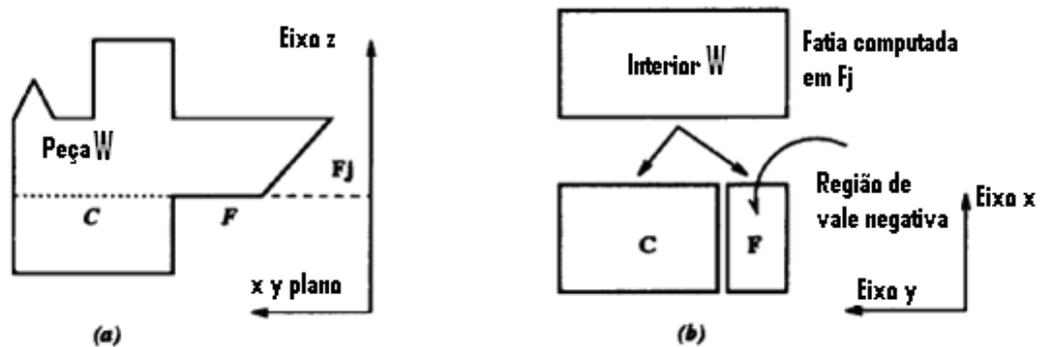


Figura 2.28 - Contornos; (a) vista lateral de uma peça W e uma fatia em  $F_j$ , (b) vista topo do contorno  $F_j$ , dividido em duas partes (DOLENC e MAKELA, 1994).

## 2.5 Aplicativo RP<sup>3</sup>

O processo de manufatura por camadas pode ser dividido em etapas consideradas genéricas e em outras que são específicas de cada tecnologia. São procedimentos gerais de todas as tecnologias de RP: a leitura do arquivo STL, a orientação e escala da peça e o fatiamento do modelo 3D. São eventos específicos, a geração de suporte caso necessário, a geração das estratégias de preenchimento ou processamento da camada e o envio de dados para a máquina de RP.

Atualmente, um sistema de planejamento de processo denominado de RP<sup>3</sup> (*Rapid Prototyping Process Planning*), vem sendo desenvolvido pelo Núcleo de

Prototipagem e Ferramental (NUFER) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) (VOLPATO *et al.*, 2005, VOLPATO, 2006, VOLPATO *et al.*, 2008).

O RP<sup>3</sup> foi idealizado para ser o mais genérico possível, ou seja, não sendo dedicado somente a uma ou a outra tecnologia (Figura 2.29). O primeiro módulo do RP<sup>3</sup> foi desenvolvido para a tecnologia FDM, que utiliza a linguagem SML (*Stratasys Modeling Language*), mas a abordagem adotada permite a utilização e adaptação dos módulos definidos para qualquer outra tecnologia de RP. Atualmente este já possui um módulo definido para a tecnologia SLS (VOLPATO *et al.*, 2008).

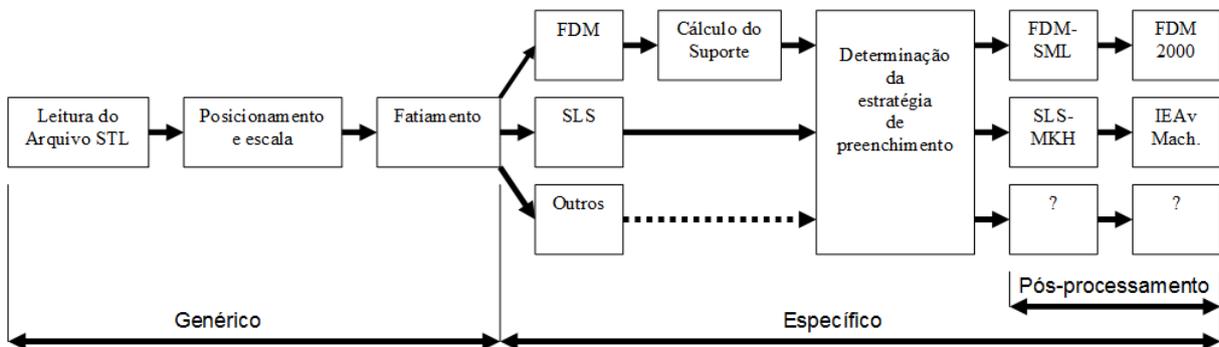


Figura 2.29 - Módulos Genéricos e Específicos do Sistema RP<sup>3</sup> (VOLPATO *et al.*, 2008).

O programa RP<sup>3</sup> vem sendo implementado no compilador Microsoft Visual C++ 6.0®. Os principais objetivos deste projeto são: permitir uma maior autonomia sobre os parâmetros de controle de processos comerciais e servir de base para o desenvolvimento de tecnologia de RP nacional (VOLPATO, 2006).

Apesar de haver alguns módulos a serem desenvolvidos e aprimorados, passos realizados como o fatiamento da peça, identificação de ilhas, refinamento da estratégia de preenchimento, dentre outros, são considerados bastante significativos por contemplarem boa parte do processo utilizado pelos programas proprietários.

Atualmente o programa RP<sup>3</sup> possui somente o módulo de fatiamento uniforme utilizado pelos demais programas proprietários das tecnologias de RP. Neste módulo

de fatiamento não se tem uma condição de fatiamento adaptativo, conseqüentemente, a análise de picos não é realizada no processo.

## 2.6 Discussão

No presente trabalho, foram analisados diversos estudos que apresentam métodos de fatiamento adaptativo e possíveis melhorias nos mesmos. Observou-se que o método utilizado por DOLENC e MAKELA (1994) serviu como base para os demais autores para a identificação das regiões que necessitam de refinamento de camadas. Este método utiliza modelos 3D no formato STL, sendo a base do algoritmo a utilização das normais dos triângulos. Com este é possível detectar regiões que necessitem do fatiamento adaptativo de maneira simplificada. O tratamento de picos, vales e áreas planas também foram vistos como melhorias no processo de fatiamento adaptativo. Algumas melhorias foram propostas em diversos estudos subseqüentes, como por exemplo, o de gerar um preenchimento interno com espessura de camada maior e um da superfície mais refinada, para diminuir o tempo e melhorar o acabamento superficial. Outro estudo propôs uma melhoria no caso de se fabricar mais de uma peça por vez na máquina, com o fatiamento por componente.

Apesar de ser possível a implementação do fatiamento adaptativo direto no modelo nativo CAD, até o momento, a maioria dos processos comerciais utilizam o formato STL, pela simplicidade e confiabilidade na transferência de dados geométricos.

Os testes práticos reportados foram realizados em equipamento da família FDM e assim, reforça a idéia de utilizar esta tecnologia para validar o modelo a ser proposto. Foi visto que, através das modificações dos parâmetros dos processos é possível reduzir o tempo de manufatura, em alguns casos, em aproximadamente 80% do tempo convencional de produção.

O programa RP<sup>3</sup>, por estar em desenvolvimento, permite a implementação de módulos com maior facilidade. Considerando que o presente programa ainda não

possui em seu módulo de fatiamento, a condição de fatiamento adaptativo e nem de controle de picos e vales, abre-se então uma oportunidade de implantação do mesmo. Assumindo que a tecnologia FDM aceita a manufatura de maneira adaptativa, a validação do módulo implementado no RP<sup>3</sup> pode ser realizada, viabilizando a verificação das condições de fatiamento adaptativo.

É importante ressaltar que nos casos estudados, quando comparado com uma geometria realizada no processo uniforme com o maior refinamento do processo, o acabamento superficial e a integridade da peça foram mantidos após a aplicação do fatiamento adaptativo. Esta condição reforça ainda mais a viabilidade da implementação do algoritmo proposto no presente trabalho.

### 3 MODELO PROPOSTO DE FATIAMENTO ADAPTATIVO

Neste capítulo é apresentado o modelo proposto para a realização do fatiamento adaptativo em processo de RP. Neste modelo são realizadas duas análises: a realizada a partir da inclinação da superfície e a que verifica a existência de picos e vales. Também são demonstradas, de maneira detalhada, as etapas que foram utilizadas para a implementação do algoritmo no programa RP<sup>3</sup>, assim como o processo de reconhecimento de regiões que necessitam do fatiamento adaptativo. Além disto, é visto a implementação e condições de aplicabilidade do teorema de picos, localizando estas etapas no programa de planejamento de processo RP<sup>3</sup>.

#### 3.1 Determinações da espessura da camada

Considerando  $l$  como a espessura de camada a ser utilizada com fatiamento uniforme, o processo pode variá-la de acordo com os limites de camada permitidos pela tecnologia em questão. Sendo assim, tem-se, como apresentado no Capítulo 2, o  $l_{min}$  e  $l_{máx}$ , que são, respectivamente, a camada menor e maior permitidas pelo sistema. Tendo essas variáveis do processo, em um fatiamento uniforme convencional do programa proprietário, tem-se a condição onde o valor de  $l$  está entre o valor máximo e mínimo, mantendo-se constante ao longo da peça.

Esta condição ocorre, devido à necessidade de se utilizar a mesma espessura ao longo da geometria, podendo ser esta mínima, máxima ou qualquer valor entre estes limites. Para o fatiamento uniforme pode-se utilizar somente uma espessura durante a criação do modelo, a espessa (Figura 3.1a) ou refinada (Figura 3.1b).

Na condição na qual o fatiamento é realizado de maneira adaptativa, observa-se uma variação de uma espessura mínima até a máxima permitida pelo sistema, podendo conter espessuras de camada intermediárias. Neste caso, é possível a utilização das espessuras variáveis de maneira conjugada (Equação 3.1).

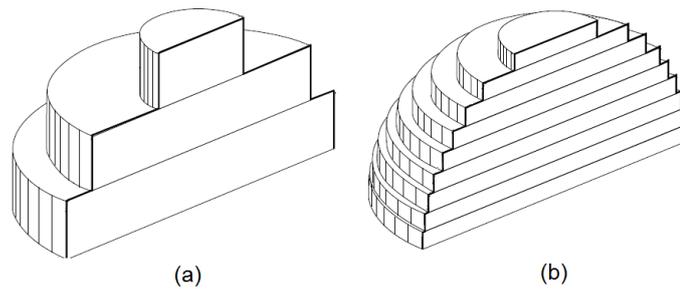


Figura 3.1 – Fatias espessas (a) e refinadas (b).

$$l_{min} < l \leq l_{max}$$

Eq.(3.1)

### 3.2 Modelo de Fatiamento Adaptativo

No modelo do fatiamento adaptativo foram consideradas duas análises principais para o refinamento da camada: a inclinação da superfície e o controle de picos e vales. A primeira foi realizada priorizando-se a localização de regiões que necessitassem do fatiamento adaptativo, como superfícies inclinadas que favorecem o efeito escada. Na segunda etapa do algoritmo teve-se por objetivo o reconhecimento de regiões planas ou de picos, para o refinamento das mesmas.

O processo de fatiamento uniforme de um arquivo STL (*Standard Tecelation Language*) é feito basicamente por três etapas no sistema RP<sup>3</sup>: criação das fatias, intersecção da fatia com a malha de triângulos e determinação do sentido (horário ou anti-horário) dos contornos gerados pela intersecção (Figura 3.2).

Na primeira etapa todas as fatias do modelo são geradas de maneira eqüidistantes, sendo que o espaçamento entre elas pode variar de acordo com as espessuras delimitadas pela tecnologia de RP. Em seguida, para cada fatia cria-se um plano que é interceptado pela malha de triângulos do modelo STL na altura correspondente (Figura 3.2). Após estas intersecções feitas, cada fatia (ou camada) passa a representar uma secção da peça na sua altura correspondente.

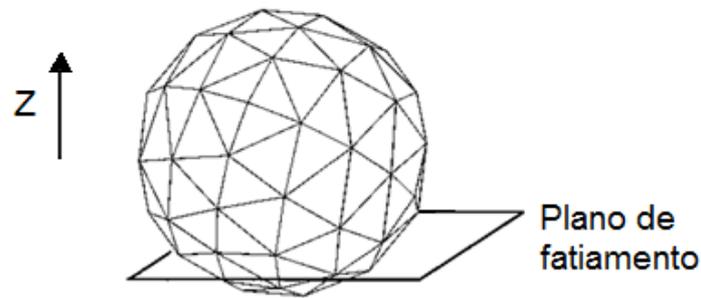


Figura 3.2 – Intersecção do plano de fatiamento com a malha STL (Tata *et al.*,1998).

O último passo é determinar o sentido (horário ou anti-horário) dos contornos gerados pelas intersecções. Esta determinação vai diferenciar contornos internos (ilhas) e externos da geometria a ser construída, estabelecendo as regiões onde existe a necessidade de preenchimento do material das que não necessitam (Figura 3.3).

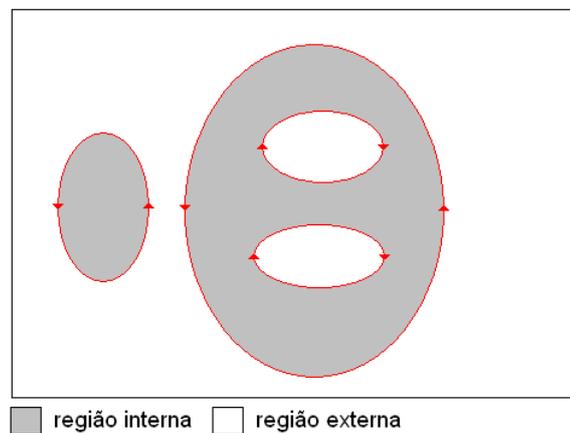


Figura 3.3 – Diferenciação de contornos internos e externos.

