

VALDEMIR MARTINS LIRA

Desenvolvimento de Processo de Prototipagem Rápida via Modelagem por deposição de formas livres sob temperatura ambiente de materiais alternativos

**São Paulo
2008**

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

VALDEMIR MARTINS LIRA

Desenvolvimento de Processo de Prototipagem Rápida via Modelagem por deposição de formas livres sob temperatura ambiente de materiais alternativos

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia

**São Paulo
2008**

VALDEMIR MARTINS LIRA

Desenvolvimento de Processo de Prototipagem Rápida via Modelagem por deposição de formas livres sob temperatura ambiente de materiais alternativos

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Engenharia

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação**

**Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**

**São Paulo
2008**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa, pela abdicação de horas de lazer e pela compreensão, para que eu pudesse iniciar, desenvolver e concluir esse trabalho ao longo dos últimos sete anos e oito meses.

Dedico aos nossos filhos, Denise (Nice) e Gustavo (Gu).

Dedico também a minha mãe pelo incentivo em todos os momentos da minha vida e ao meu pai pelos ensinamentos de disciplina e do trabalho.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta pesquisa foi possível, ao longo dos últimos sete anos e oito meses, graças ao apoio e colaboração de diversas pessoas e instituições de ensino e de pesquisa, às quais manifesto meus agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha por ter me orientado, nos últimos dois anos, e fornecido grande contribuição para a estrutura, conteúdo e redação final do texto desta tese.

Ao Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto, por ter sugerido o tema desta tese e, ao longo dos quatro anos e seis meses iniciais, me orientado nessa pesquisa e por ter acreditado na persistência desse doutorando.

Ao Prof. Dr. Edílson Hiroshi Tamai, por ter fornecido grande contribuição no delineamento dos experimentos e na parte de cálculo estatístico dessa pesquisa.

Ao Tecnólogo Antonio Lopes Miranda, pela prestatividade e realização da parte experimental dessa pesquisa (laboratório de CNC, Fatec-SP).

Ao Engenheiro Mecânico Cristiano Faustino Silva, pela ajuda no desenvolvimento e montagem dos aparatos utilizados nos experimentos.

Ao Supervisor Técnico Israel Ferreira Alves (laboratório de mecânica, UNICSUL), pela ajuda na usinagem das peças dos aparatos utilizados nos experimentos.

Ao Técnico Luciano Benitez Pereira (laboratório de eletrônico, UNICSUL), pela ajuda na parte de implementação elétrica dos aparatos utilizados nos experimentos.

Ao Sr João Carlos (micro empresa: Tornearia J/C), pelos serviços prestados de tornearia, furação, solda e ajustagem realizadas em várias peças dos aparatos utilizados nos experimentos.

Ao meu amigo austríaco Nebo Praus, por ter me ensinado a falar as primeiras palavras da língua alemã.

À empresa SISGRAPH, na pessoa do Sr. Wilson Amaral, pela realização de experimentos na máquina FDM (*Fused Deposition Modeling*).

Ao Prof. Dr. Engelbert Westkämper, Diretor do IFF (Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetriebe), ao coordenador de grupo no IFF Eng. Axel Henning e ao coordenador de laboratório no IFF Eng. Bernd Biesinger, todos da Universidade de Stuttgart, Alemanha pela oportunidade de realização de estágio nesta instituição, em que pude observar a maneira de trabalhar, organizar e pesquisar do povo alemão.

À CAPES agência de fomento à pesquisa pela bolsa de estudo fornecida para o estágio na Universidade de Stuttgart, Alemanha.

Ao Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” (CEETPS), estado de São Paulo, pelo afastamento de minhas atividades como professor.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP), que possibilitou utilização de equipamentos e do laboratório para a parte experimental da pesquisa.

Es gibt nur eine Landstraße der Wissenschaft, und nur diejenigen haben Aussicht ihren hellen Gipfel zu erreichen, die die Ermüdung beim Erklettern ihrer steilen Pfade nicht scheuen.

(Karl Marx 1818 - 1883)

RESUMO

Nos processos usuais de prototipagem rápida, a transformação do material para a construção do protótipo, de maneira geral, é realizada por fusão ou polimerização oriunda do aquecimento via laser ou resistência elétrica. Isso, necessariamente, envolve equipamento especial para o processo de fusão e deposição do material para a construção das superfícies camada por camada, o controle de temperatura para assegurar a qualidade e o tratamento de gases exalados pela transformação entre outros. Essa forma de transformação nos processos de prototipagem rápida tem assim custos relativamente altos do protótipo e do equipamento. Uma alternativa para o processo de transformação inclui evidentemente outros materiais para construção do protótipo. Entretanto, no levantamento bibliográfico realizado observou-se que não existem trabalhos que explorem materiais e processos alternativos. Assim vários materiais foram analisados com base nas seguintes propriedades: processamento sob temperatura ambiente, capacidade de aderência entre as camadas, tempo de consistência e de cura do material, custo e disponibilidade no mercado nacional. Com base nesse estudo foi selecionado o seguinte material: compósito à base de complexo de carboidrato, o qual transforma-se, de estado físico, sob temperatura ambiente. Inicialmente analisaram-se os aspectos de aderência e tempo de cura. Posteriormente estudaram-se as características dos dispositivos e dos processos *Fused Layer Modeling* (FLM). Baseado nesse estudo foi fabricado um dispositivo para se extrudar material em forma de filamentos. Em seguida modelou-se o cinematismo da velocidade de deposição do dispositivo extrusor e assim delinear o projeto de experimentos para se obter, do processo proposto, os aspectos qualitativo (operação, preparação, custos, utilização dos protótipos, entre outros) e quantitativo (velocidade de deslocamento dos eixos X e Y, alturas entre camadas, rugosidade e forma geométrica). Desse estudo resulta que a proposta demonstra potencial para aplicação na fabricação de mostruários, peças de brinquedos, utilização em cursos de formação profissional, protótipos para moldagem à temperatura ambiente, moldes para fundição em areia.

Palavras chaves: Prototipagem rápida, *Solid Free Form*, Modelagem por deposição, Extrusão.

ABSTRACT

In usual processes of rapid prototyping the transformation of the material into the prototype construction is usually made by fusion or polymerization by means of heating by laser or electrical resistance. It necessarily requires special equipment for the fusion process and deposition of material for the surface construction, layer on top of layer, the temperature control to certify quality, the treatment of exhalation during the transformation process, among others. This kind of transformation in the rapid prototyping process is relatively expensive compared with the conventional process of prototyping. An alternative for the transformation process includes, obviously, other kinds of material for the prototype construction. However, bibliographic research has show, that there are no such works which explore alternative materials and processes especially in the national context. Therefore, several kinds of material have been analyzed based on the following properties: required temperature for the work, adherence capacity between the layers, consistence time or cure time of the prototype, cost and availability on the national market. The following material was chosen, based on this study: a compound, based on a carbohydrate complex, because it transforms itself from the physical form at room temperature. First of all, adherence aspects and curing time were analyzed,. Then characteristics of the apparatuses and devices of the Fused Layer Modeling process (FLM). Based on these characteristics the project of the extrusion device was developed, to extrude the carbohydrate composite in form of filaments and its kinematics was modeled to determine the depositing speed and design of experiments to obtain, out of the proposed process, the qualitative aspects (operation, preparation, costs, utilization of the prototype, among others) and quantitative (speed of the dislocation of the table at x-y axis, height between the layers, roughness and geometric form, among others). At that rate the developed proposal shows potentiality to be used in production of showcases, toy pieces, utilization in course for professional training, prototypes for molding at room temperature, forms for sand castings.

Key words: Rapid Prototyping, Solid Free Form, Modeling by deposition, Extrusion.

KURZFASSUNG

Bei der Anwendung des üblichen Rapid-Prototyping-Verfahrens erfolgt die Transformation des Materials zum Bau des Prototyps, im allgemeinen durch Fusion oder Polymerisation. Die Erhitzung erfolgt durch Laserstrahlen oder elektrische Resistenz. Es ergibt sich die Notwendigkeit einer Anschaffung einer speziellen Anlage oder Einrichtung für den Fusionsprozess und der schichtenweisen Ablagerung des Materials, zur Bildung der Oberflächen und der Temperaturkontrolle, um die Qualität zu gewährleisten. Ausserdem zur Behandlung der entweichenden Gase, die während der Transformation entstehen und vieles mehr. Der oben genannte Prozess erweist sich aber als relativ teuer, im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren des „Prototyping“. Eine Alternative für den Transformationprozess schliesst, unbestreitbar, auch andere Materialien ein. Doch zeigt eine bibliographische Bestandsaufnahme, dass noch keine Arbeiten vorliegen bei denen alternative Materialien und Prozesse angewandt wurden, wenigstens nicht im nationalen Landesbereich. Aus diesem Grunde wurden verschiedene Materialien, nach den folgenden Prinzipien, untersucht: Die Temperatur während der Arbeitsgänge oder des Prozesses, die Kapazität der Haftfestigkeit zwischen den Schichten, die Bearbeitung und des Festwerdens, die „Prototyp“ Kosten und die Verfügbarkeit auf dem Landesmarkt. Auf der Ergebnisse dieser Forschung wurde das folgende Material ausgewählt: „Composite“ auf der Basis von Kohlenhydrat Komplexen, denn dieses Produkt verändert seine physikalische Beschaffenheit bei Raumtemperatur. Zuerst wurden Aspekte der Haftfestigkeit und der Festwerde Zeit analysiert. Danach wurden die Notwendigkeit der Apparatus der Vorrichtungen und der Prozesse der „Fused Layer Modeling“ (FLM) analysiert. Auf Grund dieser Merkmale wurde der Bau der Extrusor Vorrichtung entwickelt, um das Composite in Faserform zu extrudieren. Ihre Kinetik wurde modelliert um die Geschwindigkeit der Ablagerung zu bestimmen. Versuche angestellt, um vom vorgeschlagenen Prozess, die qualitative Seite wie: den Arbeitsgang, die Vorbereitung, die Kosten, die Nutzung der Prototypen unter anderen und eben falls die quantitative Seite das heisst: die Verschiebungsgeschwindigkeit des Tisches auf den Achsen X und Y, die Höhen zwischen den Schichten, die Faltenbildung und die geometrische Form, unter anderen, zu erlangen. Folgende Merkmale konnten, auf diese Weise, beobachtet werden: Der Bau von Teilen bei Raumtemperatur, die niedrigen Kosten der Rohstoffe, ungiftiges Material, die Verbilligung und Vereinfachung des ganzen Prozesses und die Notwendigkeit von Fabrikanlagen. Auf diese Weise zeigte der entwickelte Vorgang Potenzial für die Anwendung bei der Erzeugung von Schaukästen, Spielzeugteilen, ebenso beim Einsatz in Kursen der beruflichen Schulung. Es ist ebenfalls geeignet für Prototypen zum Formen bei Raumtemperatur und als Gussform für Guss im Sand.