Para regiões externas tem-se a leitura dos pontos que compõe o contorno no sentido anti-horário e para contornos internos no sentido horário.

O algoritmo implementado para realizar o fatiamento adaptativo no  $RP^3$  se diferencia do algoritmo convencional de fatiamento na etapa de criação das fatias.

Enquanto no modo convencional todas as camadas da peça possuem uma mesma espessura, no fatiamento adaptativo as camadas podem ter espessuras diferentes.

### 3.2.1 Algoritmo de Fatiamento Adaptativo pela inclinação da superfície

O algoritmo gerado para o reconhecimento de regiões do modelo que necessitem de refinamento, assim como outros encontrados na literatura, também se baseia no princípio de DOLENC e MAKELA (1994). Porém, a análise da necessidade do fatiamento adaptativo é feita diretamente pelo ângulo de inclinação da superfície, enquanto DOLENC e MAKELA (1994) estipularam como determinante o valor do vetor  $\mathbf{c}$  (altura de crista, ou desvio geométrico, dada pela normal) (Figura 2.16).

Como o modelo geométrico que é utilizado no ciclo de RP é o STL, as informações são captadas através da normal de cada triângulo que compõe a malha do mesmo.

Como as normais de cada triângulo são geradas automaticamente quando o modelo é convertido de CAD para STL, pela análise dos triângulos do arquivo é possível saber a inclinação da superfície por meio da coordenada em z do vetor normal de cada triângulo

No algoritmo foi definido que se a inclinação da normal passasse de uma angulação determinada o fatiamento adaptativo seria necessário. Considera-se então  $\alpha$  o ângulo da normal e  $\alpha_{adapt}$  como limite mínimo para a realização do fatiamento adaptativo, como pode ser visualizado na Figura 3.4.

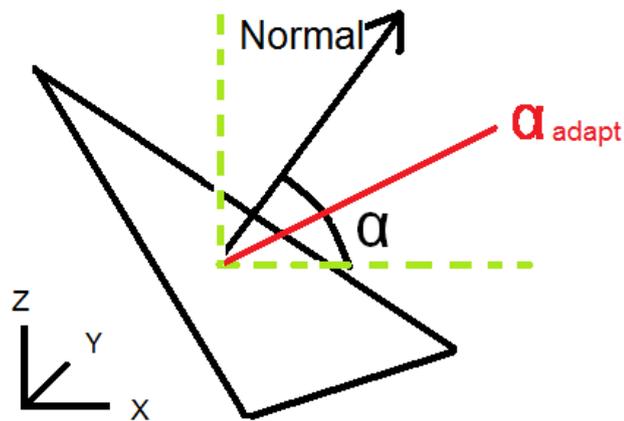


Figura 3.4 – Variação do ângulo para a aplicação do fatiamento adaptativo.

Para a condição de fatiamento adaptativo pela inclinação teríamos a relação mostrada na Equação 3.2.

$$\alpha \geq \alpha_{adapt} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

O valor para  $\alpha_{adapt}$  em graus pode ser determinado pelo operador, sendo assim, o fatiamento só ocorre se o ângulo da normal estiver acima do valor mínimo. O valor do ângulo de  $\alpha_{adapt}$  pode ser modificado pelo usuário de acordo com a necessidade de maior refinamento em uma dada geometria.

Após a determinação da inclinação que viabilizará o fatiamento adaptativo, a criação das camadas é realizada. É nesta etapa que o modelo proposto se diferencia mais do modelo de DOLENC e MAKELA (1994), pois com seu algoritmo o arquivo STL é fatiado inteiro com a maior espessura permitida pelo processo e após esta fase são verificadas as normais dos triângulos. Assim, a cada região detectada para a utilização do fatiamento adaptativo o modelo teria que ser re-fatiado com a espessura máxima novamente.

O modelo genérico do planejamento de processo com fatiamento adaptativo proposto para o RP<sup>3</sup> é mostrado na Figura 3.5.

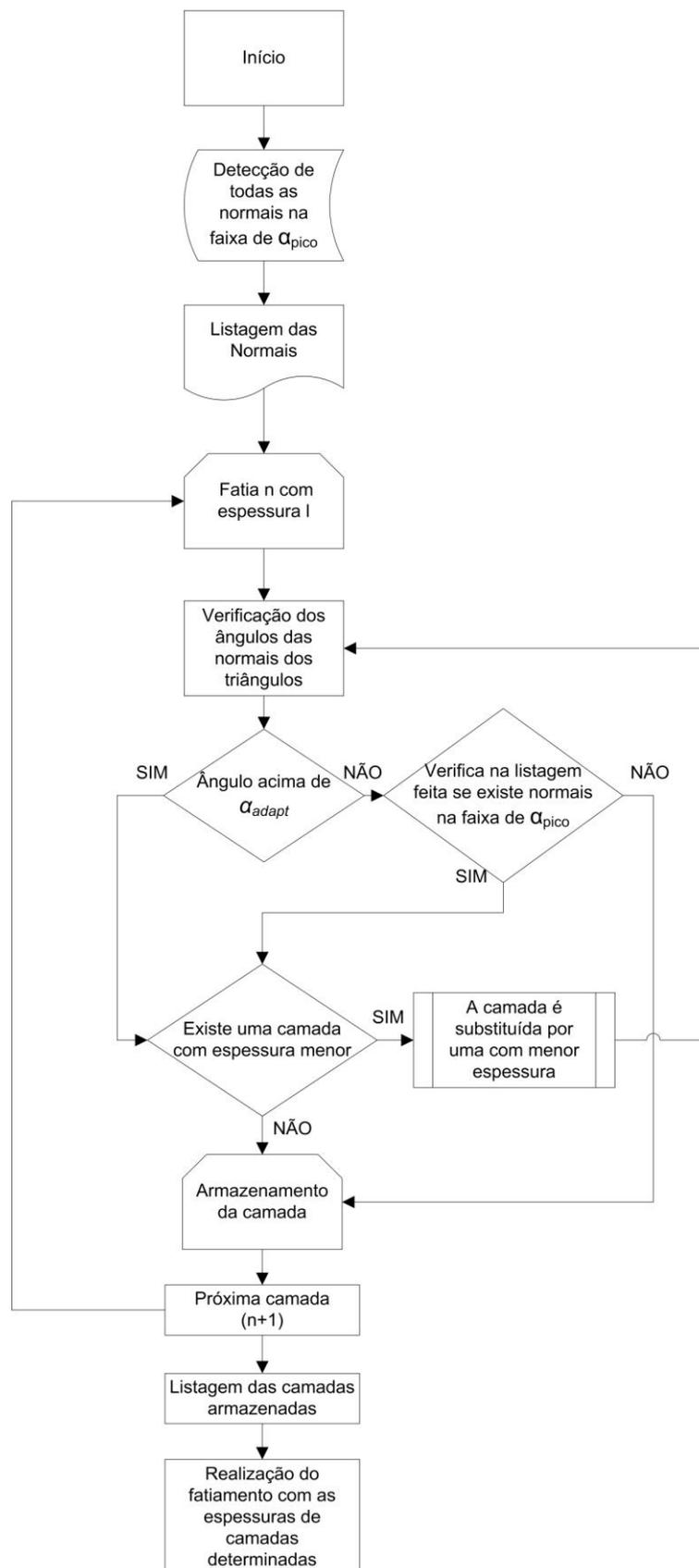


Figura 3.5 – Ciclo de detecção do fatiamento adaptativo por camada.

O algoritmo proposto por este trabalho inicialmente detecta todas as normais que estão na faixa de  $\alpha_{pico}$  que são armazenadas em seguida. Na próxima etapa a camada  $n$  é listada com espessura  $l$  (convencional) e as condições de fatiamento adaptativo são analisadas ( $\alpha_{pico}$  e  $\alpha_{adapt}$ ). Se o fatiamento adaptativo for detectado verifica-se se o processo permite uma espessura menor. Em caso positivo, o modelo substitui a camada  $n$  por uma espessura menor. Substituindo-se esta camada se faz necessário a verificação das condições de fatiamento adaptativo. Este processo se repete até não possuírem camadas com menor espessura permitidas pelo processo.

Após estes passos a camada é armazenada e se passa para a próxima camada. No final do processo todas as camadas armazenadas são listadas e o fatiamento da geometria ocorre com as espessuras determinadas.

O processo do modelo proposto evita o re-fatiamento da geometria, uma vez que o mesmo armazena inicialmente todas as camadas para realizar efetivamente o fatiamento no final do processo.

### 3.2.2 Algoritmo de Fatiamento Adaptativo considerando Controle de Picos

Dentro do ciclo para detecção do fatiamento adaptativo, o primeiro passo realizado é a identificação ou detecção da existência das normais de  $\alpha_{pico}$  como visto na Figura 3.5 Esta definição ocorre diretamente no modelo STL, antes da etapa de simulação (montagem da lista das alturas de camadas) do fatiamento na geometria. O processo realiza uma varredura em todos os triângulos desta geometria, ao encontrar uma normal a  $90^\circ$  ou  $270^\circ$ , coordenadas dos vértices no eixo Z, no modelo, determina a existência de um pico (Figura 3.6).

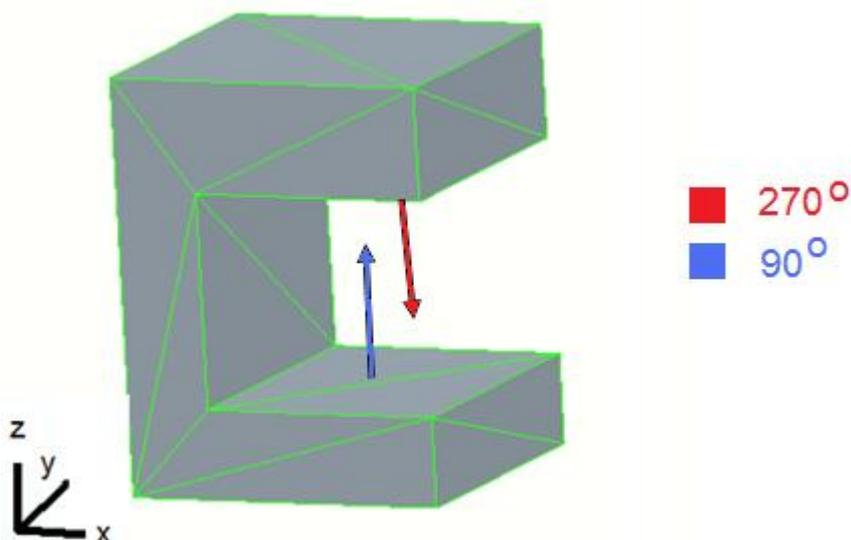


Figura 3.6 – Normais identificadas pelo controle de picos.

Após localizar as normais que atendem a condição de pico, a coordenada deste ponto é armazenada no programa RP<sup>3</sup>. Esta informação só é processada novamente após a análise dos ângulos dos triângulos, que é realizada para a definição do fatiamento adaptativo. Assim, tem-se uma condição de *ou* no processo, sendo que, sempre que é feita a verificação do fatiamento adaptativo pela inclinação da superfície (ângulos. Caso seja necessária esta etapa, não é feita a detecção de picos, uma vez que esta detecção já se faz presente no caso de necessidade do fatiamento adaptativo. Caso contrário, a próxima etapa do processo é a de detecção de picos na geometria (Figura 3.6). Esta condição ocorre para que não haja duas situações de fatiamento adaptativo na mesma camada.

O processo de análise da existência de picos ocorre a cada camada, ou seja, após a etapa de simulação de fatiamento todas as camadas são analisadas de maneira independente, verificando a existência de normais verticais entre a camada anterior e a que está sendo processada na geometria. Este processo garante que todos os picos e vales sejam identificados na peça, independente de estarem ou não contidos no plano que intercepta a geometria (plano de fatiamento).

Através deste processo de detecção pelas normais dos triângulos evita-se a falha no método utilizado por DOLENC e MAKELA (1994), que se utilizava da intersecção do plano de fatiamento com o modelo para localização dos pontos da

análise de picos. Neste caso, quando ocorre a localização de picos ou vales entre a espessura de uma camada, o modelo não consegue identificar esta região para a realização do fatiamento adaptativo.

Como visto no modelo de DOLENC e MAKELA (1994), esta verificação era realizada através da análise de contornos degenerativos, na qual se fazia a análise da área de uma camada para outra (seção 2.4.4). Sendo verificada que a área de um contorno anterior era maior do que a área do contorno atual, o processo confirma a necessidade de fatiamento adaptativo por picos.

### 3.2.3 Implementação no Processo FDM

O algoritmo genérico do fatiamento adaptativo foi implementado no processo FDM de prototipagem rápida. Para esta implementação, variantes do modelo foram inseridas para corresponderem ao planejamento de processo FDM.

O valor de  $\alpha_{adapt}$  foi configurado para 45 graus e o  $\alpha_{pico}$  para 90 graus, ambos com uma faixa de variação de  $10^{-3}$  mm da componente em Z que compõe este ângulo. As espessuras de  $l_{min}$  e  $L_{max}$  foram configuradas para serem respectivamente 0,178 e 0,254 permitidas pelo bico de extrusão do processo (T12).