Kennworte: Rapid Prototyping, Solid Free Form, Modellierung von Ablagerungen, Extrusion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número aproximado de máquinas de PR vendidas entre 1988 e 2000 e respectivos processos de PR.....	25
Figura 2 – Seqüência de desenvolvimento da pesquisa	28
Figura 3 – Uso da SFF (<i>Solid Freeform Fabrication</i>)	33
Figura 4 – Principais etapas de utilização de PR	35
Figura 5 – Seqüência de trabalho no sistema de PR	36
Figura 6 – Classificação de alguns processos de prototipagem rápida via estado da matéria usada na construção do protótipo.....	39
Figura 7 – Estado da matéria para alguns processos de PR via <i>Fused Layer Modeling</i> (FLM)	46
Figura 8 – Detalhe da grandeza geométrica da espessura da camada aderida: (a) – compósito à base de complexo de carboidrato, (b) – compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico	47
Figura 9 – Estado da matéria-prima para alguns processos de PR via <i>Fused Layer Modeling</i> (FLM) com ramificação proposta	47
Figura 10 – Detalhe das camadas: (a) — compósito à base de complexo de carboidrato, (b) – compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico	48
Figura 11 – Esquemas simplificados das máquinas <i>Three Dimensional Printing</i> (3DP) e <i>Mult Jet Solidification</i> (MJS).....	52
Figura 12 – Esquemas simplificados das máquinas: <i>Mult Jet Modeling</i> (MJM) e Extrusora Prototipadora (EP).....	53
Figura 13 – Esquemas simplificados das máquinas <i>Sanders</i> ou <i>Inkjet Modeling</i> e <i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM).	55
Figura 14 – Diferentes estratégias de trajetórias.....	57
Figura 15 – Esquema do dispositivo para extrudar filamentos da MDTA	59
Figura 16 – Elementos constituintes do sistema “dispositivo extrusor”	63
Figura 17 – Grandezas dimensionais constituintes do sistema “dispositivo extrusor”	65
Figura 18 – Diferenças dimensionais do diâmetro do filamento antes e depois da extrusão	69
Figura 19 – Seqüência de etapas para cada procedimento	75

Figura 20 – Entradas e respostas (qualitativas e quantitativas) da MDTA.....	79
Figura 21 – Detalhe de protótipos de compósito à base de complexo de carboidrato via MDTA.	91
Figura 22 – Detalhe de protótipos com acúmulo de material nos pontos de parada para posterior movimentação na direção Z.....	92
Figura 23 – Detalhe das regiões de movimentação dos eixos de paradas e desacelerações para posterior movimentação na direção Z	93
Figura 24 – Dispositivo montado na fresadora CNC	97
Figura 25 – Distância do bico extrusor à superfície de deposição (D) e largura do filamento	99
Figura 26 – Filamentos depositados sobre superfície	109
Figura 27 – Peça em forma circular e detalhe dos filamentos sobrepostos	114
Figura 28 – Estratégia para a leitura dos picos e vales nos filamentos – conforme norma DIN 4768 e inclinação das peças	115
Figura 29 – Esquema do processo SLA e F&S.....	153
Figura 30 – Máquina de <i>stereolithography</i> , Instituto <i>Fraunhofer</i> para Automação – Empresa: <i>Fockele & Schwarze</i>	154
Figura 31 – Esquema do processo SGC.....	158
Figura 32 – Máquina de SGC, modelo: SGC 5600 – Empresa: <i>Cubital</i>	158
Figura 33 – Esquema do processo LS	161
Figura 34 – Máquina de sinterização, Instituto <i>Fraunhofer</i> para Automação – Empresa: EOS.....	161
Figura 35 – Esquema do processo LOM.....	165
Figura 36 – Desmontagem dos blocos de material excedente.....	165
Figura 37 – Máquina de LOM, Modelo: <i>HELISYS 2030</i> – Empresa: <i>HELISYS</i>	166
Figura 38 – Esquema do processo FDM- <i>Stratasys</i>	169
Figura 39 – Máquina FDM, da empresa <i>Stratasys</i>	169
Figura 40 – Esquema do processo MJM.....	171
Figura 41 – Máquina MJM, – modelo: <i>ThermoJet printer</i> – Empresa: <i>3D SYSTEMS</i>	172
Figura 42 – Esquema do processo EP.....	174
Figura 43 – Máquina EP – modelo: 16D75417 Mühlacker – Empresa: <i>EXTRUDEX</i> <i>KUNSTSTOFFMASCHINEN</i>	174
Figura 44 – Detalhe da emenda da peça	176

Figura 45 – Estratégias de trajetória do bico injetor para protótipo vazado (a) e maciço (b)	177
Figura 46 – Grandezas dimensionais do protótipo fabricado nos experimentos com a FDM e EP.	184
Figura 47 – Forno elétrico utilizado nos experimentos	195
Figura 48 – Etapas de trabalho durante o processo de fundição no forno elétrico..	196
Figura 49 – Peças fundidas.....	196

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Intervalos limites das velocidades de deposição e da superfície de deposição	86
Gráfico 2 – Efeito da interação velocidade de deposição X distância para deposição	102
Gráfico 3 – Intervalos limites das velocidades de deposição e da superfície de deposição e largura do filamento (vista superior).	107
Gráfico 4 – Larguras médias de filamentos na Velocidade teórica 301 mm/min. e altura de deposição igual a 0,67 mm.	110
Gráfico 5 – Larguras médias de filamentos na Velocidade teórica 328 mm/min. e altura de deposição igual a 0,67 mm.	111
Gráfico 6 – Larguras médias de filamentos na Velocidade teórica 353 mm/min. e altura de deposição igual a 0,67 mm.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de PR e a forma de transformação da matéria	40
Tabela 2 – Processos de PR quanto à qualificação	42
Tabela 3 – Rotações via osciloscópio	68
Tabela 4 – Larguras dos filamentos lidos via microscópio óptico.....	71
Tabela 5 – Velocidades médias teóricas em cada procedimento.....	76
Tabela 6 – Variáveis de entrada x interações entre variáveis.	84
Tabela 7 – Grandezas de construção do dispositivo extrusor	100
Tabela 8 – Valores das larguras das amostras de filamentos.....	100
Tabela 9 – Análise de variância.	101
Tabela 10 – Valores dos parâmetros operacionais	105
Tabela 11 – Valores das larguras das amostras de filamentos.....	105
Tabela 12 – Análise de variância.	106
Tabela 13 – Valores de velocidades de deposição e de velocidade limite de deslocamento da superfície de deposição.....	114
Tabela 14 – Efeito da velocidade de deposição (301 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição = 290 mm/min na forma geométrica e na rugosidade.....	116
Tabela 15 – Efeito da velocidade de deposição (301 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição = 305 mm/min na forma geométrica e na rugosidade.....	117
Tabela 16 – Efeito da velocidade de deposição (328 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição = 318 mm/min na forma geométrica e rugosidade.....	118
Tabela 17 – Efeito da velocidade de deposição (328 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição = 335 mm/min na forma geométrica e na rugosidade.....	119
Tabela 18 – Efeito da velocidade de deposição (353 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição = 330 mm/min na forma geométrica e na rugosidade.....	120
Tabela 19 – Efeito da velocidade de deposição (353 mm/min) e Velocidade de deslocamento da superfície de deposição = 367 mm/min na forma geométrica e rugosidade.....	121

Tabela 20 – Dados de fabricação de protótipos via prototipagem convencional (PC) e via PR pela SL e FDM.....	145
Tabela 21 – Formatos de troca de dados para máquinas com <i>Solid Free Form</i> (SFF)	151
Tabela 22 – Fabricantes e sistemas de PR via <i>stereolithograpy</i>	153
Tabela 23 – Fabricantes e sistemas de PR via <i>Laser-Sinter</i>	160
Tabela 24 – Fabricantes e sistemas de PR via <i>Layer Laminate Manufacturing</i>	164
Tabela 25 – fabricantes e sistemas de PR Fused <i>Layer Modeling</i>	168
Tabela 26 – Comparativo de dados de preparação e operação entre sistema EP, FDM e MDTA.	186
Tabela 27 – Comparativo dos dados dimensionais entre os sistemas EP, FDM e MDTA.....	188
Tabela 28 – Comparativo dos custos do material entre os sistemas EP, FDM e MDTA.....	189
Tabela 29 – Comparativo da utilização entre os sistemas EP, FDM e MDTA.....	191

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – *Two-dimensional*

3D – *Three-dimensional*

3DP – *Three Dimensional Printing*

ABS – Acrilonitrila – butadieno – stírol

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

CAD – *Computer Aided Design*

CAD-3D – *Computer Aided Design – Three Dimensional*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CLI – *Commun Layer Interface*

CNC – *Computer Numerically Control*

DXF – *Drawing Exchange Format*

EDM – *Electro Discharge Machining*

EOS – *Electrical Optical Systems*

EMCO – *Erwin Müller Company*

EP – *Extrusora Prototipadora*

F & S – *Fockele und Schwarze*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

FLM – *Fused Layer Modeling*

G – Essa letra vem da língua inglesa “Go”, que significa “ir” em português. Trata-se de um código usado em programação de máquinas a CNC.

HPGL – *Hewlett Packard Graphies Language*

IGES – *Initial Graphies Exchange Specification*

ITP – *Ingenieurbüro Dr. Theo Pintat*

LEAF – *Layer Exchange ASCII Format*

LENS – *Laser Engineered Net Shaping*

LLM – *Layer Laminate Manufacturing*

LMI – *Layer Manufacturing Interface*

LMP – *Layer Milling Process*

LMT – *Layer Manufacturing Technologies*

LOM – *Laminated Object Manufacturing*

LS – *Laser Sintering*

MDTA – *Modelagem por Deposição sob Temperatura Ambiente*

MJM – *Multi Jet Modelling*
MJS – *Multiphase Jet Solidification*
NC – *Numerically Control*
PA – Poliamida
PC – Policarbonato
PC – Prototipagem Convencional
PLT – *Paper Layer Technology*
POM – Polióxido de metileno
PP – Polipropileno
PS - Poliestireno
PT – Polimerização Térmica
PVC – Polivinilclorida
PR – Prototipagem Rápida
RPM – Rotação por minuto
RT – *Rapid Tooling*
RPI – *Rapid Prototyping Interface*
SAHP – *Selective Adhesive and Hot Press Process*
SET– *Standard d'échange et de transfer*
SFF – *Solid Freeform Fabrication*
SGC – *Solid Ground Curing*
SL – *Stereolithograpy*
SLA – *Stereolithograpy Apparatus*
SLC – *Stereolithographie Contour*
SLI – *Slicing*
SLS – *Selective Laser-Sinter*
SOM – *Stratified Object Manufacturing*
STEP – *Standart for the Exchang of Product Model Data*
STL – *Stereolitography Tesselation Language*
TE – Taxa de extrusão
UV – *Ultra Violet*
VDAFS – *Verband der Automobilhersteller – Flächenschnittstelle*
X – coordenada indicada pelo polegar (dedo da mão), regra da mão direita
Y – coordenada indicada pelo indicador (dedo da mão), regra da mão direita
Z – coordenada indicada pelo médio (dedo da mão), regra da mão direita

LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{cilindro}$	– Área do cilindro	(mm ²)
D	– Distância de deposição	(mm)
$D_{b,}, D_{bico}$	– Diâmetro interno do bico	(mm)
D_c	– Diâmetro interno do cilindro	(mm)
Df_a	– Diâmetro do filamento antes da deposição	(mm)
Df_d	– Diâmetro do filamento após a deposição	(mm)
f	– Frequência	(KHz)
i	– Relação de transmissão	(Adimensional)
l_e	– Distância entre picos e vales (conforme norma DIN 4768)	(mm)
l_m	– Comprimento da amostragem	(mm)
N	– Número de ranhuras do <i>encoder</i>	(Adimensional)
P	– Passo do parafuso	(mm)
Q	– Vazão	(cm ³ /hora)
Q_{mc}	– Vazão média na secção interna do cilindro	(cm ³ /hora)
Q_{msb}	– Vazão média na saída do bico	(cm ³ /hora)
V_d	– Velocidade de deposição	(mm/min)
$V_{êmbolo}$	– Velocidade do êmbolo	(mm/min)
V_{mc}	– Velocidade média na secção interna do cilindro	(mm/min)
V_{mesa}	– Velocidade de deslocamento da superfície de deposição	(mm/min)
$V_{mesa ideal}$	– Velocidade de deslocamento ideal da superfície de deposição	(mm/min)
V_{real}, V_0	– Velocidade real	(mm/min)
$V_{relativa}$	– Velocidade relativa	(mm/min)
V_{sb}	– Velocidade média de saída do material através do bico	(mm/min)
$\eta_{entrada}, \eta_e$	– Rotação de entrada	(Rpm)

SUMÁRIO

1. Introdução	23
1.1. Motivação	23
1.2. Objetivo geral	26
1.3. Objetivo específico	27
1.4. Estrutura do trabalho	27
2. A tecnologia da prototipagem rápida	30
2.1. Aplicação da PR	32
2.2. Visão Geral da tecnologia PR	34
2.3. Processos de PR	37
2.3.1. Classificação dos processos de PR via material	38
2.3.2. Materiais utilizados na PR	40
3. Proposição de processo de PR via Modelagem por Deposição sob Temperatura Ambiente (MDTA)	45
3.1. Verificação da aderência entre camadas	46
3.2. Características de cura dos materiais selecionados para construção de protótipos	48
4. Características dos processos e dispositivos na <i>Fused Layer Modeling</i> (FLM) e dispositivo extrusor da MDTA	50
4.1. Características dos dispositivos extrusores – processos <i>Fused Layer Modeling</i> (FLM)	50
4.1.1. <i>Three Dimensional Printing</i> (3DP)	51
4.1.2. <i>Multiphase Jet Solidification</i> (MJS)	51
4.1.3. <i>Mult Jet Modeling</i> (MJM)	52
4.1.4. Extrusora Prototipadora (EP)	53
4.1.5. <i>Sanders</i> ou <i>Inkjet Modeling</i>	54
4.1.6. <i>Fused Deposition Modeling</i> (Stratasys)	54
4.2. Dispositivo extrusor da MDTA	55