A partir das configurações realizadas no modelo para o processo FDM, o arquivo SML (*Stratasys Modeling Language*) escrito, para realização do planejamento da geometria foi modificado. A principal modificação deste arquivo foi na variante *PD*, pois, como visto no Capítulo 2, controla, dentre outras variantes, a alturas de camadas do processo. Com isso o *PD* para preenchimento de *raster* e contorno variou para as duas espessuras de camadas permitidas pelo processo FDM.

## 4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo são apresentados os estudos de caso realizados para a validação do modelo do fatiamento adaptativo proposto. Dentre estes testes estão presentes a verificação das regiões de fatiamento adaptativo por ângulo da superfície e picos. Foram sugeridas geometrias para estas verificações e realizados protótipos no equipamento FDM 2000. Toda a análise foi realizada de maneira automática pelo programa de planejamento de processo RP<sup>3</sup>.

### 4.1 Contextualização do Estudo de Caso

Este estudo parte do pressuposto, através de estudo previamente realizado pelo autor (LIMA *et al.* 2005), que não existe nenhum impedimento tecnológico no processo FDM para a variação da espessura das camadas durante a construção do protótipo. O equipamento FDM 2000 possibilita o uso de três tipos de bicos calibrados no cabeçote extrusor e cada qual proporciona duas ou mais espessuras diferentes para o filamento, como referido na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tipos de bicos para o equipamento FDM 2000.

	Tipos de bicos		
	T10	T12	T16
Espessuras de camadas (mm)	0,178	0,178	0,254
	0,254	0,254	0,305
	--	--	0,356

A principal diferença entre o bico T10 e T12 é que o primeiro possui uma largura de filamentos menor que o T12, porém as espessuras das camadas que ambos possibilitam é a mesma.

Após a etapa de planejamento do processo, realizado por um programa proprietário da Stratasys, denominado Insight, o arquivo SML (*Stratasys Modeling Language*), no formato texto, é gerado.

Como a troca do bico calibrado não é automática, a peça tem que ser construída do início ao fim com o mesmo bico. Esta consideração é importante quando se pensa em fatiamento adaptativo, pois no caso da FDM, somente as espessuras definidas para cada bico poderiam ser alocadas numa peça. Estes valores foram estabelecidos pelos fabricantes e, certamente, outros valores dentro destas faixas poderiam ser empregados desde que todos os demais parâmetros de controle do processo fossem definidos experimentalmente, o que seria bastante trabalhoso. Neste estudo somente as espessuras pré-definidas foram analisadas.

Para este estudo foram planejadas quatro geometrias de forma a analisar a aplicação do fatiamento adaptativo e a detecção de regiões de picos e vales. Para a primeira peça foram geradas inclinações e arredondamentos que favorecem o fatiamento adaptativo pela inclinação. A segunda peça foi modelada com inclinações e regiões de picos, viabilizando o fatiamento adaptativo por estas duas condições. A terceira geometria foi realizada com um perfil e dimensões aleatórias, com o intuito de se verificar a detecção de regiões de fatiamento adaptativo em uma peça geometricamente mais complexa. O último estudo de caso foi realizado com intuito de verificar o erro dimensional que é gerado no modelo com a utilização do fatiamento adaptativo no RP<sup>3</sup>.

#### **4.2 Estudo de Caso 1 – Fatiamento adaptativo pela inclinação dos triângulos**

O objetivo deste primeiro estudo de caso foi verificar o funcionamento do fatiamento adaptativo aplicado às regiões inclinadas, analisando se estas foram refinadas. A partir desta verificação, torna-se possível visualizar o comportamento dos protótipos durante o processo de manufatura por camadas adaptativas.

### 4.2.1 Geometria do Estudo de Caso 1

Para a realização deste primeiro estudo, foi projetada uma geometria relativamente simples, porém, contendo intencionalmente regiões nas quais se faz necessário a aplicação do fatiamento adaptativo em regiões inclinadas. A geometria foi modelada com superfícies com inclinações entre os valores acima do valor  $\alpha_{adapt}$  (Figura 4.1). O valor limite de  $\alpha$  foi configurado para 45 graus. As geometrias dos estudos de caso podem ser visualizadas, de maneira detalhada, no Apêndice A, que contém os desenhos técnicos das mesmas.

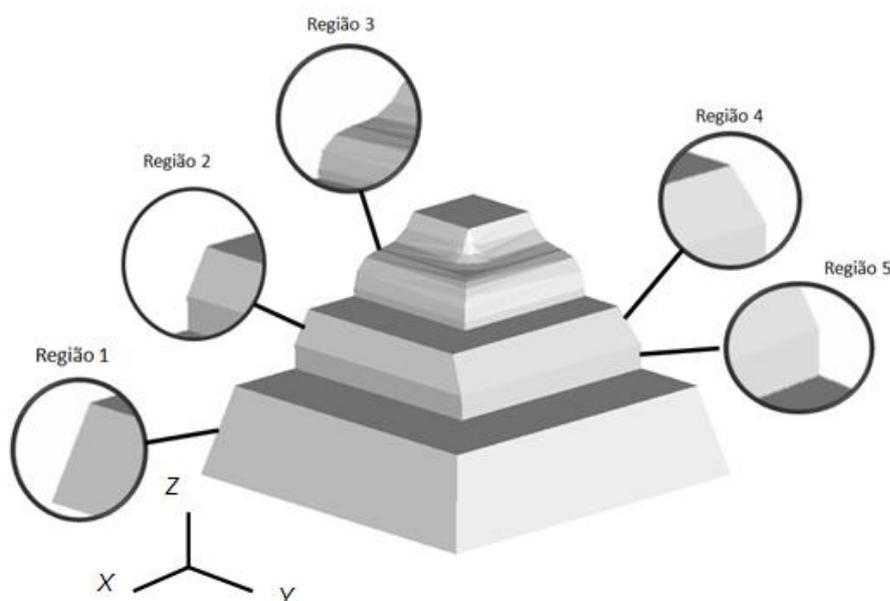


Figura 4.1 – Geometria do primeiro estudo com superfícies inclinadas.

Esta geometria foi realizada com cinco regiões de destaque para a análise da inclinação para o fatiamento adaptativo. Através destas regiões é possível identificar o funcionamento do algoritmo proposto no presente trabalho.

A primeira e a quinta região foram projetadas com uma angulação fora da faixa do fatiamento adaptativo, abaixo de  $\alpha_{adapt}$ , com o objetivo de analisar se a condição

de fatiamento adaptativo, através da inclinação da superfície, estava funcionando de maneira coesa.

A segunda e a quarta região foram modeladas com diferentes angulações, 30 e 60 graus respectivamente, na mesma altura com relação ao eixo Z. Esta condição favorece observação de como o algoritmo analisou todos os triângulos desta faixa de altura para aplicar ou não a condição de fatiamento adaptativo. Tendo-se em vista que se fosse considerada apenas a segunda região (30 graus), na análise, não haveria o refinamento nestas camadas.

Na terceira região foram realizados arredondamentos com intuito de verificar o comportamento o algoritmo em regiões com uma variação maior dos ângulos das normais.

Para este estudo de caso foram analisadas, no microscópio, as regiões apresentadas na geometria, verificando se estas foram refinadas e posteriormente comparando-se com a documentação realizada pelo programa RP<sup>3</sup>. Esta documentação, com o formato .rp3, contém os parâmetros do planejamento de processo da geometria, tais como: espessura de camadas, numeração das camadas, ângulo de preenchimento dentre outros. Para a realização da análise do fatiamento adaptativo foi inserida uma coluna com o valor do ângulo do triângulo com a maior inclinação na faixa de altura da camada analisada.

#### 4.2.2 Recursos Utilizados

A modelagem da geometria utilizada no estudo de caso foi realizada no programa de CAD Pro/Engineer Wildfire 4.0, devido ao conhecimento prévio do autor com a utilização do mesmo e a confiabilidade da ferramenta na parametrização dos modelos.

O modelo foi então convertido para o formato STL (*Standard Tecelation Language*) com uma altura de corda do triângulo de 0.0021 mm e um ângulo de arestas de 0.5mm, fatores que definem a precisão da geometria. Este arquivo foi enviado para o programa de planejamento do processo RP<sup>3</sup>, na orientação

apresentada na Figura 4.1, que processou (fatiou e calculou o preenchimento das camadas) da geometria e gerou o arquivo SML para ao equipamento FDM.

A geometria foi manufaturada pelo equipamento FDM 2000, localizado no laboratório NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental) na instituição UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

Para a prototipagem das geometrias de estudo de caso foi utilizado o bico T12. Este bico possibilita a utilização de duas espessuras de filamentos para a extrusão, como visto na Tabela 4.1. A peça do estudo de caso foi produzida com o material ABS P-400 de coloração branca, uma vez que este é material padrão do equipamento FDM 2000.

Para facilitar a verificação das geometrias no microscópio, depois de produzidas, a peça foi embutida com material resina RP-031 ALC, em um molde de silicone. A partir deste processo pode-se obter uma base plana da face que seria analisada.

Após embutidas, as geometrias foram submetidas a um processo de fresamento para planificação da superfície com o objetivo de visualizar as regiões destacadas nos estudos de caso, mostrado na Figura 4.2. Este processo foi realizado no laboratório NUFER com o centro de usinagem (Roland modelo mdx – 40).

Para a verificação das geometrias no microscópio foi realizado um processo de lixamento com lixas de granulação 600, 800 e 1200. Após o polimento, estas regiões foram analisadas no microscópio. Sendo que esta foi realizada na UTFPR, através do microscópio Microscópio Olympus BX51M em ampliação de 50 vezes, o máximo permitido pelo equipamento.



Figura 4.2 – Superfície ou seção utilizada para a verificação do fatiamento adaptativo.

Na Tabela 4.2 são apresentados os recursos que foram empregados em cada uma das etapas testadas neste estudo de caso.

Tabela 4.2 – Recursos utilizados no estudo de caso 1.

<b>Etapas</b>	<b>Recursos</b>
Projeto da Geometria	Sistema CAD: Pro/E Wildfire 4.0
Conversão para STL	Sistema CAD: Pro/E Wildfire 4.0 (tolerância de 0.0021 mm)
Planejamento do Processo de RP	Planejador de Processo: RP <sup>3</sup>
Fabricação	Equipamento de RP: FDM 2000
Embutimento	Molde de Silicone: Resina (RP- 031 ALC)
Usinagem	Centro de Usinagem Roland modela mdx - 40
Polimento	Lixas com granulações gradativas (600, 800 e 1200)
Verificação	Microscópio Olympus BX51M

### 4.3 Estudo de Caso 2 - Fatiamento adaptativo pela condição de picos

No segundo estudo de caso, o objetivo foi verificar a seleção de regiões de fatiamento adaptativo por inclinações da superfície conjuntamente com a análise de picos e vales. O foco deste estudo foi analisar como a condição *ou* do algoritmo proposto se aplica no processo de construção do protótipo, ou seja, quando se tem as duas condições que determinam o fatiamento adaptativo na mesma camada.

#### 4.3.1 Geometria do Estudo de Caso 2

Para este estudo, foi proposta uma geometria com variações de alturas e inclinações, de maneira a viabilizar o fatiamento adaptativo (Figura 4.3).

Foram modeladas cinco regiões de picos, duas regiões com inclinação acima de  $\alpha_{adapt}$  e uma região com inclinação fora da faixa de fatiamento adaptativo.

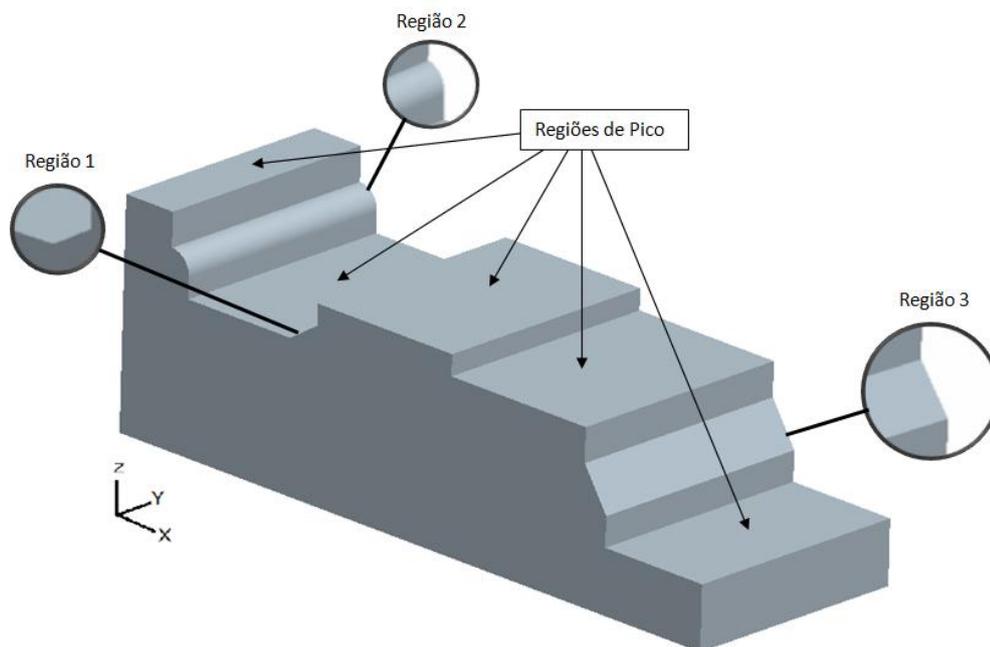


Figura 4.3 – Geometria do estudo de caso de picos e superfícies inclinadas.