4.2.1. Croqui do dispositivo extrusor	58
5. Modelagem cinemática de sistema para extrudar material em forma de filamento sob temperatura ambiente	61
5.1 Grandezas operacionais	61
5.2. Modelagem	62
5.3. Modelagem cinemática do sistema extrusor	64
5.4. Determinação dos parâmetros do sistema extrusor	66
5.4.1. Rotação	66
5.5. Variação dimensional do diâmetro do filamento	69
5.5.1. Materiais e métodos	70
5.6. Determinação da velocidade teórica de deposição	72
5.6.1. Materiais e métodos	72
5.6.2. Experimentos	76
5.6.3. Análise dos resultados	76
6. Projeto de experimentos	78
6.1. Discretização das variáveis na MDTA	78
6.1.1. Entradas na MDTA	79
6.1.2. Respostas intermediárias na MDTA	82
6.3 Intervalos entre velocidade de deposição e deslocamento da mesa para acúmulo e falta de material	85
6.4. Respostas qualitativas e quantitativas na MDTA	86
7. Experimentos qualitativos da MDTA	87
7.1. Materiais e métodos	87
7.1.1 Materiais	87
7.1.2 Métodos	88
7.2 Experimentos	89
7.3 Resultados e discussões	89

8 Experimentos quantitativos	95
8.1 Velocidade de deslocamento da mesa e distâncias do bico extrusor na superfície de deposição	95
8.1.1 Materiais e métodos	96
8.1.2 Experimentos	99
8.1.3 Análise dos resultados	100
8.2 Velocidade de deposição e relativa	102
8.2.1 Materiais e métodos	103
8.2.2 Experimentos	104
8.2.2 Análise dos resultados	106
8.3 Estudo de acúmulo e de falta de material na largura do filamento	106
8.3.1 Materiais e métodos	108
8.3.2 Análise dos resultados	109
8.4. Experimento quantitativo: forma geométrica e rugosidade	112
8.4.1 Materiais e métodos	112
9. Conclusões	122
9.1. Conclusões sobre uso de material alternativo	122
9.2. Conclusões sobre uso dispositivo da MDTA	123
9.3. Conclusões dos experimentos qualitativos	124
9.4. Conclusões dos experimentos quantitativos	125
9.5. Conclusões finais da MDTA	126
10. – Sugestões para trabalhos futuros	128
11. Bibliografia de referência	131
APÊNDICE A – Viabilidade econômica da PR	142
APÊNDICE B – Exemplos de aplicações da PR em algumas áreas	147
APÊNDICE C – Geração de arquivos para fatiamento	149

APÊNDICE D – Processos de PR	153
APÊNDICE E – Estratégia da trajetória e programa em código “G”	177
APÊNDICE F – Análise comparativa	183
APÊNDICE G – Fundição de protótipos fabricados via processo da MDTA	195
APÊNDICE H – Sobre o autor	197

1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se a motivação para a realização da presente pesquisa, direcionada à aplicação de materiais de baixo custo na tecnologia da prototipagem rápida. Descrevem-se também os objetivos gerais e específicos, bem como a estruturação dos conteúdos de cada capítulo e apêndices.

1.1. Motivação

O processo de globalização do mercado e das indústrias possibilita a disseminação do *know-how* dos processos de fabricação de produtos e intensificam a concorrência nacional e internacional. Em função disso, na produção industrial, o desenvolvimento de produtos e processos está em constante aprimoramento, envolvendo prazos mais curtos e maior qualidade dos produtos. Nesse contexto de alta exigência de inovação e também de redução do ciclo de vida do produto, as empresas podem obter com a prototipagem rápida (PR)¹, maior economia de custos e de tempo, na fase inicial do desenvolvimento de produtos (WESTKÄMPER, 2003).

A concepção de produtos com apoio da PR contribui também para a automação e a informatização do fluxo de informações e, conseqüentemente para sua racionalização entre os departamentos de uma empresa, pois envolve intensa troca de informações na fase de desenvolvimento do produto (WESTKÄMPER, 2003).

Em um passado recente, os protótipos eram feitos, de posse do desenho do produto, por meio de máquinas convencionais usadas no chão-de-fábrica, como tornos, fresadoras, furadeiras entre outros. Tais processos, de uma maneira geral, encareciam o produto final. Com a PR, a construção de protótipos necessita de integração de tecnologias mecânica, eletrônica e informática em um processo produtivo, de modo a conceber e construir um protótipo em um curto espaço de

¹ O termo prototipagem rápida em inglês corresponde a *rapid prototyping*.

tempo (FRITZ, NOORANI, 1999; GONÇALVES, A., 2000; HALLER, SIEGERT, 2000).

As empresas têm buscado na PR um meio para diminuir ainda mais o tempo e os custos na introdução de produtos no mercado (BREINTINGER, 2002). Essa tecnologia proporciona a identificação e a correção de erros já no estágio de esboço, durante o processo inicial de desenvolvimento, e ainda a previsão, sem restrições, de formas e geometrias para a construção de protótipos (HELD, 1996).

Especificamente os processos de manufatura necessitam da elaboração de protótipos antes da produção em alta escala. O protótipo é a primeira representação física e sólida do que foi concebido e tem como finalidade confirmar que esse seja o produto desejado antes da sua produção em escala seriada. O protótipo deve contribuir com o processo de desenvolvimento do produto, com a redução dos custos e do tempo de projeto, além de explicitar a interação necessária entre os departamentos da empresa (MACHT, 1999).

A expressão “rápido é melhor” é verdadeira em muitas áreas produtivas (WESTKÄMPFER, 2003). Tudo o que contribui para a redução do “*time-to-market*”² merece atenção especial.

A tecnologia de PR nos dez primeiros anos, desde a introdução da primeira máquina em 1987, alcançou um nível relativamente alto de atividade econômica. O termo “*rapid*” tem assim sido usado como palavra-chave para indicar a concepção e a manufatura moderna de produtos de vários segmentos.

No mundo, segundo Wohlers (2001), entre 1988 e 2000 foi constatada a existência de aproximadamente 7000 máquinas de PR em uso, sendo aplicadas a mais de duas dezenas de diferentes áreas. Observa-se na figura 1, que entre 1988 e 2000, as máquinas mais vendidas foram as que utilizavam o processo de *Stereolithography*³ e *3D Printing*, da empresa americana *3D Systems*.

² “*time-to-market*” : é o tempo necessário para se introduzir um produto no mercado.

³ O termo *Stereolithography* e os demais termos dos processos estão em inglês, pois a bibliografia pesquisada, seja em língua portuguesa ou alemã, assim o fazem.

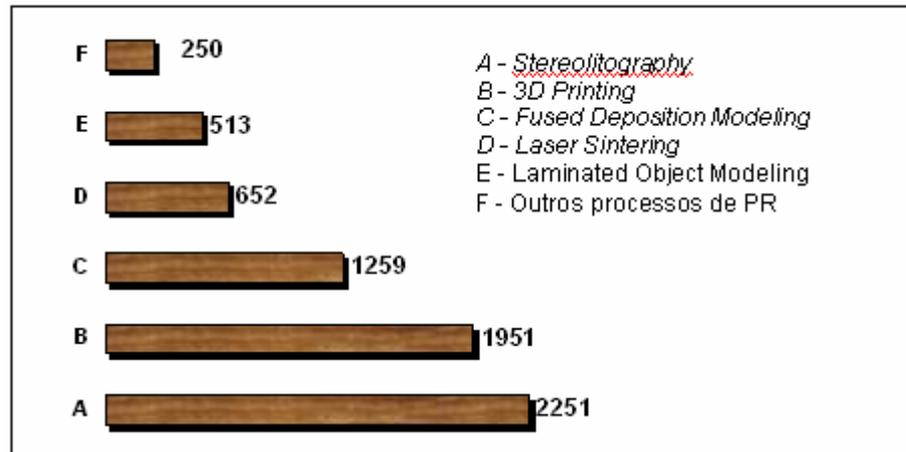


Figura 1 – Número aproximado de máquinas de PR vendidas entre 1988 e 2000 e respectivos processos de PR, adaptado de Wohlers (2001)

A PR está sendo amplamente estudada nos últimos anos (BIRKE, 2002) (BREINTINGER, 2002) (GEBHARDT, 2000) (KASCHKA, 1999) (PIEVERLING, 2002) (EBENHOCH, 2001) (GEIGER, 2000), sobretudo na viabilização econômica da aplicação de máquinas específicas direcionadas para a automação desse processo, na melhoria de processos e na utilização de novos materiais, etc.

Apesar do inegável avanço alcançado nos últimos anos, muito ainda há que se fazer, em especial em relação aos custos (Apêndice A) envolvidos na tecnologia de PR. Tem-se, como exemplo, o estudo de materiais de baixo custo que possam atender às aplicações específicas para a construção de protótipos.

De maneira geral, as máquinas de PR apresentam elevado custo. Isso se deve, em parte, ao trabalho com materiais que, durante o processo, necessitam mudar seu estado físico, por meio de aquecimento ou fusão, o que requer, durante a construção de protótipos, tratamentos especiais, como a eliminação de gases, geralmente tóxicos, resultantes e emitidos durante a transformação do material (EBENHOCH, 2001).

Ao analisar os processos de PR existentes, durante a construção do protótipo, observa-se que o material trabalhado sofre transformação física pela ação do *laser* ou por aquecimento. Esse processo exige cuidados especiais quanto à manipulação do material, à emissão de gases proveniente ao processamento do material, ao alto consumo de energia e ao alto custo de operação e manutenção.

Existe, assim, a necessidade de se estudar processos alternativos que utilizem materiais atóxicos que dispensem o uso do laser ou de resistência elétrica. Além disso, é também importante investigar a simplificação da máquina de PR no sentido de reduzir os custos de operação e manutenção.

Observa-se ainda, que no contexto nacional, alternativas de materiais e processos que envolvam custos menores são ainda mais relevantes em virtude da carência de recursos para investimentos de longo prazo e da dificuldade de acesso a materiais específicos.

1.2. Objetivo geral

O atual estágio de desenvolvimento tecnológico de PR indica a existência de “ilhas de soluções”, em relação à tecnologia nas máquinas para a construção de um protótipo, como a necessidade de avaliar outros materiais e processos de menor custo operacional. Além disso, máquinas de PR de menores dimensões e melhor grau de empacotamento representam novas áreas de aplicações, como na fabricação de pequeno volume de produtos para o mercado, objetos personalizados, maquetes, moldes para peças de mostruário, peças para fins didáticos entre outros.

É grande também a viabilidade de instalação de máquinas com essas características, inclusive em ambientes não industriais, como escritórios, salas de aulas de faculdades (engenharia e tecnologia mecânica, civil, arquitetura, entre outras) e de escolas técnicas, consultórios, pequenas oficinas e residências etc.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é investigar e propor um novo processo de modelagem de PR decorrente do uso de materiais com custos relativamente acessíveis, de modo a alavancar a tecnologia da PR no contexto nacional e, quiçá, no contexto internacional.

1.3. Objetivo específico

Para o desenvolvimento de um processo alternativo de PR em que se utiliza material para processamento sob temperatura ambiente será necessário:

- a) Selecionar material para ser utilizado na construção de protótipos sob temperatura ambiente;
- b) Construir um dispositivo extrusor;
- c) Modelar o sistema cinemático dos elementos constituintes do dispositivo extrusor para se obter a velocidade de extrusão do material extrudado em forma de filamento;
- d) Estudar as variáveis de entradas (parâmetros operacionais do processo proposto), respostas intermediárias (largura e espessura do filamento) e as respostas (qualitativas e quantitativas) do processo de modelagem por deposição sob temperatura ambiente durante a deposição de filamento do material escolhido para uso na fabricação de protótipos.

1.4. Estrutura do trabalho

Após a apresentação da introdução, da motivação e dos objetivos (figura 2), no segundo capítulo, é tecida a revisão bibliográfica da tecnologia de PR, realçando-se os processos sob a ótica do material, do meio de transformação do estado físico dos materiais empregados na PR, e dos agentes de transformação e processamento desses materiais na fabricação de protótipos. Com base nisso, é feita, no terceiro capítulo, a apresentação do processo proposto de PR.

No quarto capítulo, descrevem-se os processos e os dispositivos usados nos sistemas tradicionais de PR por deposição de material, que servirão de base para construção do dispositivo. Ainda sobre o dispositivo, no quinto capítulo, faz-se a

modelagem cinemática, via elementos constituintes do sistema, para se extrudar material em forma de filamento sob temperatura ambiente. Tal procedimento visa à obtenção das grandezas operacionais que influenciam a operacionalidade do dispositivo e do processo e que irão determinar a forma geométrica e a rugosidade durante a fabricação de protótipos sob temperatura ambiente.