Na primeira e na segunda região, foram modeladas geometrias com arredondamento e chanfro respectivamente. As geometrias destas regiões foram projetadas de maneira a ser realizado o fatiamento adaptativo por meio da angulação das superfícies. Estas regiões foram posicionadas ao longo do eixo Z de tal maneira que na mesma faixa de altura tivessem as condições de picos e inclinação a serem detectadas, como mostrado na Figura 4.4.

Para a terceira região foi projetada uma angulação de maneira a não ser utilizado o fatiamento adaptativo. Teve-se como objetivo verificar se, mesmo com duas condições de fatiamento adaptativo existentes na geometria, o algoritmo ainda viabilizaria a condição de fatiamento convencional nesta região.

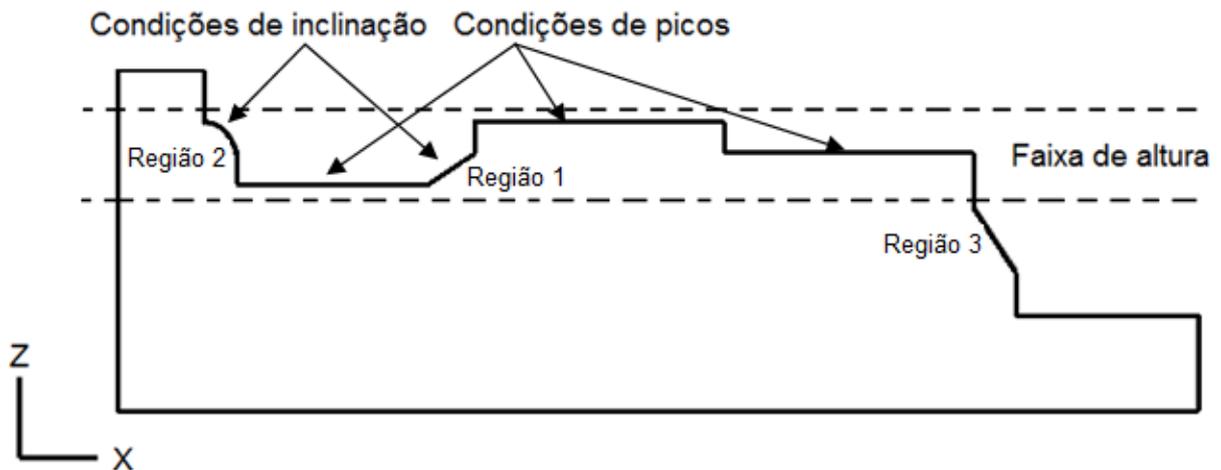


Figura 4.4 – Condições de inclinação e de picos em uma mesma faixa de altura.

Neste segundo estudo de caso a análise foi feita de acordo com o estudo de caso anterior, porém foram verificadas duas condições: a inclinação da superfície e a por picos e vales.

### 4.3.2 Recursos Utilizados

As mesmas etapas do estudo de caso 1 foram utilizadas para a o estudo de caso 2 (Tabela 4.2). Para a usinagem da geometria foi selecionada a face que possibilitasse a melhor visualização do fatiamento adaptativo ao longo da geometria, como apresentado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Superfície ou seção utilizada para a verificação do fatiamento adaptativo.

#### **4.4 Estudo de Caso 3 – Aplicação em geometria real**

No terceiro estudo de caso, teve-se como objetivo utilizar uma peça cuja geometria fosse convencional, ou seja, já utilizada em um projeto existente. Procurou-se selecionar um modelo que possibilitasse a utilização dos dois métodos de detecção do fatiamento adaptativo, pela inclinação, picos e vales, bem como de regiões que necessitaria de fatiamento na parte inferior da mesma. Para que estas condições fossem atendidas, foram adicionados componentes (parafusos) a peça, aumentando o grau de complexidade da geometria.

##### **4.4.1 Geometria do Estudo de Caso 3**

O conjunto montado utilizado neste estudo de caso possui características que abrangem os dois tipos de fatiamento adaptativo (Figura 4.6). As principais características analisadas neste conjunto foram as superfícies com arredondamentos, picos e vales.

Nas regiões 1 e 2, como mostrado na Figura 4.6, encontram-se arredondamentos e picos, com contornos internos e externos. Deste modo, pode-se analisar o comportamento do fatiamento adaptativo em condições de picos em superfícies internas da geometria e em picos com arredondamentos.

Para a região 3 o objetivo foi analisar o comportamento do algoritmo em condições nas quais existam múltiplos arredondamentos ocorrendo em uma mesma altura. Com isso é possível visualizar a aplicação do mesmo em geometrias com um grau de complexidade elevado.

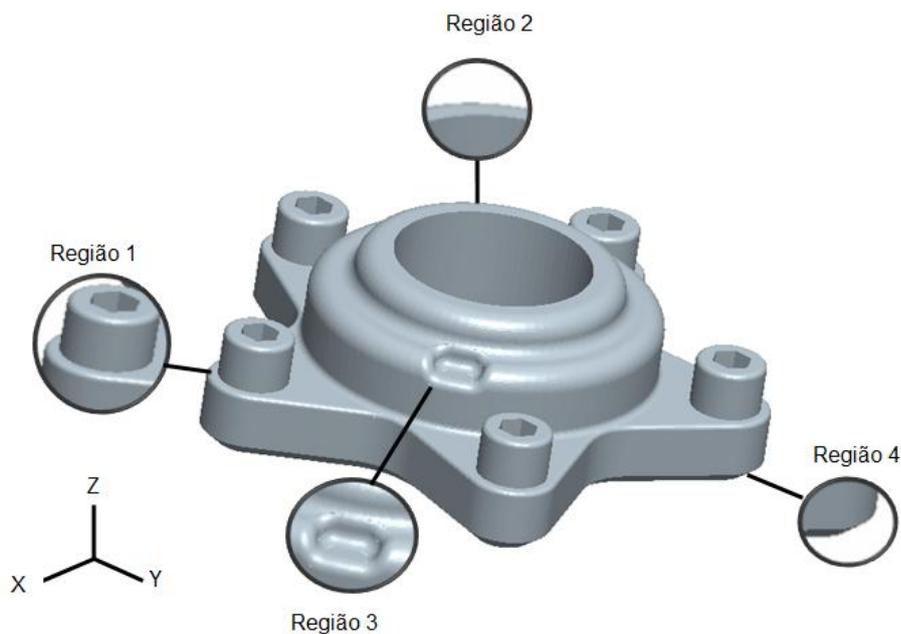


Figura 4.6 – Geometria do estudo de caso real.

Na região 4 o objetivo foi ver como o controle por inclinação atua quando a inclinação é realizada por uma componente negativa em Z.

Neste estudo as etapas realizadas foram até o planejamento do processo para envio da geometria para a tecnologia FDM. Nesta etapa já se pode analisar por meio do RP<sup>3</sup> se o fatiamento adaptativo foi realizado e a localização do mesmo na geometria. A peça não foi efetivamente fabricada, pois o RP<sup>3</sup> ainda não possui o módulo de cálculo de suporte impedindo que regiões suspensas sejam produzidas (VOLPATO *et al.*, 2008).

#### 4.5 Estudo de Caso 4 - Dimensional

O objetivo deste último estudo de caso foi verificar, através de medições da geometria, o erro dimensional existente no processo de fatiamento adaptativo, comparando-o com o processo de fatiamento uniforme. Para isto foi proposta uma geometria em escada para verificação dos erros da geometria em alturas variáveis.

#### 4.5.1 Geometria do Estudo de Caso 4

A geometria utilizada neste estudo foi pensada, de maneira a favorecer a realização do fatiamento adaptativo por picos e vales, como mostrado na Figura 4.7.

Na modelagem foi feita uma escada com cinco alturas determinadas com a seguinte condição: a altura do degrau é dada sempre de maneira a ser composta por um valor múltiplo da camada mais espessa do processo FDM (0.254), mais uma camada de um centésimo de milímetro maior que a camada refinada (0.178) do processo. Por exemplo, a altura do degrau 1 equivale a 1,194mm, sendo composta por quatro camadas de 0,254, uma de 0,178 e 0,01 mm. Esta condição de altura foi aplicada para que sempre que haja o fatiamento por picos o refinamento da última camada intercepte a geometria, obtendo-se uma altura precisa quando realizado o fatiamento adaptativo (Figura 4.8).

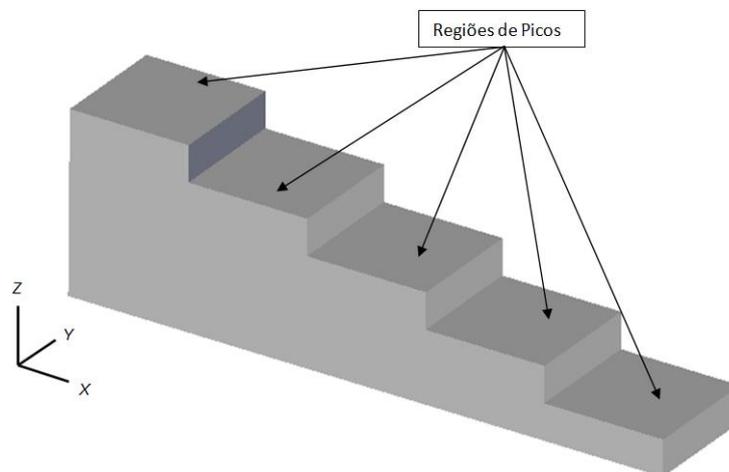


Figura 4.7 – Geometria escada para análise do erro da geometria.

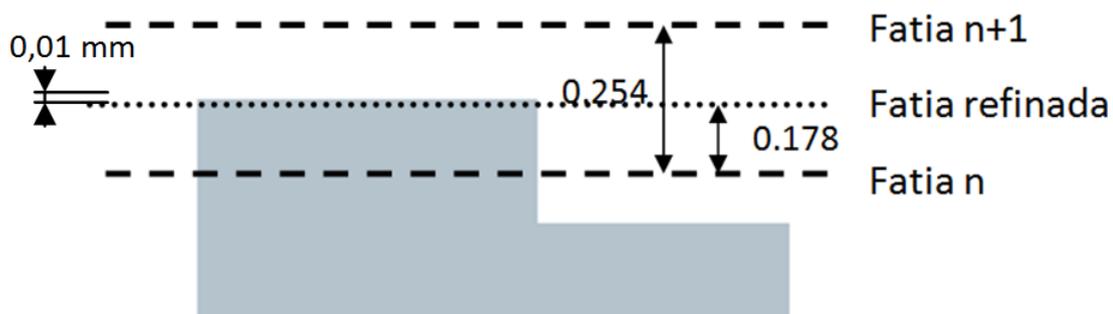


Figura 4.8 – Altura da camada para o fatiamento adaptativo por picos.

#### 4.5.2 Recursos Utilizados

Neste estudo de caso não foi necessário o embutimento e a análise no microscópio, considerando que o objetivo foi obter as dimensões dos degraus da geometria. Foi adicionada a etapa de medição, devido à necessidade de verificação do erro de cada altura proposta realizando medições dos cinco degraus propostos na geometria. Para esta análise utilizou-se um micrômetro Mitutoyo de resolução 0,01 mm. As regiões de picos medidas foram apresentadas na Figura 4.7.

## 5 RESULTADOS

No capítulo anterior foram apresentados quatro estudos de caso para verificar como o algoritmo de fatiamento adaptativo, tanto pela inclinação quanto pela condição de picos e vales, se comportaria em diferentes geometrias e condições. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos que serviram de base para discussões e conclusões deste trabalho. Os resultados são apresentados na mesma seqüência dos estudos de caso.

### 5.1 Estudo de Caso 1 - Fatiamento adaptativo pela inclinação dos triângulos

O arquivo .rp3 gerado pelo programa RP<sup>3</sup> foi utilizado para analisar o resultado do fatiamento, indicando a espessura das camadas ao longo do modelo geométrico. Este documento identifica, para cada camada, características como: número seqüencial das camadas do modelo geométrico, *offset* do contorno, espessura de *raster*, espessura de camada, ângulo de preenchimento e ângulo dos triângulos na camada. O objetivo desta documentação foi apresentar quais camadas da geometria foram adaptadas, podendo-se então comparar a mesma, com a verificação microscópica da peça. A documentação gerada é apresentada de maneira simplificada na Tabela 5.1. O modelo completo da documentação é apresentado no Apêndice B.

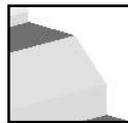
Os dados do arquivo .rp3 que são destacados para o presente trabalho são: a contagem de camadas, a espessura da camada e o ângulo do triângulo que detectou a inclinação para fatiamento adaptativo. Na Tabela 5.1, foram destacadas as camadas no qual o fatiamento adaptativo foi aplicado.

Os resultados demonstram que as regiões 1 e 5 da geometria (Figura 4.1) não foram refinadas mantendo-se a espessura de camada  $L_{m\acute{a}x}$ . Como estas regiões foram modeladas com o objetivo de manter a angulação dos triângulos abaixo de  $\alpha_{adapt}$  o resultado esta coerente com o planejado

Na altura de fatiamento correspondente as regiões 2 e 4, ocorreu o fatiamento adaptativo, mesmo havendo a condição de duas inclinações distintas, abaixo e acima de  $\alpha_{adapt}$ . A região 4 foi refinada devido a sua inclinação estar acima de  $\alpha_{adapt}$ , medindo 45,00 graus. Este resultado está correto e demonstra que a condição para ocorrer o fatiamento adaptativo está se comportando bem nestes casos.