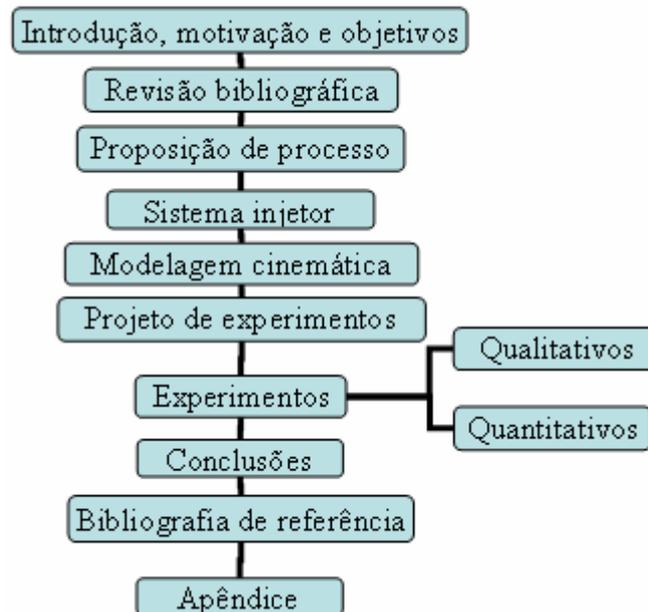


Figura 2 – Seqüência de desenvolvimento da pesquisa

No sexto capítulo, é delineado o projeto de experimento visando-se à definição da estratégia que será adotada nos experimentos com materiais sob temperatura ambiente para a obtenção das características qualitativas (sétimo capítulo), e quantitativas (oitavo capítulo), a fim de fundamentar o processo de prototipagem rápida proposto.

No nono capítulo, são apresentadas as conclusões finais da pesquisa acerca dos experimentos qualitativos e quantitativos do processo proposto e, no décimo capítulo, são indicadas, para trabalhos futuros, várias áreas de aplicações do processo proposto.

Finalmente, no décimo primeiro capítulo, tem-se a bibliografia de referência e na seqüência vários apêndices, como seguem:

APÊNDICE A: apresenta-se a viabilização econômica da utilização da PR, e comentários sobre os aspectos estratégico e operativo, que servirão de parâmetro na adoção de sistemas de PR;

APÊNDICE B: exemplifica-se a aplicação da PR nas áreas automobilística, médica, odontológica e de fundição, possibilitando assim um detalhamento de utilização da PR em vários setores da sociedade.

APÊNDICE C: apresenta-se a geração de arquivos para fatiamento em 2D e 3D.

APÊNDICE D: descrevem-se detalhadamente os processos de PR;

APÊNDICE E: apresentam-se as estratégias de programação, em código "G", da trajetória do bico extrusor;

APÊNDICE F: apresenta-se uma análise comparativa entre o processo proposto de PR, o processo da Extrusora Prototipadora⁴ (EP) e a *Fused Deposition Modeling* (FDM);

APÊNDICE G: apresenta-se o equipamento utilizado na fundição de protótipos fabricados pelo processo proposto, a descrição das etapas de fundição e também os modelos obtidos pela fundição;

APÊNDICE H: informações sobre o autor.

⁴ Está denominação foi adotada pelo autor (APÊNDICE H), pois o processo está sendo desenvolvido na Universidade de Stuttgart, Alemanha, não sendo ainda um processo disponível comercialmente.

2. A tecnologia da prototipagem rápida

Neste capítulo apresentam-se as características e as aplicações da tecnologia da PR, destacando-se as etapas que envolvem a seqüência de trabalho para se fabricar uma peça e realçando-se os materiais utilizados em tal processo. Com base nessa apresentação, será proposto o processo de PR via modelagem por deposição sob temperatura ambiente.

A tecnologia da PR teve sua aplicação prática com a implementação da primeira máquina em 1987. Nesse momento inicial, os altos custos das máquinas de PR, o tempo ainda elevado no processo, a pouca disponibilidade de materiais e a pouca precisão dos protótipos resultantes limitavam a aceitação dos sistemas de PR. Tais características eram obstáculos à sua efetiva integração no sistema industrial e a sua aplicação no desenvolvimento de produtos em outras áreas, como na variante denominada de *Rapid Tooling*⁵ (RT) (LINDNER, 2002) (TECHEL, 1999) para atender as exigências do mercado diante de novas tarefas e desafios no desenvolvimento de produtos.

Esses desafios contribuíram para o aprimoramento dos sistemas de PR, os quais apresentam as seguintes características:

- O princípio de construção do protótipo caracteriza-se pela adição de material em camadas sobrepostas umas sobre as outras (PIEVERLING, 2002) (BOURELL, BEAMAN, BARLOW, CRAWFORD, 1996);
- O protótipo construído é um modelo físico, um mostruário e um meio visual de comunicação (PIEVERLING, 2002);

⁵ O termo *Rapid Tooling* pode ser entendido como a geração e manufatura rápida de ferramentas, como moldes ou matrizes, pois o protótipo gerado é uma ferramenta pronta para o seu uso.

- Erros de projeto de produtos e outros problemas, como falha de fechamento de superfícies, durante o processo de desenvolvimento, são facilmente descobertos, o que permite alterações e correções ainda na etapa inicial do desenvolvimento do produto (CAPUANO, 2000);
- Ainda na fase de concepção do produto, via modelagem tridimensional, pode-se desenvolver e trabalhar geometrias complexas e que poderão ser construídas na máquina de PR (KÜNSTNER, 2002);
- A PR oferece flexibilidade para alterar um produto, prever o período de construção, ainda na fase de desenvolvimento, sem uso de recursos, equipamentos e pessoal adicionais. Essa flexibilidade possibilita ainda determinar o custo de construção e do produto, no estágio de desenvolvimento do projeto (KIMURA, 2002);
- O desenvolvimento do protótipo contribui para a especificação dos dados do produto e da gestão do processo de produção, no sentido de envolver a estruturação do fluxo de informações entre diversos departamentos da empresa. Todos os dados do protótipo são transferidos e armazenados, para posterior trabalho, como a definição da trajetória do *laser* sobre uma superfície. Isso é realizado nos *softwares* da máquina de PR para o processo de sua construção. Assim, esses dados são importantes para o aprimoramento do produto e do processo de fabricação (BRANDNER, 1999);
- Como o processo de construção de protótipos é automatizado, é possível a previsão e a determinação mais criteriosa do tempo de desenvolvimento de produtos (MÜLLER, WEITZEL, 2003);
- O protótipo é construído com precisão centesimal em termos de nível de detalhamento, qualidade superficial, de dimensões da área de trabalho (envelope) e de características tecnológicas, como resistência mecânica e processos subseqüentes (GEBHARDT, 2000).

Tais características potencializam o uso da PR na melhoria do processo de desenvolvimento de produtos, mas a sua adoção como ferramenta de desenvolvimento de produtos deve ser analisada e considerada junto com outros fatores, tais como:

- Disponibilidade de um sistema *Computer Aided Design – Three Dimension* (CAD - 3D) para a modelagem da forma volumétrica do protótipo considerado;
- Avaliação econômica do processo de PR que atende a exigência da qualidade dentro de certas restrições de tempo;
- Custos diretos e indiretos envolvidos no processo de PR;
- Capacidade e desempenho do sistema de PR;
- Tempo envolvidos na preparação da máquina;
- Custos do material a ser utilizado e trabalhado na construção do protótipo; necessidade de retrabalho, etc.

Tais considerações são fundamentais na análise de adoção de um sistema de PR para o desenvolvimento de produtos (APÊNDICE A).

Nos itens subseqüentes, far-se-á uma descrição da tecnologia da PR no tocante à sua aplicação e principais características em termos de geração de dados, *softwares* utilizados, tipos de processo e materiais utilizados.

2.1. Aplicação da PR

Segundo Wohlers (2003), em 2002, no mercado mundial havia aproximadamente 10.000 máquinas do processo *Solid Free Form*⁶ (SFF). Uma análise do uso dessas

⁶ O SFF é um sistema para a modelagem (desenho) de formas geométricas tridimensionais diretamente no CAD.

máquinas é apresentada na figura 3, na qual nota-se que a manufatura direta representa somente 3,9% da utilização em 2003, sendo portanto a área com maior potencial de crescimento nessa tecnologia.

Já os modelos funcionais (figura 3) representam 22,4% e envolvem a construção de protótipos para análise de funcionalidade e de sua forma geométrica, isto é, para análise da aplicabilidade. Dessa análise derivam-se importantes mecanismos para quantificar a matéria-prima a ser utilizada e prever as dimensões e precisões envolvidas no produto.

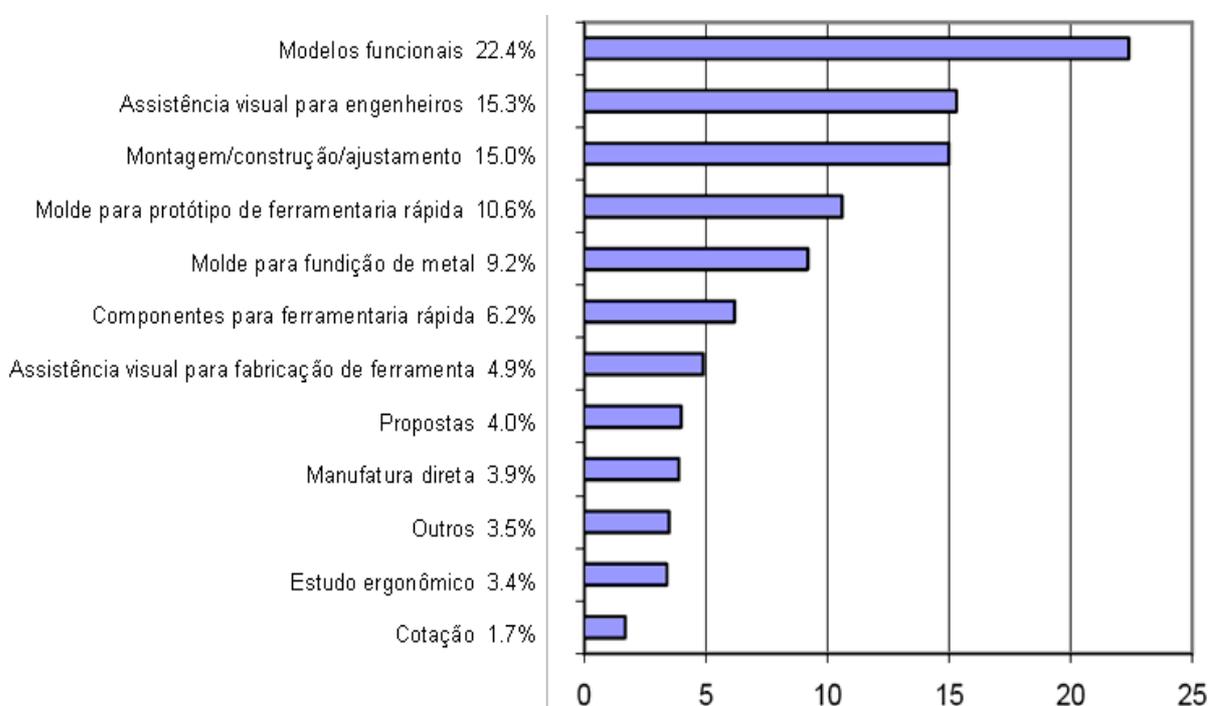


Figura 3 – Uso da SFF (*Solid Freeform Fabrication*) – (WOHLERS, 2003)

Freqüentemente, os protótipos construídos são modelos físicos que servem de assistência visual para a fabricação da ferramenta (4,9%) ou mesmo propostas intuitivas como função de mostruário do produto (4,0%).

Os modelos servem ao estudo ergométrico (3,4%) e também como assistência visual para engenheiros (15,3%). Tais aplicações, somadas, correspondem a 38,7% dos casos de utilização de PR. Nesses casos, a facilidade e a rapidez de construção do protótipo e o seu custo são fatores fundamentais, isto é, a PR só é justificada quando efetivamente facilita a etapa inicial de desenvolvimento de produtos.

A PR é utilizada para satisfazer a exigência de alguns processos, como a fundição sob pressão, que necessita de moldes especiais (9,2%), de componentes para ferramentaria (6,2%) e de molde para protótipos de ferramentaria rápida (10,6%). Nesses casos, o protótipo gerado é o molde, que deve ter alta precisão dimensional, excelente acabamento superficial, adequada resistência ao calor e satisfatória dureza.

Para se obter mais informações sobre as áreas de aplicação da PR indica-se o apêndice B, no qual mesmo exemplificam-se várias aplicações da PR em áreas distintas.

2.2. Visão Geral da tecnologia PR

A etapa inicial para se obter um protótipo envolve a elaboração do desenho, isto é, as representações geométricas do modelo sólido com apoio de um sistema CAD (figura 4). Inicialmente, nesse sistema, tem-se a etapa de concepção do protótipo e a definição de sua forma geométrica (GEUER, 1996), que são armazenadas, em geral, em formato STL⁷.