Na região 3 foi visto que toda a faixa da altura entre a camada 44 e 55 foi refinada devido as inclinações dos triângulos estarem acima de  $\alpha_{adapt}$ . Os ângulos para estas camadas ficaram entre 49,64 e 51,03 graus. As camadas posteriores foram realizadas com a espessura  $L_{máx}$ . Como a documentação gerada pelo RP3 realiza o armazenamento do ângulo do triângulo do STL da última camada gerada, eventualmente este ângulo pode estar abaixo de  $\alpha_{adapt}$ .

Tabela 5.1 – Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada.

Região	Altura absoluta em Z (mm)	Camada	Altura de Camada	Ângulo do STL (Graus)
1  5 	0,254	1	0,254	30,00
	...	...	...	...
	6,604	26	0,254	0,00
2  4 	6,782	27	0,178	45,00
	...	...	...	...
	8,384	37	0,178	45,00
Região com espessura constante (0,254mm)	8,638	38	0,254	0,00
	...	...	...	...
	9,654	43	0,254	31,9
3 	9,832	44	0,178	49,64
	...	...	...	...
	11,612	55	0,178	51,03
Região com espessura constante (0,254mm)	11,866	56	0,254	43,20
	...	...	...	...
	14,66	58	0,254	43,20

A Figura 5.1 apresenta a imagem do microscópio com ampliação de 50 vezes, da região 4 demonstrando que houve a construção do protótipo com o fatiamento adaptativo. Para facilitar a análise, foram adicionadas linhas tracejadas que identificam as espessuras teóricas de cada camada.

Através desta é possível visualizar quatro camadas realizadas com o fatiamento uniforme (0,254 mm) e cinco camadas com o fatiamento adaptativo (0,178 mm) sendo estas localizadas na região 4 da geometria.

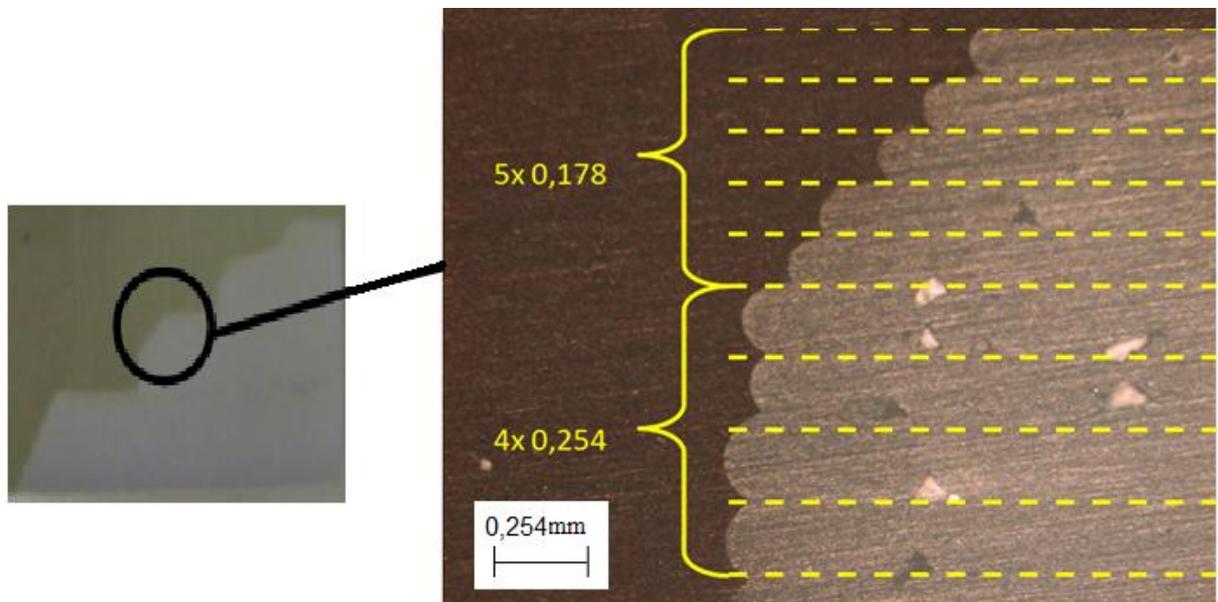
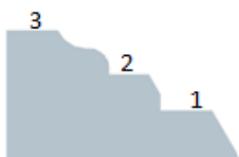


Figura 5.1 – Análise microscópica do estudo de caso 1 na região 4.

Para o comparativo foi gerada a Tabela 5.2 que traz os valores obtidos das cinco medições das alturas dos arquivos dos programas: Insight e RP<sup>3</sup> adaptativo.

Tabela 5.2 – Alturas medidas nos programas de planejamento de processo.

		STL	Insight					Desvio Padrão	RP <sup>3</sup> fatiamento normal					Desvio Padrão
Região	Medição	--	1a	2a	3a	4a	5a		1a	2a	3a	4a	5a	
1	Alturas (mm)	5,080	5,000	4,960	4,480	4,460	5,000	0,284	5,380	5,220	5,280	5,260	5,280	0,059
2		8,520	8,520	8,540	8,560	8,560	8,580	0,023	8,740	8,700	8,760	8,700	8,740	0,027
3		13,630	13,360	13,500	13,280	13,360	13,370	0,079	13,400	13,420	13,420	13,400	13,400	0,011
<b>Geometria</b>														
														

De acordo com o estudo feito por SCHWARZ *et al.* (2009), o refinamento das camadas de suporte pode resultar em uma diminuição do erro da geometria em aproximadamente 0.2 mm na direção Z, direção da adição de camadas. Para efeito de análise, este erro foi subtraído dos erros encontrados no presente estudo transladando a curva de erro pelas alturas de camada, gerando a Figura 5.2.

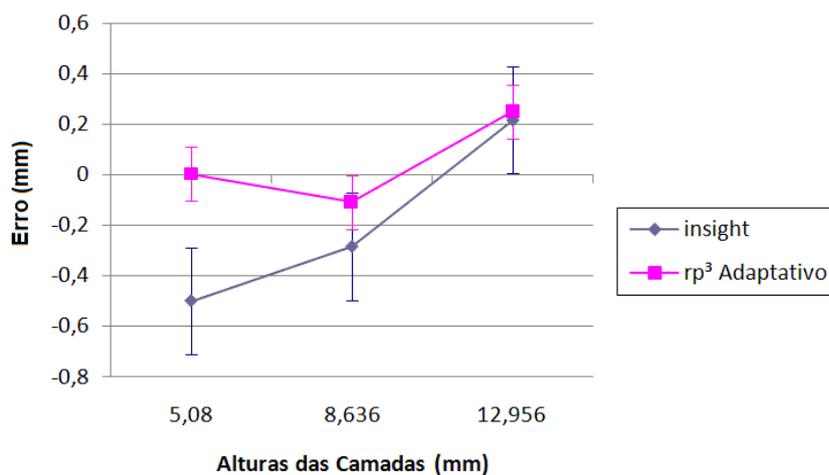


Figura 5.2– Gráfico dos erros dimensionais com a correção aplicada.

### 5.2 Estudo de Caso 2 - Fatiamento adaptativo pela condição de picos

No estudo de caso 2 a mesma sistemática de análise utilizada no estudo anterior foi adotada. A Tabela 5.3 apresenta a listagem simplificada do arquivo .rp3 das camadas com fatiamento uniforme e adaptativo.

A primeira camada adaptada é inserida na primeira detecção de pico que ocorre na geometria, localizada na décima primeira camada. Nota-se que nesta região a angulação é registrada na listagem como a camada refinada, sendo esta a zero grau.

Tabela 5.3 - Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada.

Região	Altura absoluta em Z (mm)	Camada	Altura de Camada	Ângulo do STL
Região com espessura constante (0,254mm)	0,254	1	0,254	0,00
	...	...		
	2,540	10	0,254	0,00
Pico	2,718	11	0,178	0,00
3 	2,972	12	0,254	0,00
	...	...		
	6,020	25	0,254	0,00
1  +2 picos	6,198	26	0,178	47,87
	...	...		
	8,868	30	0,178	47,87
2 	9,122	31	0,254	14,83
	...	...		
	9,630	33	0,254	40,51
Pico	9,808	34	0,178	55,34
Região com espessura constante (0,254mm)	10,062	35	0,254	0,00
	...	...		
	10,824	39	0,254	0,00
Pico	11,002	40	0,178	0,00

A próxima altura, que está presente na região 3, não foi refinada devido à inclinação que foi planejada para a mesma, abaixo de  $\alpha_{adapt}$ .

Para a faixa de altura onde são localizadas as regiões 1 e 2, apenas a primeira foi refinada, juntamente com os picos presentes nesta mesma faixa: camadas de 26 a 30 e a camada 34. Somente uma camada foi refinada pelo programa na região 2, sendo que nesta mesma altura da geometria são encontradas as duas condições de fatiamento adaptativo. Como visto na seção 3.2.1 onde o fluxograma do modelo foi apresentado, somente uma condição de fatiamento é permitida, assim a condição foi aplicada corretamente. Entretanto, atualmente, não foi implementada a condição que identifica qual dos dois tipos de fatiamento adaptativo foi realizado na camada.

A última condição de pico detectada pelo programa se encontra na última camada (40), na qual ocorreu o fatiamento adaptativo por estar no faixa de  $\alpha_{pico}$ .

A Figura 5.3 apresenta a imagem do microscópio com a mesma ampliação do estudo de caso anterior, do último pico da geometria. Para facilitar a análise, foram adicionadas linhas tracejadas que identificam as espessuras teóricas de cada camada.

Através da Figura 5.3 é possível visualizar a condição ocorrida na última detecção de picos da geometria onde seis camadas foram realizadas pelo fatiamento convencional e quando o pico foi detectado o fatiamento com  $l_{min}$  foi realizado.

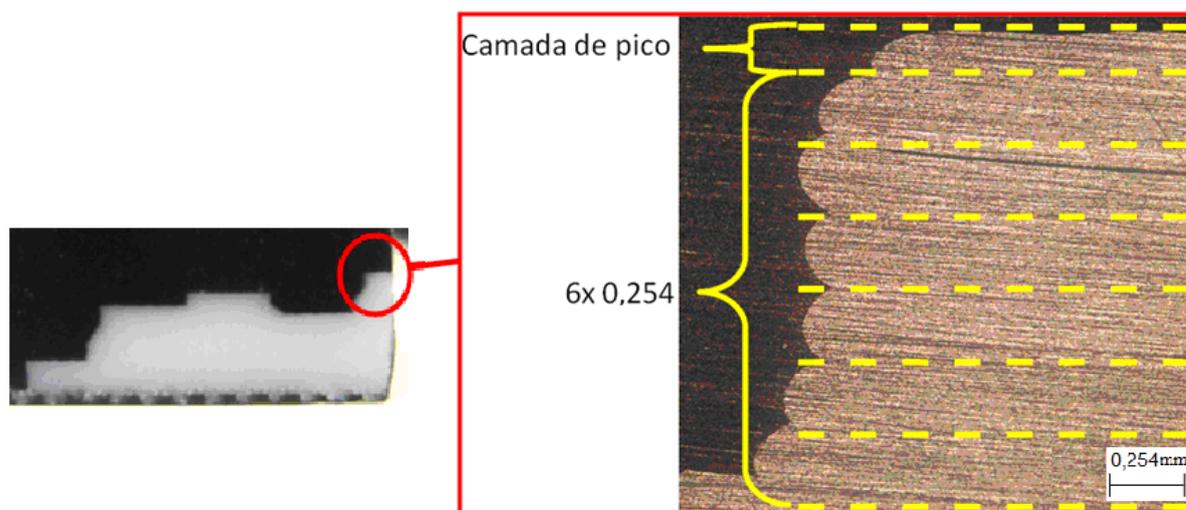


Figura 5.3 – Condição de pico analisado pelo microscópio do último pico.

Para o comparativo foi gerada a Tabela 5.4 que traz os valores obtidos das cinco medições das alturas dos arquivos dos programas: Insight e RP<sup>3</sup> adaptativo.

Tabela 5.4 – Alturas medidas nos programas de planejamento de processo.

Região	Medição	STL	Insight					Desvio Padrão	RP <sup>3</sup> fatiamento normal					Desvio Padrão
		--	1a	2a	3a	4a	5a		1a	2a	3a	4a	5a	
1	Alturas (mm)	2,720	2,820	2,800	2,820	2,800	2,820	0,011	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	0,000
2		7,220	7,360	7,360	7,360	7,360	7,380	0,009	7,400	7,420	7,440	7,400	7,400	0,018
3		8,110	8,140	8,140	8,120	8,120	8,100	0,017	8,300	8,300	8,320	8,300	8,300	0,009
4		6,330	6,360	6,360	6,340	6,340	6,360	0,011	6,500	6,500	6,480	6,500	6,480	0,011
5		9,582	9,900	9,900	9,900	9,900	8,880	0,456	10,000	9,800	9,800	9,800	9,800	0,089

**Geometria**

Para realização do gráfico de erro foi considerado novamente o estudo realizado por SCHWARZ *et al.* (2009), sendo seus erros transladados em 0,2 mm, com apresentado na Figura 5.4.