Os dados geométricos em arquivo representam o protótipo que é, então, “fatiado” com um *software* apropriado, de acordo com a especificação da máquina de PR. As fatias ou camadas do protótipo são verificadas no intuito de corrigir eventuais erros oriundos da fase de desenvolvimento do modelo sólido do protótipo no sistema CAD e, nesta etapa, é feita, se necessária, à correção de falhas onde não ocorre o “fechamento” dos planos de superfície do desenho do modelo sólido do protótipo. Esse tratamento é essencial para a construção do protótipo.

⁷ STL é a abreviação das palavras em inglês “*stereolithography tessellation language*”, o qual é um formato de arquivo, que gera finitos triângulos. Estes triângulos representam toda superfície do modelo, para que o mesmo seja reconhecido, no *software* de fatiamento, por triângulos e fatiado em camadas de espessuras finas.

A seguir define-se a trajetória para processos que necessitam de deslocamentos no eixo X e Y ou somente em X. Tais possibilidades de trajetórias serão discutidas no item 4.2.

Nas etapas finais deste procedimento, obtém-se o protótipo por meio de um dos processos gerativos e que posteriormente poderá necessitar de operações de acabamentos ou pós-processamentos (figura 4).

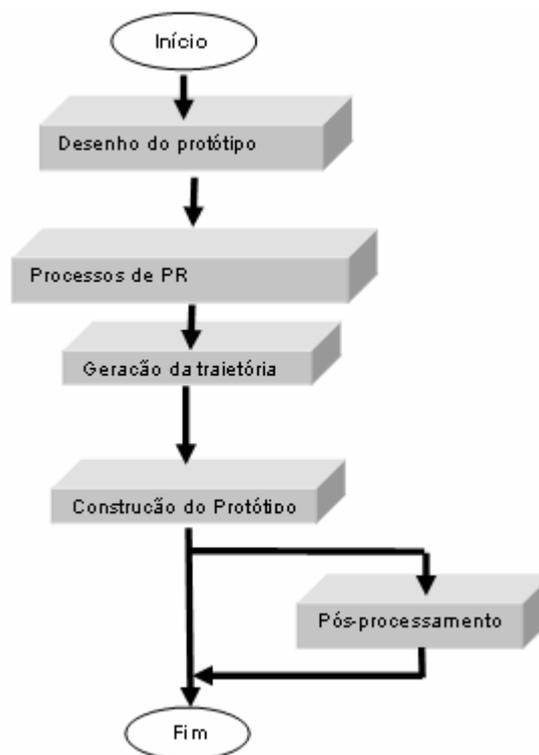


Figura 4 – Principais etapas de utilização de PR – (elaborado pelo autor)

Observa-se que, desde o lançamento da primeira máquina de PR, em 1987, até os dias de hoje, novos processos e novas máquinas têm sido desenvolvidos, de modo que foram apresentadas, na figura 4, as etapas gerais e mais comumente encontradas.

Com base nas etapas de utilização de PR, a seguir, é apresentada a seqüência de trabalho no sistema de PR para se construir um protótipo:

- Modelo no CAD:
- Geração do modelo em 3D no CAD (figura 5A);

- Arquivamento:
 - O arquivo no CAD pode ser armazenado em formato STL (figura 5B), que é uma a forma de entrada muito usada nas máquinas PR.

- Geração da estrutura de suporte:
 - Evitar algum desnivelamento da plataforma;
 - Assegurar que o modelo possa ser fabricado com sucesso;
 - Proporcionar que a base que tem o modelo seja removida facilmente.

- Fatiamento:
 - A peça e a estrutura de suporte devem ser fatiados (figura 5C);
 - A peça é matematicamente seccionada, pelo *software*, em camadas paralelas e horizontais ao longo do eixo Z (figura 5D).
 - Cada secção da camada (figura 5E) é armazenada e suas coordenadas (X e Y), transferidas para posterior elaboração da trajetória.

- Trajetória do (s) extrusor (es) ou do foco do *laser* :
 - Determinação da trajetória do material a ser depositado ou foco do *laser* que, deslocando-se no eixo X, Y ou somente no eixo X, descreverá o perfil da camada seccionada (figura 5F);
 - Seleção da linha com valor de compensação e do fator de contração.

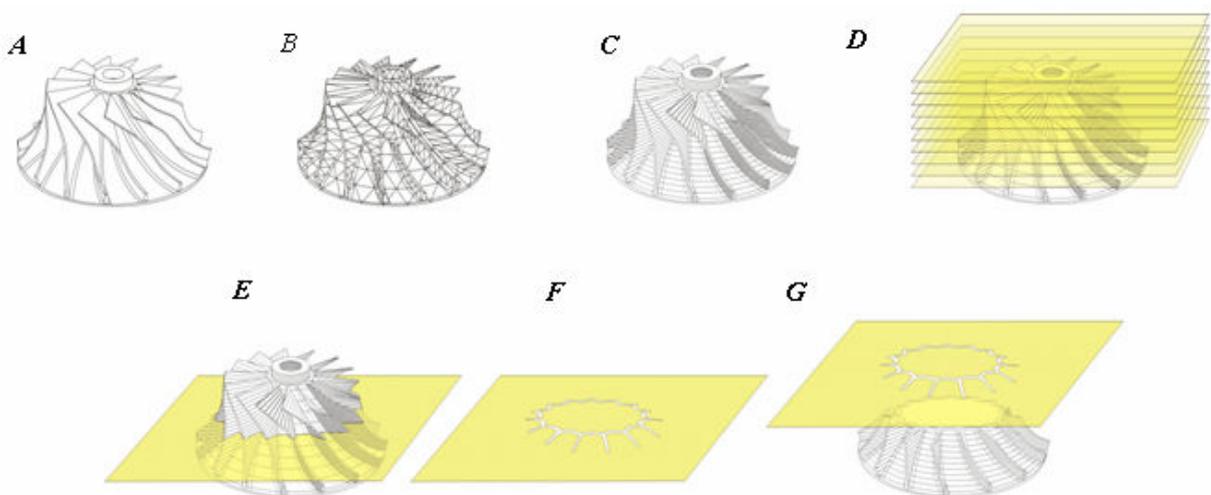


Figura 5 – Seqüência de trabalho no sistema de PR – (elaborado pelo autor)

- Interface – máquina PR:
 - O modelo processado e a estrutura têm seus dados tratados em formatos, como STL (*Stereolithography Tessellation Language*), SLC (*Stereolithographie Contour*), CLI (*Common Layer Interface*), RPI (*Rapid Prototyping Interface*), LEAF (*Layer Exchange ASCII Format*), LMI (*Layer Manufacturing Interface*), HPGL (*Hewlett Packard Graphics Language*). Tais formatos são detalhados no apêndice C.

- Construção do protótipo:
 - A seguir, é construído o protótipo camada por camada (figura 5G);

- Operações posteriores:
 - Retirada de suporte e acabamento usando-se solução concentrada em reservatório.

2.3. Processos de PR

A seguir, far-se-á uma descrição dos materiais empregados no processo de PR, em termos de estados físicos, apresentando-se os principais tipos e agentes. Tal análise possibilitará o entendimento da influência do material nos processos de PR e, conseqüentemente, do aparato necessário para se realizar a transformação do material durante a construção do protótipo.

Indica-se o apêndice D para um conhecimento direcionado para cada tipo de processo no tocante às características de fabricação, funcionais e de aplicação do protótipo em cada sistema de PR.

2.3.1. Classificação dos processos de PR via material

Quando, em 1987, foi lançado no mercado o processo de PR baseado em *stereolithography*, o *laser* era o agente de transformação para polimerizar⁸ um material do estado líquido para o sólido. Hoje é possível a escolha entre cerca de 20 diferentes processos, nos quais o material para construção do protótipo pode estar nos três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) (figura 6). Partindo de diferentes princípios físicos, a técnica de construção de protótipos foi mudada ao longo dos anos (CAND, WELLBROCK, MUELLER, MUELLER, 2002) e os processos de PR podem ser classificados via estado inicial da matéria.

Em geral, os processos de PR transformam o estado físico do material (sólido → líquido ou líquido → sólido) por fusão via *laser*, resistência elétrica ou polimerização, entre outros tratamentos, para construir os protótipos (KÜNSTNER, 2002; GEBHARDT, 2000; CAND, WELLBROCK, MUELLER, MUELLER, 2002). Na figura 6, observa-se que a característica do material rege o agente de transformação (*laser*, resistência elétrica), de modo que máquinas de PR podem trabalhar com resinas termoestáveis, utilizadas nos processos via *laser* (*stereolithography*), como pós-metálicos e não-metálicos (*laser sinter*), ou termoplásticos (*Fused Deposition Modeling*) entre outros.

Devido à transformação física envolvida, esses processos exigem dispositivos especiais, como o *laser*, para transformar o estado físico do material, e equipamentos embarcados nas máquinas, para tratar, por exemplo, gases produzidos durante a fusão do material devido ao efeito do uso do *laser*. Além disso, o *laser*, como elemento de transformação dos materiais, requer um controle preciso do foco (KRAUS, 1997) (WOLF, 2003) e também dos parâmetros operacionais (velocidade de deslocamento, profundidade do foco na resina, espessura da camada, etc) assim como da potência, para fundir a resina ou o metal (MUNHOZ, 1997). Tais obstáculos, de maneira geral, encarecem o processo de PR.

⁸ É transformar, via reação química, um polímero.

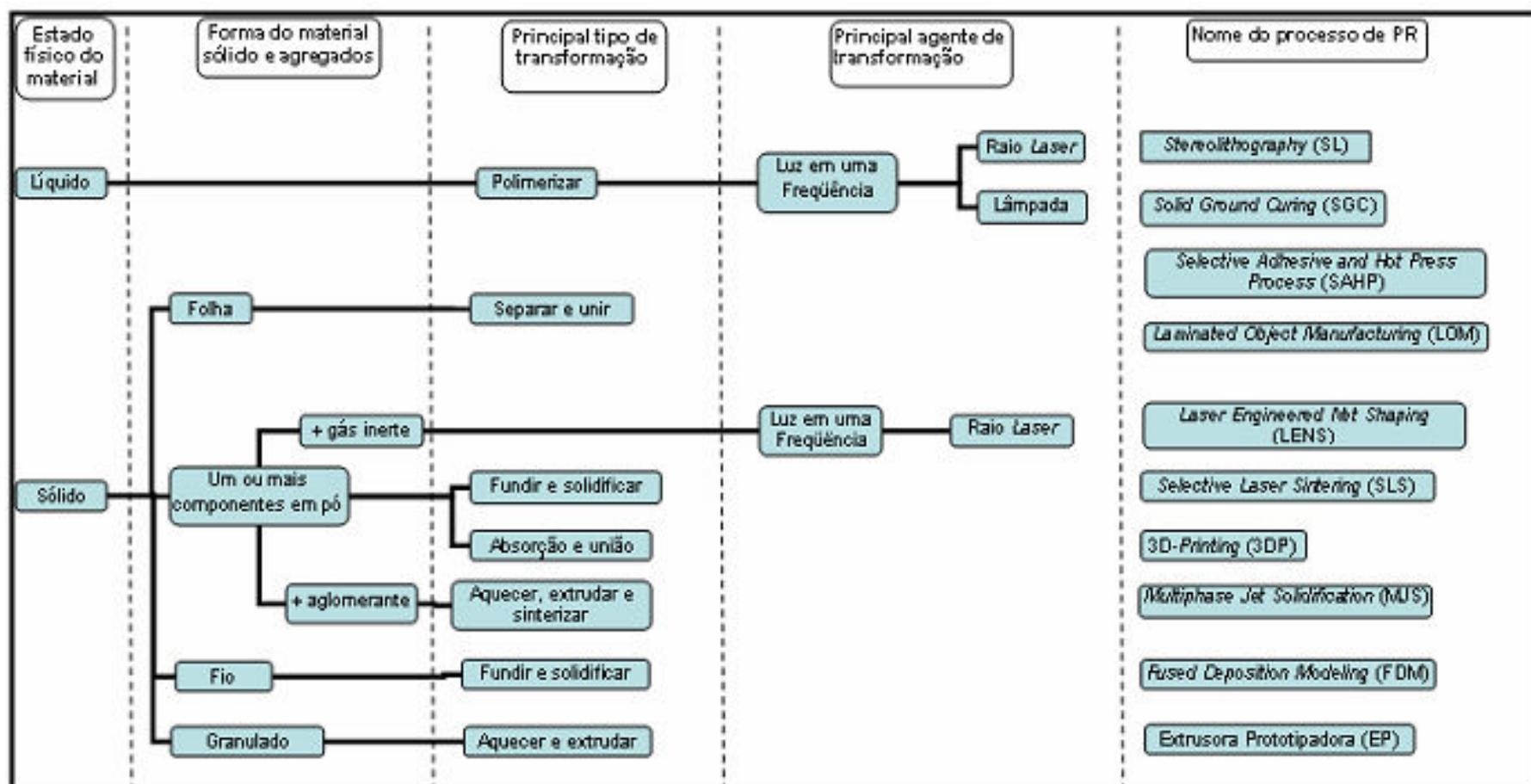


Figura 6 – Classificação de alguns processos de prototipagem rápida via estado da matéria usada na construção do protótipo, adaptada de Gebhardt, 2000

2.3.2. Materiais utilizados na PR

Os processos de PR usam materiais não metálicos ou metálicos na construção do protótipo. Nota-se, na tabela 1, que vários processos utilizam o *laser* ou a resistência elétrica para transformar material plástico, papel, metal, entre outros, para se fabricar protótipos. O material plástico pode ser transformado via *laser*, como no processo denominado *Laser sinter*, no qual o pó plástico é fundido. Já a resina líquida é polimerizada, via processo *Stereolithography*, e transformada em material sólido.