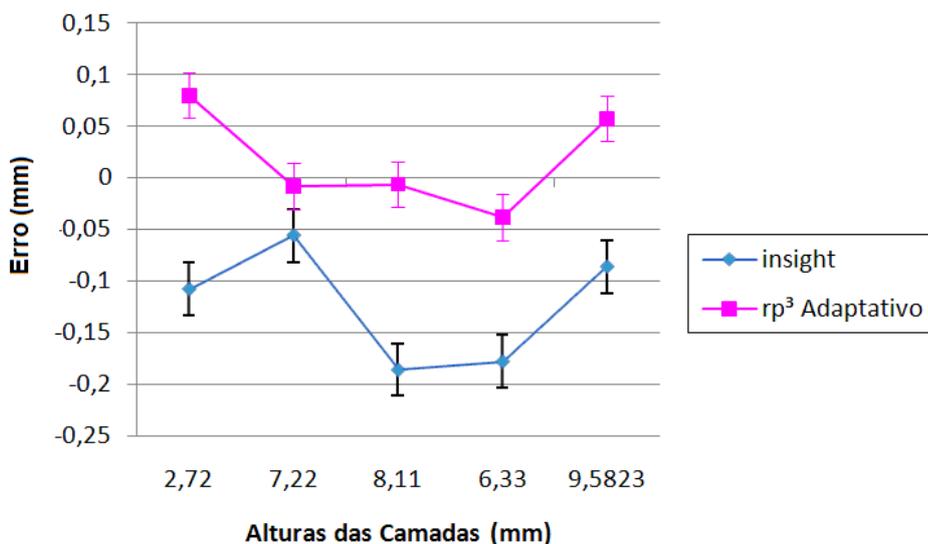
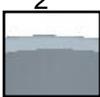
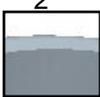


Figura 5.4 – Gráfico dos erros dimensionais com a correção aplicada.

### 5.3 Estudo de Caso 3 – Aplicação em Geometria Real

No estudo de caso 3, as condições de fatiamento adaptativo por inclinação e por picos e vales foram observadas. Assim como para as geometrias anteriores, foi gerada uma tabela, com a análise das camadas deste modelo geométrico, pelo programa planejamento de processo RP<sup>3</sup> (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada.

Região	Altura absoluta em Z	Camada	Altura de Camada	Ângulo do STL
	0,178	1	0,178	5,99
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	1,958	11	0,178	5,99
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	2,212	12	0,254	5,99
	...			
	9,324	41	0,254	56,09
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	9,502	42	0,178	28,48
	...			
	9,858	44	0,178	28,48
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	10,112	45	0,254	4,31
	...			
	13,668	70	0,254	47,58
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	13,846	71	0,178	56,20
	...			
	14,558	76	0,178	35,09
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	14,812	77	0,254	40,97
	...			
	15,320	80	0,254	47,68
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	15,498	81	0,178	47,68
	...			
	16,922	90	0,178	25,18
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	17,176	91	0,254	25,18
	...			
	19,970	103	0,254	40,19
	...			
Região com espessura constante (0,254mm)	20,148	104	0,178	40,19
	...			
	20,86	109	0,178	55,93
	...			

A primeira região na qual foi realizado o fatiamento adaptativo foi a 4, abrangendo da primeira à décima primeira camadas. Isto ocorreu pois a localização do chanfro desta região apresenta a componente Z negativa das facetas que formam o triângulo.

Observa-se, pela Tabela 5.5, que na região 1 do estudo de caso, entre as camadas 42 e 44 ocorreu fatiamento adaptativo. Nesta região encontra-se o primeiro pico da geometria juntamente com uma inclinação dada pelo arredondamento das arestas.

Observou-se que a condição de picos não detectou o pico posicionado no interior dos parafusos apresentados na geometria. Esta condição se deu pelo fato da camada  $I_{min}$  de 0,178mm, não interceptar a camada onde o pico ocorre, (não houve altura suficiente para incluir uma camada  $I_{min}$ ), e sendo assim o programa não realiza o fatiamento adaptativo.

Os próximos fatiamentos adaptativos ocorreram nas camadas 71 a 76 e 81 a 90, abrangidas na região 3, a qual possui múltiplos arredondamentos, verificando-se assim a aplicação adequada do modelo de fatiamento adaptativo em superfícies complexas. A região 3 possui duas regiões de arredondamento, tanto interna quanto externa, por isso esta região aparece duas vezes na Tabela 5.5.

A última condição verificada foi na região 2, que possui a inclinação acima de  $\alpha_{adapt}$  seguido de um pico, apresentado nas camadas 104 a 109 do modelo geométrico.

#### 5.4 Estudo de Caso 4 - Dimensional

Neste último estudo foi realizado um comparativo entre medidas obtidas de uma geometria realizada pelo programa Insight, o RP<sup>3</sup> com fatiamento convencional e o RP<sup>3</sup> com fatiamento adaptativo. O objetivo deste comparativo foi visualizar o erro dimensional nas alturas dos degraus (picos) do protótipo. Para isso o documento .rp3 foi gerado, como mostrado na Tabela 5.6.

Foi observado que todas as regiões onde houve a condição de picos foram fatiadas de maneira adaptativa, sendo localizada nas respectivas camadas: 5, 10, 15, 20 e 25.

Tabela 5.6 - Extrato simplificado do arquivo .rp3 destacando as diferentes espessuras de camada.

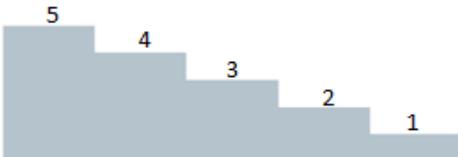
Região	Altura absoluta em Z (mm)	Camada	Altura de Camada	Ângulo do STL
Região com espessura constante (0,254mm)	0,254	1	0,254	0,00
		...		
	1,016	4	0,254	0,00
1º degrau	1,194	5	0,178	0,00
Região com espessura constante (0,254mm)	1,448	6	0,254	0,00
		...		
	2,21	9	0,254	0,00
2º degrau	2,388	10	0,178	0,00
Região com espessura constante (0,254mm)	2,642	11	0,254	0,00
		...		
	3,404	14	0,254	0,00
3º degrau	3,582	15	0,178	0,00
Região com espessura constante (0,254mm)	3,836	16	0,254	0,00
		...		
	4,344	19	0,254	31,49
4º degrau	4,522	20	0,178	31,49
Região com espessura constante (0,254mm)	4,776	21	0,254	31,49
		...		
	5,284	24	0,254	0,00
5º degrau	5,462	25	0,178	0,00

Para o comparativo foi gerada a Tabela 5.7 que traz os valores obtidos das alturas dos arquivos dos programas: Insight, RP3 convencional e RP3 adaptativo.

Observando-se a Tabela 5.7, verifica-se que existe um erro de medida em todas as análises realizadas. A variação destes erros é mostrada na Figura 5.5.

Foram realizadas três medições para cada degrau da geometria em escada para realização de uma média. Para obtenção do erro dimensional, foi feita a diferença entre os valores de alturas dos degraus do modelo STL e as médias obtidas pela medição.

Tabela 5.7 – Alturas medidas nos programas de planejamento de processo.

Região	Medição	STL	Insight			Desvio Padrão	RP <sup>3</sup> fatiamento normal			Desvio Padrão	RP <sup>3</sup> fatiamento adaptativo			Desvio Padrão
		--	1a	2a	3a		1a	2a	3a		1a	2a	3a	
1	Alturas (mm)	1,195	1,390	1,420	1,430	0,021	1,230	1,270	1,225	0,025	1,365	1,390	1,405	0,020
2		2,390	2,420	2,460	2,400	0,031	2,540	2,555	2,525	0,015	2,590	2,540	2,590	0,029
3		3,585	3,690	3,670	3,670	0,012	3,810	3,785	3,800	0,013	3,745	3,710	3,755	0,024
4		4,780	4,940	4,980	4,930	0,026	4,815	4,805	4,765	0,026	4,965	4,940	4,935	0,016
5		5,975	6,220	6,250	6,240	0,015	6,080	6,145	6,120	0,033	6,195	6,225	6,180	0,023
<b>Geometria</b>														
														

Através da Figura 5.5, foi possível verificar que, através do processo de fatiamento adaptativo, a variação do erro foi dentre as análises a que apresentou ter uma faixa de variação menor que os demais processos de fatiamento, ficando em uma faixa de 0,2 mm.

Novamente o estudo de SCHWARZ *et al.* (2009) foi considerado diminuindo o erro da geometria em aproximadamente 0,2 mm na direção Z, direção da adição de camadas como mostrado na Figura 5.6.

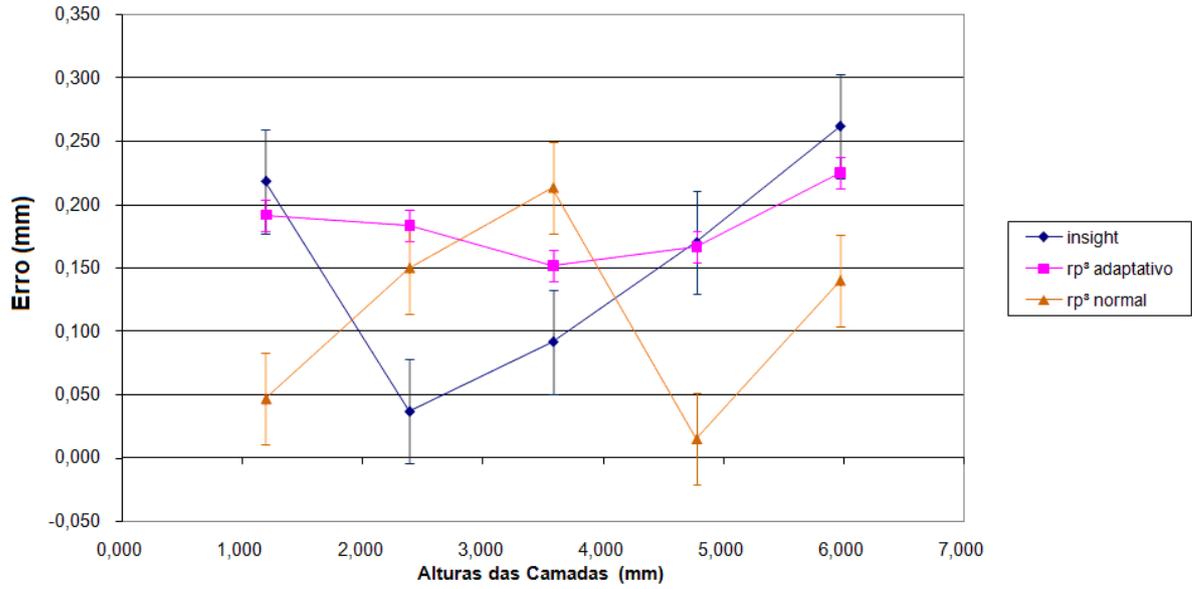


Figura 5.5 – Gráfico do erro do processo na direção Z em função da altura de camada.

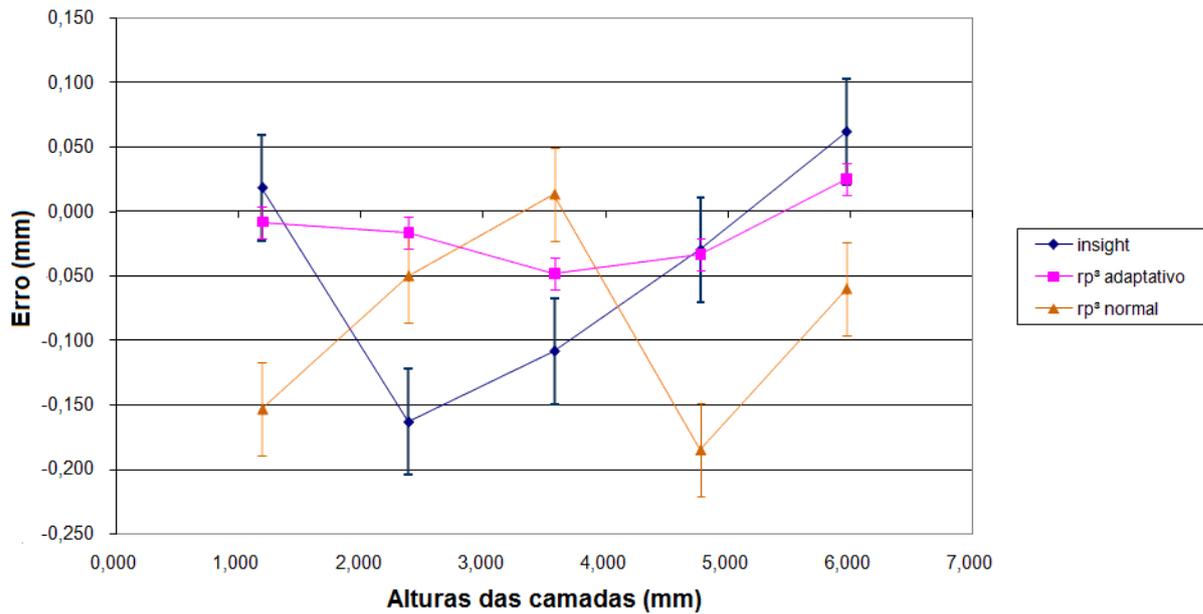


Figura 5.6– Gráfico dos erros dimensionais com a correção aplicada.

Foi verificado que para todos os protótipos realizados que a curva do erro encontrado pela análise de dados realizada a partir do fatiamento adaptativo foi a

que mais se aproximou de zero. Isto demonstra uma real redução do erro nesta direção, caso as recomendações de SCHWARZ *et al.* (2009) sejam observadas.