Tabela 1 – Tecnologias de PR e a forma de transformação da matéria – (elaborado pelo autor)

	Sistema	Sigla	Forma de transformação da matéria
Stereolithographie (SL)	<i>Stereolithography Apparatus</i>	SLA	A resina líquida é curada por meio de uma fonte <i>laser</i> .
	<i>Stereos</i>	-	
	<i>Stereolithographie</i>	F & S	
	<i>Solid Ground Curing</i>	SGC	
	<i>Microstereolithographie</i>	-	
Laser – Sinter (LS)	<i>Selective Laser-Sinter</i>	SLS	A resina plástica em pó é sinterizada por meio de uma fonte <i>laser</i> ;
	<i>Laser-Sinter</i>	LS	Areia impregnada com resina e sinterizada por meio de uma fonte <i>laser</i> ; Sinterização de pós-metálicos por meio de uma fonte <i>laser</i> .
Layer Laminate Manufacturing (LLM)	<i>Laminated Object Manufacturing</i>	LOM	Lâminas de papel especial, superpostas, coladas e recortadas por meio de uma fonte de <i>laser</i> ; Folhas planas de papel comum superpostas, coladas e recortadas com estilete.
	<i>Rapid Prototyping System</i>	-	
	<i>Selective Adhesive and Hot Press Process</i>	SAHP	
	<i>JP Systems 5</i>	-	
	<i>Layer Milling Process</i>	LMP	
	<i>Stratoconception</i>	-	
	<i>Stratified Object Manufacturing</i>	SOM	

Continuação da tabela 1

	Sistema	Sigla	Forma de transformação da matéria
Fused Layer Modeling (FLM)	<i>Fused Deposition Modeling</i>	FDM	Deposição de uma camada plástica de resina.
	<i>Multiphase Jet Solidification</i>	MJS	
	<i>3D-Plotter</i>	-	Deposição de um termopolímero em camadas, como a impressora jato de tinta.
	<i>ModelMaker</i>	-	
	<i>Multi Jet Modelling</i>	MJM	
Three Dimensional Printing (3DP)	<i>Rapid Prototyping System</i>	-	Utiliza-se aglutinante que é aspergido sobre pó plástico ou cerâmico; Outra possibilidade é usar resina foto sensível como aglutinante sob o material. Essa resina, sob o material, é, em seguida, curada sob luz ultravioleta.
	<i>Rapid Tooling System</i>	-	
	<i>Direct Shell Production Casting</i>	DSPC	
Laser – Generation (LG)	<i>Laser Engineered Net Shaping (Optomec) ou Laser Cladding</i>	LENS	Fusão e deposição de pó de aço por meio de uma fonte <i>laser</i> .

Ao analisar os resultados dos critérios quantitativos dos processos de PR para a geração do protótipo, (tabela 2), observa-se que, nos processos de PR que usam o raio ultravioleta (família *Stereolithography*, *Laser Sinter* e *Layer Laminate Manufacturing*) há um maior número de parâmetros para controle do *laser*. Isso limita a reprodutibilidade dos parâmetros, pois o controle desses parâmetros, como o foco, a velocidade de varredura, o comando e o controle do processo, é difícil e influencia o resultado do processo, devido também à natureza do material (FINKE, FEENSTRA, 2002) (CHANG, 2004).

Essas variáveis dificultam a otimização do processo de construção. São vantajosos, portanto, os processos via *Fused Layer Modeling* (FLM), que não se baseiam no uso do *laser* para a geração do protótipo. Esse é o caso do FDM, que é um processo de PR que, em relação aos processos SLA e SGC via *Stereolithography*, SLS via *Laser Sinter* e LOM (via *Layer Laminate Manufacturing*), apresenta menor número de restrições técnicas à eficiência de rendimento do *laser* ou do diâmetro do foco durante o processo de construção do protótipo.

Tabela 2 – Processos de PR quanto à qualificação, baseado em Ebenhoch (2001)

Família	Stereolithography		Laser Sinter	Layer Laminate Manufacturing	Fused Layer Modeling	
	SLA	SGC	SLS	LOM	FDM	MJM
Presente no mercado	●	○	◐	◐	◐	◐
Custos	◐	◐	◐	◐	◐	●
Rugosidade	●	◐	◐	◐	◐	○
Escalonamento	●	●	◐	◐	◐	◐
Variedade de material	◐	○	●	○	◐	◐
Parâmetro do processo	○	◐	◐	◐	●	◐
Característica mecânica	◐	◐	◐	◐	●	◐
Efeito da contração	◐	◐	●	○	◐	◐
Material do protótipo	○	○	●	◐	●	◐

○ NÃO APROPRIADO; ◐ POUCO APROPRIADO; ◑ APROPRIADO COM RESTRIÇÕES;
 ◒ APROPRIADO; ● MUITO APROPRIADO.

Especificamente o processo SLS (família *Laser Sinter*), embora apresente alto potencial de uso, é aplicado, principalmente, na geração de protótipos metálicos devido à grande variedade de material.

De forma mais específica, as características avaliadas na prototipagem rápida e apresentadas na tabela 2 são as seguintes:

- Presença no mercado: considera-se o número de equipamentos vendidos desde o início da comercialização de cada processo;
- Custos: valores gastos com materiais e equipamento;
- Variação dimensional: compararam-se as tolerâncias dimensionais resultantes no contorno da peça, em relação aos eixos X e Y, com as do contorno do projeto do produto;

- Escalonamento: é o deslocamento do bico extrusor do dispositivo extrusor ou foco do *laser* na direção do eixo Z;
- Variedade de material: para cada processo analisado, verificou-se a possibilidade de usar materiais diferentes, tais como termoplástico e/ou material metálico, entre outros;
- Parâmetros do processo: verificou-se a quantidade de parâmetros operacionais para controle do *laser* ou temperatura de fusão e a influência das características do material;
- Característica mecânica: avaliou-se o alongamento do protótipo via tensão;
- Dimensão: avaliou-se a contração e a deformação do material em função das dimensões em X, Y e Z;
- Material do protótipo: avaliou-se a durabilidade do protótipo em função do tempo. Pelo exposto, nota-se que, embora grandes avanços técnicos tenham sido obtidos, por diferentes processos de transformação do estado físico do material, não foram identificados trabalhos sobre processo de PR à temperatura ambiente de materiais alternativos, que não necessitam de transformação física.

Em outras palavras, o potencial dos materiais com cura e com certas características mecânicas não tem sido devidamente explorado para a construção de um protótipo. Além disso, em função de, em princípio, não serem necessários dispositivos especiais, os custos também devem ser menores se comparados com os custos envolvidos nos processos estudados anteriormente, de modo específico na utilização de materiais de baixo custo, pois os materiais trabalhados nesses processos são, de maneira geral, importados, tornando-se caros e, conseqüentemente, de difícil obtenção.

De qualquer modo, independentemente do processo considerado, os protótipos construídos devem ser avaliados por suas características operacionais: custo de

material, potencialidade de aplicação na indústria ou na área educacional, precisão dimensional, tempo de cura, tempo de preparação e consumo de energia.

Além desses aspectos, a máquina de PR deve ser de simples construção e ter dimensões reduzidas, possibilitando seu uso em qualquer ambiente e para aplicações específicas.

3. Proposição de processo de PR via Modelagem por Deposição sob Temperatura Ambiente (MDTA)

Neste capítulo, serão apresentados os critérios para a seleção do material cujo estado físico será transformado sob temperatura ambiente e, posteriormente, analisam-se os aspectos de aderência e tempo de cura. Tais informações serão observadas nos experimentos qualitativos e, em seguida, nos experimentos quantitativos.

Conforme verificado no capítulo 2, os processos de PR transformam o estado físico do material (sólido → líquido ou líquido → sólido) por fusão via *laser*, resistência elétrica ou polimerização durante a construção de protótipos. Esses processos exigem sistemas de tratamento de gases, de proteção e de refrigeração, entre outros. Diante dessas observações, pesquisaram-se materiais à base de sulfato de cálcio e de carboidrato, com os quais realizaram-se experimentos sob temperatura ambiente até se chegar a um novo processo para construir um protótipo visual, via modelagem por deposição sob essa condição, com baixo custo.

Para a seleção dos materiais, inicialmente consideram-se o processamento sob temperatura ambiente, a cura⁹ e a capacidade de aderência entre as camadas, que é uma característica importante nos processos via modelagem por deposição. Também foram considerados aspectos como o baixo custo e a atoxidade do material, entre outros. Com isso, buscou-se há possibilidade de construir protótipos visuais e funcionais.

Baseados nas características, descritas acima, foram selecionados os seguintes materiais: compósito à base de complexo de carboidrato e compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico.

⁹ É um processo que representa uma mudança nas propriedades físicas de um material (normalmente líquido para sólido), mediante reação química, ação de calor, catalisadores ou agentes de cura, isolados ou em combinação.

3.1. Verificação da aderência entre camadas

A aderência entre camadas é um aspecto fundamental nos processos de PR. Especificamente nos processos via *Fused Layer Modeling* (FLM), a aderência entre camadas é obtida por fusão do material (figura 7). Essa forma de transformação necessita o controle da temperatura do ambiente em que ocorre a fusão, no qual o protótipo é construído (WEITZEL, 2003) (KÜNSTNER, 2002).

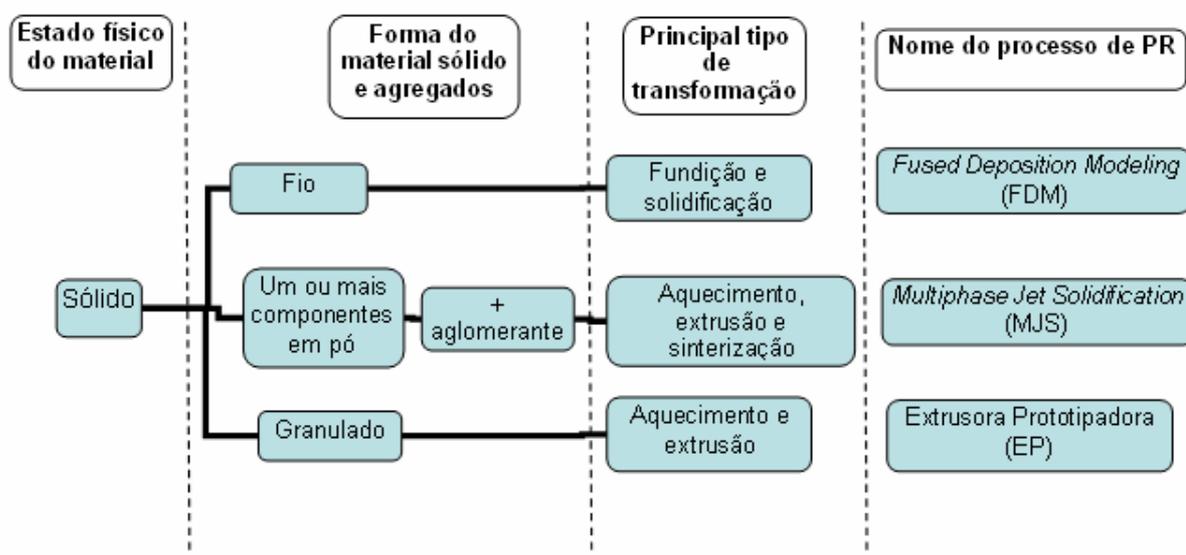


Figura 7 – Estado da matéria-prima para alguns processos de PR via *Fused Layer Modeling* (FLM) – (elaborado pelo autor)

Para verificação da aderência entre as camadas, foram, assim, considerados materiais potenciais que mudam seu estado físico à temperatura ambiente.

O experimento inicial realizado foi depositar o material, manualmente, em camadas uma sobre as outras e verificar, após a cura, se ocorre ou não a aderência entre as camadas.

Por meio dos resultados do uso tanto do compósito à base de complexo de carboidrato (figura 8-a) quanto o compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico (figura 8-b), observou-se após a cura que ocorre aderência de camadas

umas sobre as outras. A espessura e a altura da camada têm 0,64 mm¹⁰, correspondente ao diâmetro do bico extrusor.

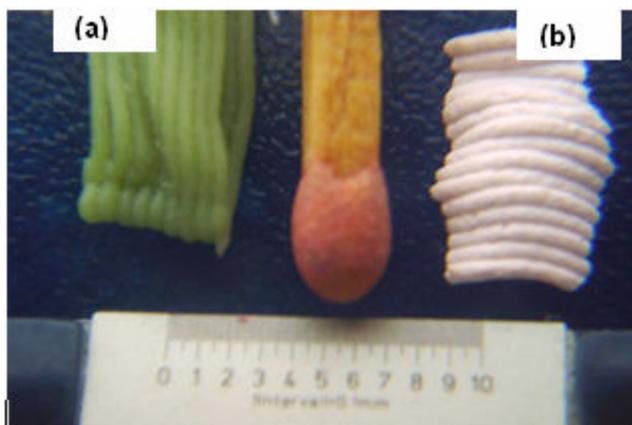


Figura 8 – Detalhe da grandeza geométrica da espessura da camada aderida: (a) – compósito à base de complexo de carboidrato, (b) – compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico – (elaborado pelo autor)

As características avaliadas nos experimentos realizados são consideradas como um indicativo concreto de uso desses materiais na construção de protótipos, o que define uma nova ramificação (figura 9) dos processos de PR baseada em deposição de material sem aquecimento, ou seja, sob temperatura ambiente.

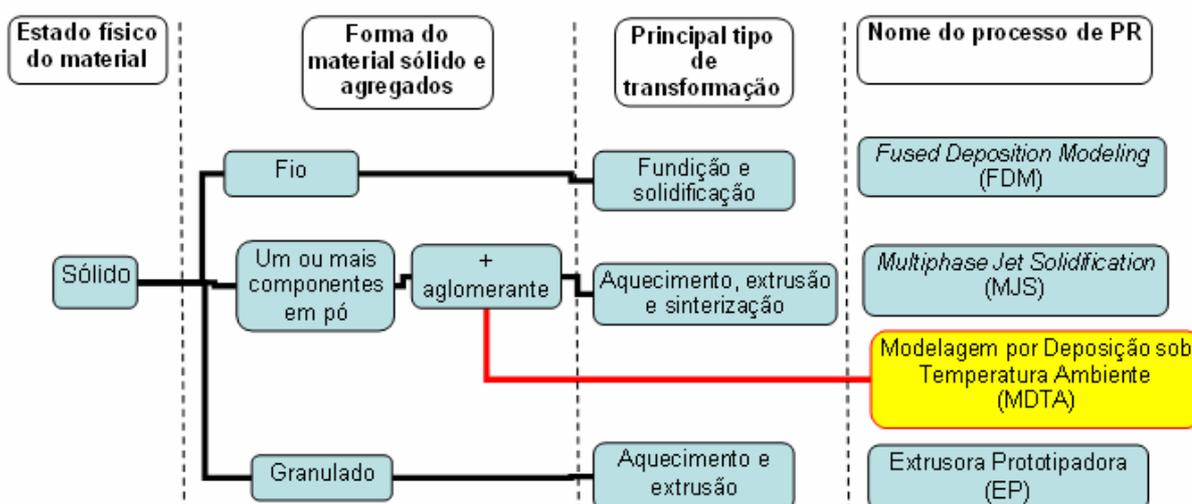


Figura 9 – Estado da matéria-prima para alguns processos de PR via *Fused Layer Modeling* (FLM) com ramificação proposta – (elaborado pelo autor)

¹⁰ Esse valor corresponde ao diâmetro do bico lido via microscópio óptico (ampliação de 82x).

3.2. Características de cura dos materiais selecionados para construção de protótipos

Na figura 10, têm-se os detalhes das camadas construídas com os materiais selecionados. Nota-se que as camadas do compósito à base de complexo de carboidrato (figura 10 - a) ficaram mais uniformes que as do compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico (figura 10 - b). Isso ocorre, pois o compósito à base de complexo de carboidrato é mais homogêneo que o do compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico e também devido ao tempo de reação química de cada material tanto dentro quanto fora do dispositivo. Além disso, Bellini, Shor e Guceri (2005) constataram que a cerâmica ocasiona entupimento do bico extrusor interrompendo o fluxo de material e Tseng e Tanaka (2003) verificaram que o tempo de cura da matriz polimérica de cerâmica é abreviado sob temperatura ambiente.

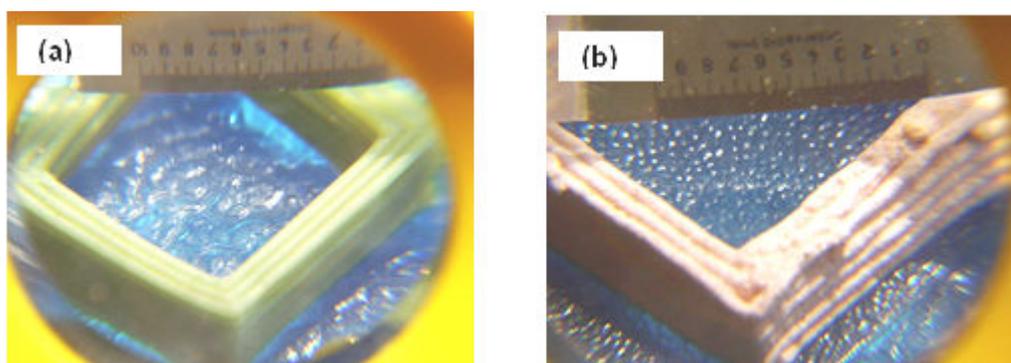


Figura 10 – Detalhe das camadas: (a) — compósito à base de complexo de carboidrato, (b) – compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico – (elaborado pelo autor).

O período de transformação do estado pastoso para o sólido foi determinado via tempo de consistência¹¹ de 25 min para o compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico, de modo a não ser possível gerar protótipos maciços, pois necessita-se de 3 min para o preparo do compósito e de 2 min para confinar o compósito dentro do cilindro e fixar, via rosca, o bico extrusor no cilindro.

¹¹ Critério desenvolvido pelo autor: a consistência física do compósito foi obtida ao ser solicitado por compressão, usando um bloco (20gr) de metal, emulando-se assim o peso correspondente a várias camadas sobrepostas do mesmo compósito. Usando-se uma lupa de ampliação 20x, observa-se que ocorreu deformação visual imperceptível.

Na preparação da máquina, dispense-se em torno de 1 min, para determinar a distância ideal do bico extrusor até a face da superfície de deposição do material. É necessário ressaltar ainda que, desde o preparo do material até o início da deposição o compósito tende a obter consistência por reação química, dentro do cilindro, o que impossibilita a construção de várias camadas para se fabricar o protótipo maciço. Com base nessas características, torna-se necessário, portanto, desenvolver um dispositivo apropriado para realizar a deposição do compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico.

Para o compósito à base de complexo de carboidrato, o tempo de cura foi de 24 horas, levando-se em consideração a temperatura ambiente de 25°C. Com esses resultados, é vantajoso usar esse compósito na construção de protótipos que necessitam ser fabricados em períodos longos.

Por fim, a constatação de aderência entre as camadas dos materiais pesquisados, que podem ser trabalhados sob temperatura ambiente, e o conhecimento preliminar das características de cura do compósito são indícios para o uso dele na construção de protótipos.

Antes, porém, foi necessário a construção de um dispositivo (capítulo 4), para extrudar os materiais (compósito à base de complexo de carboidrato e o compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico), na forma de pasta, e proceder à modelagem do sistema extrusor (capítulo 5) e à investigação dos aspectos qualitativos (capítulo 7) e das grandezas operacionais quantitativas (capítulo 8).

4. Características dos processos e dispositivos na *Fused Layer Modeling* (FLM) e dispositivo extrusor da MDTA

*Neste capítulo apresentam-se as características dos aparatos, dos dispositivos e dos processos *Fused Layer Modeling* (FLM). Com base nessas características, será desenvolvido o projeto do dispositivo extrusor usado no MDTA para se extrudar o compósito à base de carboidrato e para, no capítulo 5, realizar a modelagem dos parâmetros operacionais a serem utilizados nos experimentos qualitativo e quantitativo.*

4.1. Características dos dispositivos extrusores – processos *Fused Layer Modeling* (FLM)

O estado da matéria e as características intrínsecas do material (DOMININGHAUS, 1998) (SCHRAMM, 2006) determinam as características do processamento (MANRICH, 2005) e do tipo de aparato e dispositivo para realizar a mudança de estado da matéria. Para essa transformação, nos processos de PR, utilizam-se diferentes técnicas e, basicamente, dois elementos de transformação que são o *laser* ou a resistência elétrica, os quais influenciam, diretamente, os parâmetros de preparação, de operação, de construção e o produto final do protótipo.

O conhecimento dos processos de PR por deposição, especificamente dos processos *Fused Layer Modeling* (FLM) e as características construtivas dos dispositivos desses processos devem ser analisados para servir de base de construção do dispositivo extrusor no processo MDTA. Para tanto são descritos abaixo os processos da família FLM.

4.1.1. Three Dimensional Printing (3DP)

Nesse processo, a máquina espalha, sobre a superfície da plataforma, uma camada de pó contido na caixa da alimentação, por meio de um pistão, que se movimenta na direção Z (figura 11). O sistema, então, injeta, por meio de um cabeçote tipo jato de tinta (cabeçote de aquecimento), um aglutinante, que é expelido em gotículas.

O jato aglutinante é absorvido pela camada depositada, dando forma à primeira camada. O pó não aglutinado suporta as camadas que serão impressas acima de outras. Para a formação da segunda camada e das subseqüentes, o pistão movimenta-se na direção Z e uma nova camada de pó é espalhada sobre superfície. O processo é repetido até a completa deposição de todas as camadas e, finalmente, o pistão é içado e o pó não absorvido é retirado.

Nesse processo, há necessidade de limpeza, após o trabalho, do aglutinante impregnado nos bicos para evitar entupimento dos mesmos. Além disso, o controle de deposição do aglutinante deve garantir velocidade de deposição sem variação, evitando assim que o aglutinante seja espalhado em excesso ou insuficientemente, na largura e na espessura da camada, o que altera as medidas no protótipo (GEBHARDT, 2000), (EBENHOCH, 2001) (BIRKE, 2002)

4.1.2. Multiphase Jet Solidification (MJS)

Na figura 11, apresenta-se o princípio básico do MJS, que é extrudar material metálico e cerâmico de alta densidade, fundido por um bico. O material usado é constituído de pó, aglutinante e mistura, sendo que somente o aglutinante é fundido durante o processo. O material é aquecido acima do ponto de fusão do aglutinante.

Um pistão desloca a mistura para ser injetada por um bico injetor. Há necessidade de câmara de aquecimento e a temperatura de extrusão varia de 0°C até 200°C. A temperatura da câmara deve ser de aproximadamente 1°C. A câmara também pode

receber mais material por meio de um sistema de reservatório especial para admitir matéria-prima preparada. Nesse processo, deve haver área de construção para minimizar a variação da temperatura da atmosfera do envelope e proporcionar seu controle.

Na transmissão por correia, no processo MJS, ocorre escorregamento. Isso faz variar a velocidade de deslocamento do parafuso e, conseqüentemente, a velocidade de deposição, acarretando irregularidades na largura e na espessura da camada (GREULICH, GREUL, PINTAT, 1995).

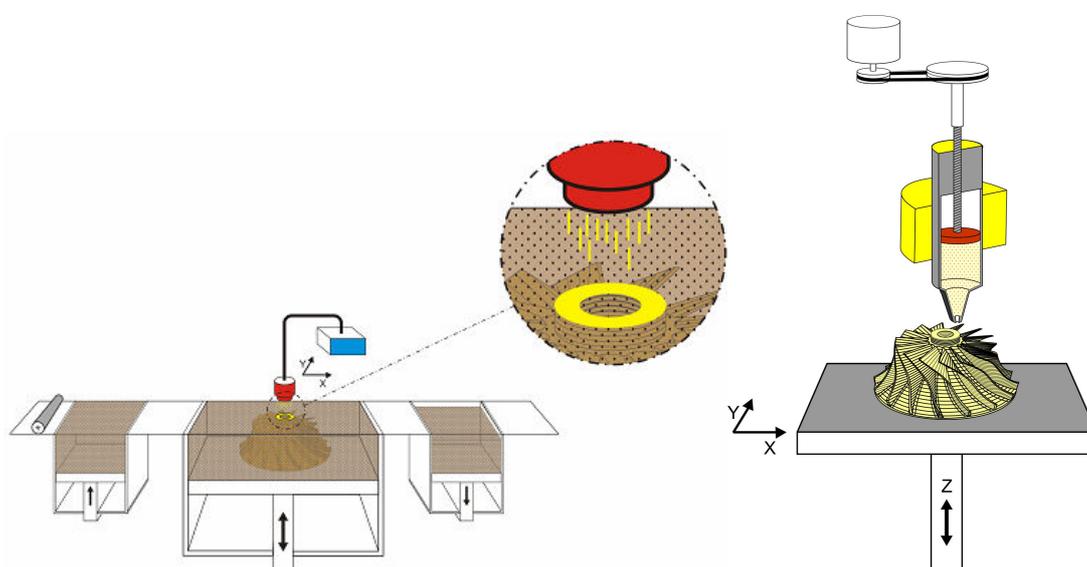


Figura 11 – Esquemas simplificados das máquinas *Three Dimensional Printing* (3DP) e *Mult Jet Solidification* (MJS), adaptadas de Greulich, Greul, Pintat, 1995.