## 6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados apresentados no capítulo anterior, bem como detalhes do trabalho como um todo. Foram realizadas considerações e conclusões acerca do emprego do modelo de fatiamento adaptativo proposto. Na finalização do capítulo, foram feitas considerações e sugestões para estudos futuros que poderão contribuir para o emprego de fatiamento adaptativo nos processo de RP.

### 6.1 Discussões

O modelo de fatiamento adaptativo proposto no presente trabalho foi implementado no sistema de planejamento de processo RP<sup>3</sup>, o que possibilita a sua adequação para os diversos processos de RP.

No modelo proposto duas condições de fatiamento adaptativo foram geradas: controle de pico e controle por inclinação. Para verificação prática do funcionamento destas condições a implementação para o processo FDM foi realizada.

O presente modelo foi gerado com base no estudo de DOLENC e MAKELA (1994) se diferenciando do mesmo em dois momentos. O primeiro devido às condições de fatiamento adaptativo que são determinadas a partir do ângulo proposto pelo usuário ( $\alpha_{adapt}$ ), sendo que no estudo realizado por DOLENC e MAKELA (1994) esta condição é determinada pelo desvio da geometria. Após a análise da implementação para o processo FDM, foi verificado que para o fatiamento adaptativo com mais de duas camadas a condição determinada pelo desvio da geometria seria mais adequada, pois possibilitaria ao usuário estabelecer qual refinamento utilizar.

A segunda diferença foi obtida pela condição de controle de picos, que, para o presente estudo, foi realizada através da verificação do ângulo de pico ( $\alpha_{pico}$ ) e para DOLENC e MAKELA (1994) a partir de contornos degenerativos.

A partir da implementação foi possível verificar que, através da documentação gerada pelo RP<sup>3</sup>, os resultados após a aplicação das condições de fatiamento adaptativo no processo foram os esperados. Aplicando-se as condições nos estudos de caso foi possível verificar de maneira prática o funcionamento do modelo proposto.

A implementação do modelo em um programa de planejamento de processo foi realizada e a verificação do seu funcionamento para o processo FDM comprovada. Todavia, tal aplicação se deu ao fato do processo possuir duas espessuras de camadas somente. Para processos onde exista a possibilidade de três ou mais espessuras o modelo teria que ser adaptado de maneira que o fatiamento dependesse de um valor do desvio da geometria e não somente do ângulo de inclinação da superfície. Isto ocorre devido ao fato do presente modelo sempre refinar a espessura de camada até que a condição de inclinação ou de pico não seja atendida. Isto leva sempre a escolha do  $I_{min}$  e não de uma camada intermediária que satisfizesse um desvio dimensional proposto pelo operador.

Com o primeiro estudo de caso foi possível verificar que as condições de fatiamento adaptativo, pela inclinação, estavam sendo aplicadas no planejamento de processo do RP<sup>3</sup>. Foi visto que todas as inclinações do modelo geométrico que estavam acima de  $\alpha_{adapt}$  foram detectados pela condição proposta e refinados para a menor espessura permitida pelo processo 0,178 mm ( $I_{min}$ ).

A aplicação do fatiamento adaptativo por picos, onde o ângulo da normal da superfície tivesse como valor 90 graus, podendo oscilar em uma faixa de  $\pm 10^{-6}$  do valor de  $\alpha_{pico}$ , foi realizada no processo RP<sup>3</sup>. Isto foi comprovado no segundo estudo de caso. Neste estudo, foi verificado que na região 2 da geometria foram aplicadas corretamente ambas as condições de fatiamento adaptativo, porém a identificação de qual das duas condições não foi implementada no RP<sup>3</sup>.

A partir da terceira geometria foi possível confirmar a aplicação do fatiamento adaptativo em condições de picos e inclinações acima de  $\alpha_{adapt}$  em geometrias complexas. Analisando-se o caso ocorrido neste estudo de caso foi visto que em regiões onde o refinamento não intercepta o pico listado, a condição de fatiamento adaptativo por picos não é aplicada. A condição de fatiamento adaptativo pela

inclinação, onde exista uma componente em Z negativa, foi identificada e aplicada com sucesso no processo de planejamento da geometria pelo RP<sup>3</sup>.

No último estudo de caso foi observado que ao comparar o processo de fatiamento convencional realizado pelo Insight e pelo RP<sup>3</sup>, com o fatiamento adaptativo RP<sup>3</sup>, este último apresentou menor desvio que os demais. Quando aplicado o estudo realizado por SCHWARZ *et al.* (2009), o erro do fatiamento adaptativo ficou próximo a zero.

A partir dos estudos de caso realizados foi possível comprovar o funcionamento das duas condições de fatiamento adaptativo no processo FDM e uma significativa melhora na precisão dimensional dos protótipos quando fabricados de maneira adaptativa. Entretanto, o tempo de fabricação não foi mensurado para verificar qual foi sua variação na aplicação do fatiamento adaptativo.

O modelo de realização do fatiamento proposto puramente a partir do ângulo da normal do triângulo pode levar a situações indesejadas. Por exemplo, um triângulo pode ser dimensionalmente muito pequeno com relação à geometria de interesse, não justificando o fatiamento adaptativo nesta camada. Poderia ser proposta uma maneira de especificar uma área mínima do triângulo com a normal acima de  $\alpha_{adapt}$ , verificando a viabilidade do fatiamento adaptativo nesta região.

Outro ponto observado é que o RP3 só permite o processamento de um arquivo STL por vez. É possível fabricar mais de uma peça, desde que estas sejam agrupadas em um único arquivo STL.

## 6.2 Conclusões

A análise dos estudos sobre o fatiamento adaptativo permitiu gerar um modelo de fatiamento adaptativo genérico, com algumas diferenças dos modelos existentes, principalmente na detecção de picos, que possibilitou uma condição que contornou o problema encontrado por DOLENC e MAKELA (1994).

O objetivo proposto de criar um modelo de fatiamento adaptativo genérico foi atingido, sendo a sua aplicabilidade comprovado através da implementação no programa RP<sup>3</sup> e da análise dos protótipos manufaturados pelo mesmo.

A adequação deste modelo a um processo específico de RP, no caso do FDM, permitiu aumentar a precisão geométrica das geometrias manufaturadas desta forma. Observou-se através dos resultados dimensionais que houve uma redução significativa do erro da geometria, comparando-se ao processo de fatiamento uniforme.

A implementação do modelo proposto no programa de planejamento de processo foi realizada de forma bastante satisfatória. O sistema RP<sup>3</sup> se mostrou aberto para implementações deste tipo, o que reforça a proposta inicial do mesmo de servir para pesquisa nesta área de planejamento de processo. Apesar de o modelo proposto ter sido testado apenas para uma tecnologia (FDM), este pode ser adaptado e implementado para a outras tecnologias, como por exemplo para o módulo SLS já disponível no RP<sup>3</sup>.

O modelo proposto deve sofrer melhorias. Após a análise dos resultados, pontos puderam ser observados e precisam ser implementados para que o modelo tenha uma melhor resposta.

### **6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros**

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros a serem consideradas para a continuidade desta pesquisa:

- a) Adicionar ao modelo de fatiamento adaptativo proposto um controle pelo desvio da geometria possibilitando verificar a aplicação de camadas intermediárias as mínimas e máximas permitidas pelo processo no processo de fatiamento adaptativo;
- b) Aplicar o modelo de fatiamento adaptativo em modelos com estruturas de suporte em regiões da geometria suspensa;

- c) Verificar a diminuição de tempo entre o fatiamento adaptativo e um modelo refinado realizado pelo método convencional;
- d) Analisar a precisão geométrica e acabamento superficial de forma mais detalhada, através do comparativo entre geometrias geradas: com o fatiamento adaptativo e o uniforme.
- e) Aplicar o fatiamento adaptativo de maneira individualizada em duas geometrias diferentes manufaturadas ao mesmo tempo no processo, semelhante ao estudo realizado por TYBERG e BOHN (1998), discutido na seção 2.4.2.

## **PRODUÇÃO CIENTÍFICA NO PERÍODO (Março 2005 – Março 2009)**

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**, 2009, Belo Horizonte. Anais do V COBEF, v. 1, 2009.

FOGGIATTO, J. A., VOLPATO, N. ; LIMA, M. V. A. de ; FRANCA, G. V. Z. ; DESTEFANI, P., Estudos de Parâmetros da Tecnologia de Prototipagem Rápida FDM para Melhorias no Planejamento de Processo. In: V **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 2009, Belo Horizonte. Anais do V COBEF, v. 1, 2009.

DESTEFANI, P. ; FOGGIATTO, J. A., VOLPATO, N. ; LIMA, M. V. A. de ; FRANCA, G. V. Z. . Estudo da Velocidade do Cabeçote Extrusor da Tecnologia de Prototipagem Rápida FDM. In: SICITE 2008, 2008, Curitiba-PR. Anais do XVIII **Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, 2008. v. 1.

VOLPATO, N. ; FOGGIATTO, J. A., LIMA, M. V. A. de, MANCZAK, Tiago. Uma Otimização da Estratégia de Preenchimento do Processo FDM. In: **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2007, Estância de São Pedro. Anais do Congresso COBEF. São paulo : ABCM, 2007. v. 1.

LIMA, M. V. A. de, VOLPATO, N., Um Estudo Sobre Fatiamento Adaptativo no Processo FDM. In: **Seminário de Iniciação Científica da UTFPR**, Curitiba. Anais do XI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, 2006.

LIMA, M. V. A. de ; FOGGIATTO, J. A. ; VOLPATO, N., Otimização das Trajetórias dos Bicos Extrusores na Construção de Protótipos pela Tecnologia FDM. In: **Seminário de Iniciação Científica da UTFPR**. Curitiba. Anais do XI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, 2006.

ZACHI, F. D. ; LIMA, Marcos Vinicius Alves de ; VOLPATO, N. ; FOGGIATTO, José Aguiomar . Análise do Fator de Contração no Proceso FDM. In: X **Seminário de**

**Iniciação Científica e Tecnológica do CEFET-PR.** Curitiba. Anais do X Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica. Curitiba : CEFET-PR, v. 1. p. 13-16, 2005.

## REFERÊNCIAS

- CARVALHO, J., e VOLPATO, N., Prototipagem Rápida como processo de fabricação, In: **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**, Ed. Volpato, N., Edgar Blucher, São Paulo, p.244, 2007.
- CHEN X., WANG C., YE X., XIAO Y., HUANG S., Direct slicing from powershape models for rapid prototyping. **Advanced Manufacturing Technological**, n.17 p.543-547, 2001.
- CHUA, C. K., LIM, C. S., LEONG, K. F., **Rapid Prototyping - Principles and Applications**. Toh Tuck Link, Singapore, World Scientific Publishing Co., p419, 2003.
- DOLENC A. and MÄKELÄ, I., Slicing procedures for layer manufacturing techniques. **Computer Aided Design**. v.26, n.2, p.119-126, 1994.
- DOLENC, A. and MÄKELÄ, I., Rapid Prototyping from a computer scientist's point of view. **Rapid Prototyping Journal**, v.2, n.2, p.18-25, 1996.
- FRANK, D. and FADEL, G., Expert system based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.6, n.5, p.334–339, 1995.
- GIBSON, I., Software Solutions for Rapid Prototyping, **London: Professional Engineering Publishing**, v.3, n.3, p.380, 2002.
- JACOB, G. G. K., Development of a new Rapid Prototyping Interface. **Computers in Industry**. v.3 n.39, p.61 – 70, 1999.
- KULKARNI, P. and DUTTA, B., An accurate slicing procedure for layered manufacturing. **Computer-Aided Design**, v.28, n.9, p.683 – 697, 1996.
- LIMA, M. V. A. de ; FOGGIATTO, J. A. ; VOLPATO, N., Otimização das Trajetórias dos Bicos Extrusores na Construção de Protótipos pela Tecnologia FDM. In: **Seminário de Iniciação Científica da UTFPR**, 2006, Curitiba. Anais do XI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, 2006.

- LIMA, M. V. A. de; ZACHI, F. D. ; VOLPATO, N. ; FOGGIATTO, J. A., Análise do Fator de Contração no Processo FDM. In: X **Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica do CEFET-PR**. Curitiba. Anais do X Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica. Curitiba : CEFET-PR, v. 1. p.13-16, 2005.
- MANI, K., KULKARNI, P., DUTTA, D. Region-based adaptive slicing, **Computer-Aided Design**. v.31, n.8, p.317–333, 1999.
- NETO, M. I., VOLPATO, N. ; FOGGIATTO, J. A., Uma Análise Dimensional e de Acabamento Superficial do Processo de Prototipagem Rápida FDM 2000. In: III **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2004, Belém-PA. Anais do III CONEM, 2004. v. 1. p. 1-10.
- PANDEY, P. M., REDDY, N. V., DHANDE, S. G., Slicing procedures in layered manufacturing: A review, **Rapid Prototyping Journal**. v.9, n.5, p.274-288, 2003.
- SABOURIN, E., HOUSER, S.A. and BØHN, J.H., Adaptive slicing using stepwise uniform refinement, **Rapid Prototyping Journal**. v.2, n.4, p.20-26, 1996.
- SABOURIN, E., HOUSER, S.A. and BØHN, J.H., Accurate exterior, fast interior layered manufacturing, **Rapid Prototyping Journal**. v.3 n. 2, p.44-52, 1997.
- SILVA, J. V. L., Planejamento de processo para prototipagem rápida, In: **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**. Ed. Volpato, N., Edgar Blucher, São Paulo, p102, 2007.
- SCHWARZ, D. C., VOLPATO, N., FOGGIATTO, J. A., Estudo da Qualidade de Peças Fabricadas pelo Processo FDM de Prototipagem Rápida, In: **XIV Seminário de Iniciação Científica da UTFPR**, 2009.
- TATA, K., FADEL, G., BAGCHI, A., AZIZ, N., Efficient slicing for layered manufacturing, **Rapid Prototyping Journal**. v.4, n.4, p151–167, 1998.
- TYBERG, J. and BOHN, H., Local adaptive slicing, **Rapid Prototyping Journal**. v.4, n.3, p.118–127, 1998.
- TYBERG, J. and BOHN, H., FDM systems and local adaptive slicing, **Materials and Design**. v. 20, p.77-82, 1999.
- VOLPATO, N., OLIVEIRA, J. S. A. de, e SOUZA, T. R. de, A Process Planning Applicative for Rapid Prototyping Technology, **Annals of the 18th International**

**Congress of Mechanical Engineering COBEM.** November, Ouro Preto, Brazil. CD-ROM, 2005.

VOLPATO, N., MANCZAK, T., OLIVEIRA, J. S. A. de, MENEZES, R. M., BONACIM, M. V., Avanços em um Aplicativo para o Planejamento de Processo de Prototipagem Rápida, **IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM.** Agosto, Recife, 2006.

VOLPATO, N., Planejamento de processo para prototipagem rápida, In: **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações.** Ed. Volpato, N., Edgar Blucher, São Paulo, p.96, 2007.

VOLPATO, N., RIBEIRO, F. S., FAUST, R. C., VASCONCELOS, G., Desenvolvimento do Módulo SLS no Sistema RP. In: **CONEM, 2008, Salvador-BA. Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.** 2008. v. 1.

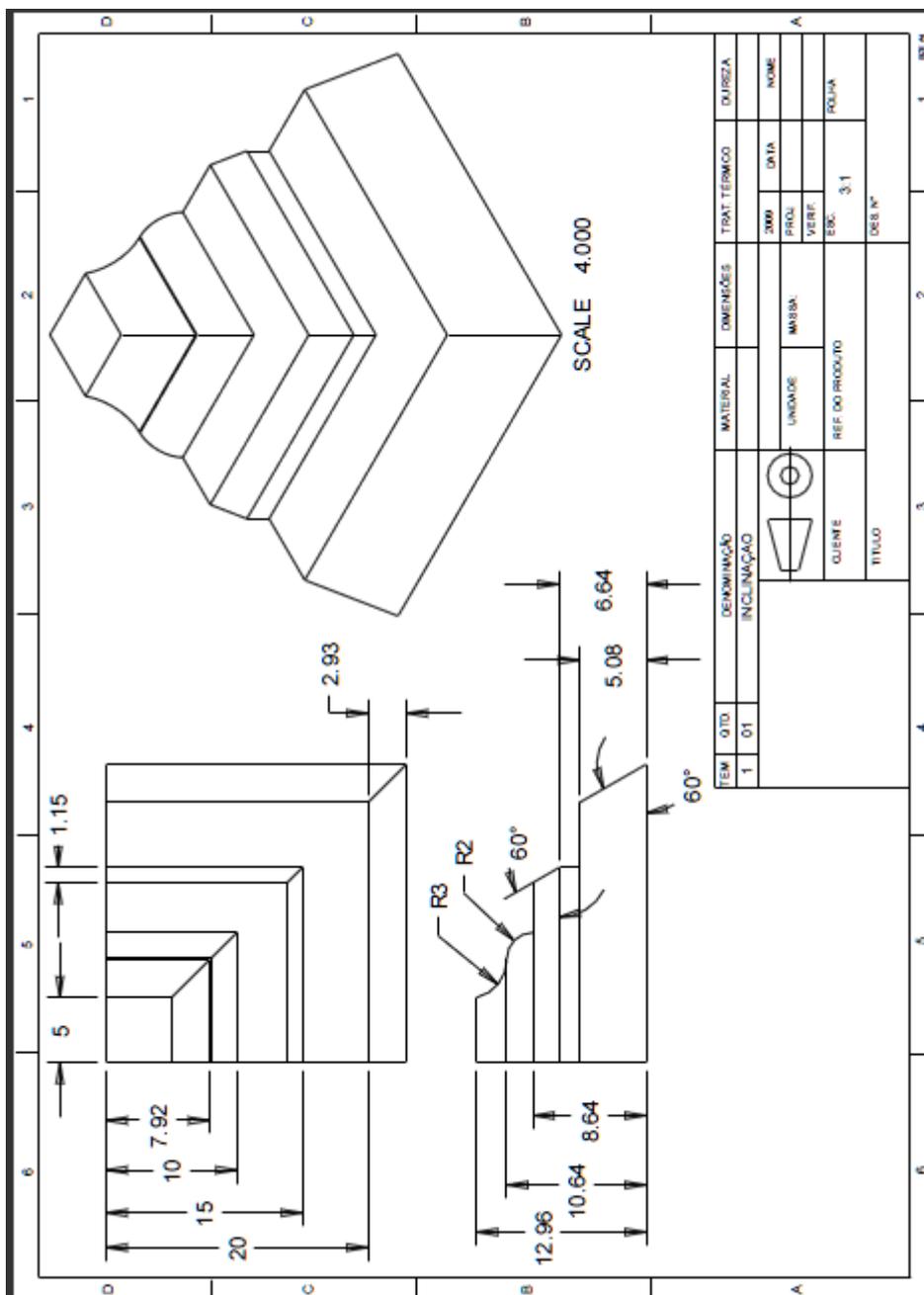
YAN, X., GU, P; A review of the rapid prototyping technologies and systems, **Computer Aided Design.** Great Britain, v.28, n.4, p.307 – 318, 1996.

ZIEMIAN, C. W. and CRAWN III, P. M. Computer Aided decision Support for Fused Deposition Modeling. **Rapid Prototyping Journal.** v 7, n.3. p.138 – 147, 2001.

ZHOU M.Y, XI J.T. and YAN J.Q., Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping, **Advanced Manufacturing Technological.** n.23 p.20-27, 2004.

# APÊNDICE A – DESENHOS TÉCNICOS DOS ESTUDOS DE CASO

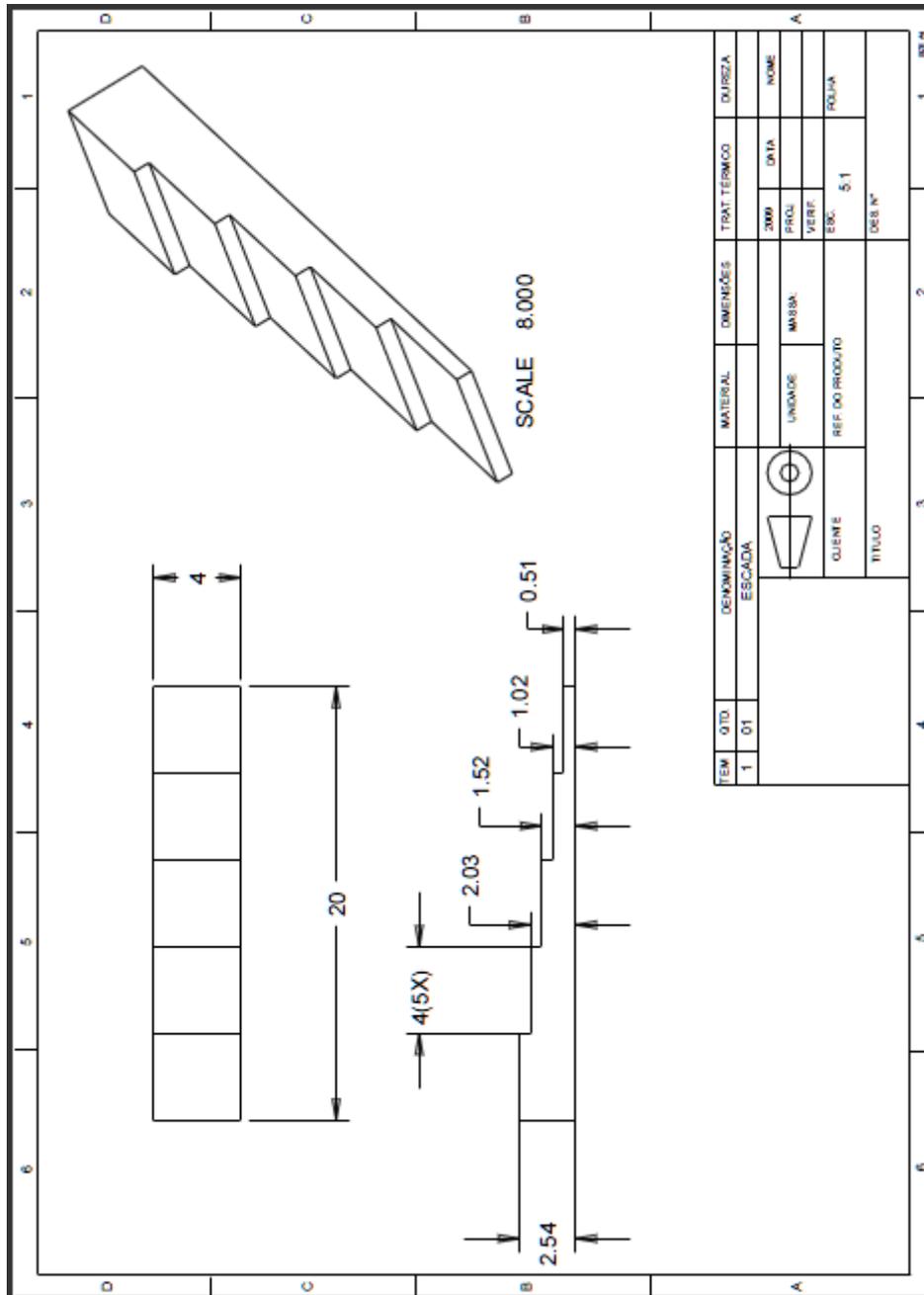
## GEOMETRIA DO ESTUDO DE CASO 1







### GEOMETRIA DO ESTUDO DE CASO 4



## APÊNDICE B – ARQUIVO .RP3

Português												
----- Arquivo RP3 : -----												
processo:												
tipo	FDM											
coeficiente de contração:												
x	1.007											
y	1.007											
z	1											
rotação atual:												
x	0											
y	0											
z	0											
parâmetros do sólido:												
camada	offset	raster	layer	ang_stl	ângulo	a_base	a_incr	zigzag	volta	vel_var	vel_pos	t_p
-----												
58	0.508	0.508	0.254	-0.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
-----												
1	0.508	0.508	0.254	30.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
2	0.508	0.508	0.254	30.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
3	0.508	0.508	0.254	30.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
4	0.508	0.508	0.254	30.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
5	0.508	0.508	0.254	30.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
6	0.508	0.508	0.254	30.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
7	0.508	0.508	0.254	30.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
8	0.508	0.508	0.254	30.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
9	0.508	0.508	0.254	30.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
10	0.508	0.508	0.254	30.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
11	0.508	0.508	0.254	30.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
12	0.508	0.508	0.254	30.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
13	0.508	0.508	0.254	30.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
14	0.508	0.508	0.254	30.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
15	0.508	0.508	0.254	30.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
16	0.508	0.508	0.254	30.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
17	0.508	0.508	0.254	30.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
18	0.508	0.508	0.254	30.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
19	0.508	0.508	0.254	30.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
20	0.508	0.508	0.178	30.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0

21	0.508	0.508	0.254	-0.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
22	0.508	0.508	0.254	-0.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
23	0.508	0.508	0.254	-0.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
24	0.508	0.508	0.254	-0.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
25	0.508	0.508	0.254	-0.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
26	0.508	0.508	0.254	-0.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
27	0.508	0.508	0.178	45.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
28	0.508	0.508	0.178	45.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
29	0.508	0.508	0.178	45.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
30	0.508	0.508	0.178	45.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
31	0.508	0.508	0.178	45.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
32	0.508	0.508	0.178	45.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
33	0.508	0.508	0.178	45.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
34	0.508	0.508	0.178	45.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
35	0.508	0.508	0.178	45.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
36	0.508	0.508	0.178	45.00	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
37	0.508	0.508	0.178	45.00	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
38	0.508	0.508	0.254	-0.00	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
39	0.508	0.508	0.254	-0.00	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
40	0.508	0.508	0.254	15.01	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
41	0.508	0.508	0.254	15.01	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
42	0.508	0.508	0.254	15.01	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
43	0.508	0.508	0.254	31.90	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
44	0.508	0.508	0.178	49.64	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
45	0.508	0.508	0.178	49.64	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
46	0.508	0.508	0.178	50.06	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
47	0.508	0.508	0.178	50.06	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
48	0.508	0.508	0.178	66.82	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
49	0.508	0.508	0.178	81.54	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
50	0.508	0.508	0.178	82.12	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
51	0.508	0.508	0.178	69.43	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
52	0.508	0.508	0.178	69.43	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
53	0.508	0.508	0.178	62.46	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
54	0.508	0.508	0.178	62.46	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
55	0.508	0.508	0.178	51.03	225.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
56	0.508	0.508	0.254	43.20	315.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
57	0.508	0.508	0.254	43.20	45.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
58	0.508	0.508	0.254	43.20	135.00	45.00	90.00	0	0	0	0	0
----- fim do arquivo -----												

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)