4.1.3. *Mult Jet Modeling* (MJM)

O protótipo é fabricado sobre uma plataforma (figura 12). A cera termoplástica é fundida e depositada pelo injetor (cabeçote de pressão), que tem 96 pontos de saída para extrusão. A plataforma movimenta-se em X e Y (deslocamento horizontal), de acordo com a geometria da camada. Para se gerar a camada seguinte, a plataforma desloca-se na direção Z (deslocamento vertical), com certa dimensão para se depositar as demais camadas. Nesse processo, o controle da temperatura para fundir a cera deve garantir consistência apropriada e, assim, evitar que o material seja espalhado em excesso ou insuficientemente, influenciando na largura e na

espessura da camada, o que alterava as medidas no protótipo (GEBHARDT, 2000), (EBENHOCH, 2001) (BIRKE, 2002).

4.1.4. Extrusora Prototipadora (EP)

Na máquina EP (figura 12), o termoplástico é extrudado pelo parafuso de movimento e depositado, camada por camada, através de um bico extrusor com 0,5 mm diâmetro sobre uma mesa. A máquina é de 2 ½ eixos, de modo que os eixos x e y param ao se descer a mesa.

Nesse processo, o material é extrudado de forma contínua. Isso pode ocasionar depósito de material excedente; ocorre mudança das características físicas do material ainda no parafuso devido o contato com outro material; pressão não constante durante a fluidez do material. Há ainda a necessidade de otimização da trajetória do bico extrusor, durante a deposição do material, devido à dificuldade para controlar o acionamento e a interrupção do depósito de material, embora esses procedimentos sejam rápidos.

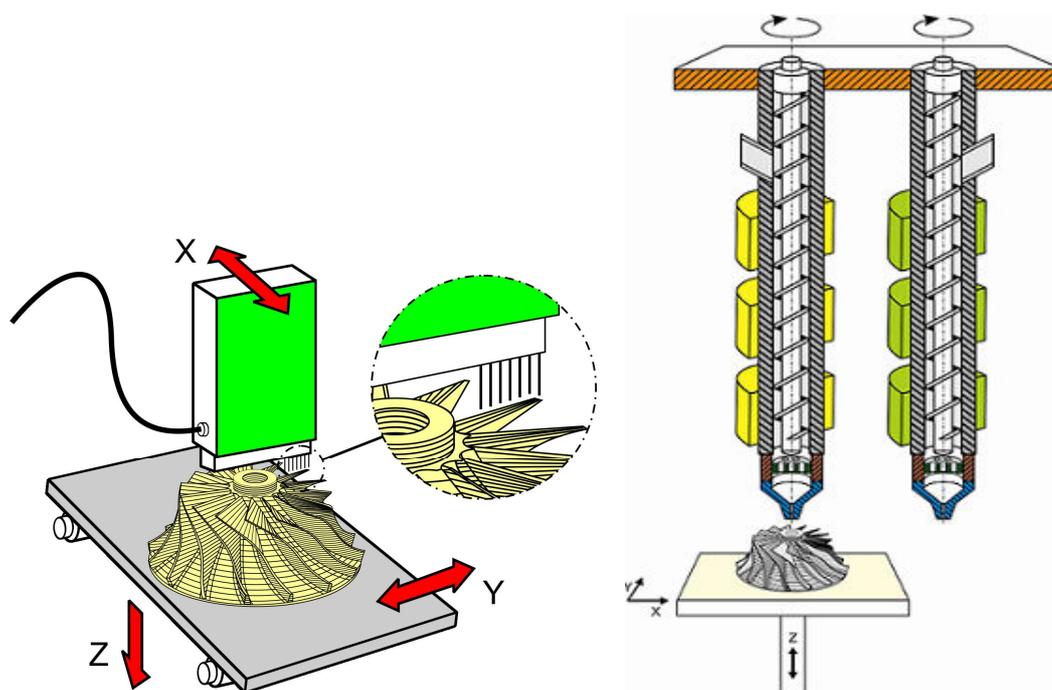


Figura 12 – Esquemas simplificados das máquinas: *Mult Jet Modeling* (MJM), adaptada de Gebhardt (2000) e de Birke (2003) e Extrusora Prototipadora (EP) – (elaborado pelo autor).

4.1.5. Sanders ou Inkjet Modeling

Esse sistema de prototipagem baseia-se em um extrusor *plotter*, o qual transforma o material de estado sólido para o líquido (figura 13). O extrusor tem dois cabeçotes, sendo um para depositar o termoplástico (C), que é o material de construção do protótipo, e outro para depositar cera para a confecção do suporte, de saliências e de cavidades (I) durante o ciclo de construção, de modo a proporcionar diferenciação entre ambos.

Os cabeçotes extrusores para depositar material de construção e de suporte constroem substrato, assim como espaços uniformes (chamados “*micro-droplets*”). Esses *droplets* podem ser localizados em algum local desejado acima do substrato de construção dentro de 0,007 mm na direção do eixo X e Y. Após a deposição, uma usinagem com fresa é feita na direção Z com precisão de 0,013 mm.

A velocidade do *plotter* na direção Z não é constante, de modo a haver variação de acabamento da superfície fresada e, conseqüentemente, no acabamento superficial da camada, o que influencia na deposição de outra camada. O acabamento final do protótipo se dá com imersão em solvente para diluir a cera do suporte e lavar o protótipo para posterior uso na fundição em casca, sem necessidade de etapas de operações posteriores (GEBHARDT, 2000).

4.1.6. Fused Deposition Modeling (Stratasys)

Nesse caso, assim como na EP, os modelos são construídos por deposição de camadas, uma sobre a outra, com uso de um material termoplástico fluidificado por aquecimento que é extrudado, para a construção das camadas da fatia do protótipo.

Para a máquina abaixo (figura 13), o material termoplástico usado apresenta-se inicialmente em forma de fio e é injetado por meio de um bico extrusor com

diâmetro¹² com variação decimal de mm. Esse material é depositado por um cabeçote extrusor a uma temperatura controlada para aquecê-lo, até chegar ao estado pastoso.

O cabeçote extruda e deposita o material em camadas sobre uma base de baixa aderência, ou seja, material para suporte. O material é posicionado precisamente sobre as camadas já extrudadas e então é solidificado. É necessária a construção de proteção, em muitos casos, devido à fusão do material.

À medida que os roletes se desgastam devido ao uso, ocorre o escorregamento do material entre eles, o que faz variar a velocidade de deposição e, conseqüentemente, o aparecimento de irregularidades na largura e na espessura da camada (GEBHARDT, 2000), (EBENHOCH, 2001) (BIRKE, 2002).

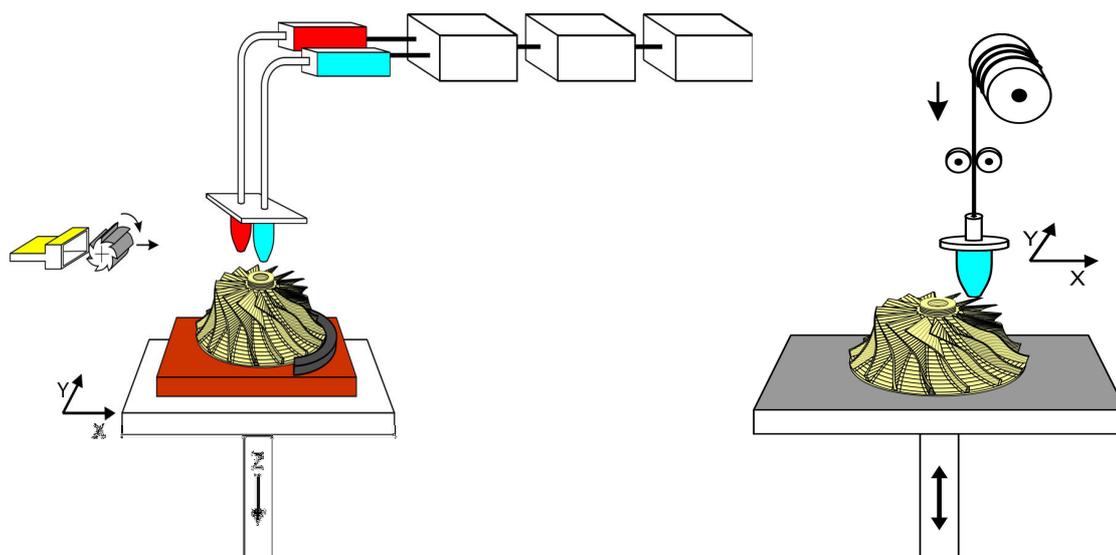


Figura 13 – Esquemas simplificados das máquinas *Sanders* ou *Inkjet Modeling* e *Fused Deposition Modeling* (FDM), adaptadas de Gebhardt (2000), Ebenhoch (2001) e Birke (2003).

4.2. Dispositivo extrusor da MDTA

Apoiando-se nas características dos processos descritos, observa-se que a forma construtiva do dispositivo deverá realizar o processamento de deposição do

¹² O valor do diâmetro varia de acordo com o modelo e porte da máquina FDM.

compósito à base de carboidrato na forma pastosa, via sistema de extrusão contínua de material em forma de filamentos, como no FDM, EP, MJS e *Sanders*. Assim, descartando-se os processos 3DP e MJM, pois o conceito de deposição destes últimos baseia-se em multi deposições de material.

No processo FDM, em que o material está no estado sólido e em forma de fio, utilizam-se rolos para empurrar o material para dentro do cabeçote extrusor, processo de extrusão que também é realizado na EP usando-se parafuso, pois o material encontra-se na forma granulada. Já no sistema *Sanders*, o *plotter* composto por dois extrusores transformam a cera, inicialmente no estado sólido em líquido. Para o aplainamento da camada depositada, usa-se a operação de fresamento para aplainamento da superfície de cada fatia plotada.

No sistema MJS, o parafuso extruda o material, que é composto por aglutinante (líquido), termoplástico ou metal (pó), que adquirem a forma pastosa, similar à do compósito à base de carboidrato. Em virtude de tal semelhança, essa estratégia será utilizada para projetar o dispositivo da MDTA. Embora não se tenha informações dos componentes mecânicos, tais como motor elétrico, relação de transmissão, pressão de trabalho, entre outros, sabe-se que o sistema de transmissão por correia é deficiente para manter a velocidade de deposição constante. Logo, no dispositivo da MDTA será utilizada a transmissão por engrenagens.

Em relação aos processos da família FLM, outro aspecto importante a ser considerado no projeto do dispositivo é a trajetória realizada para construir cada camada do protótipo (ASIABANPOUR, KHOSHNEVIS, 2004), (YARDIMCI, GUCERI, 1996). Na figura 14, por exemplo, observa-se que existem duas possibilidades de geração da trajetória para se construir um protótipo, quais sejam:

a) Trajetória com deslocamentos da mesa na direção dos eixos X e Y: nessa situação, há necessidade de definir deslocamentos para processos via deposição, tais como FDM, MJS, EP e *Sanders*, nos quais o bico extrusor não repete o

deslocamento na mesma camada, evitando-se assim o acúmulo de material (AHN *et al*, 2002). Já para os processos SLA, F&S, SLS, LS, LENS, LOM e SAHP, os quais usam *laser* focado sobre uma superfície, não existe acúmulo de material, pois não ocorre depósito de material e é imediata a interrupção da ação do *laser* sobre a superfície.

b) Nos processos MJM e 3DP (figura 14) a trajetória com deslocamentos da mesa é realizado na direção dos eixos X. Nesse caso, os bicos injetores cobrem o campo de atuação da camada, de modo a não serem necessários deslocamentos no eixo Y. O controle do depósito do material é feito pela interrupção de injetores ao ser deslocado no eixo X, para que não ocorra acúmulo de material na mesma camada.

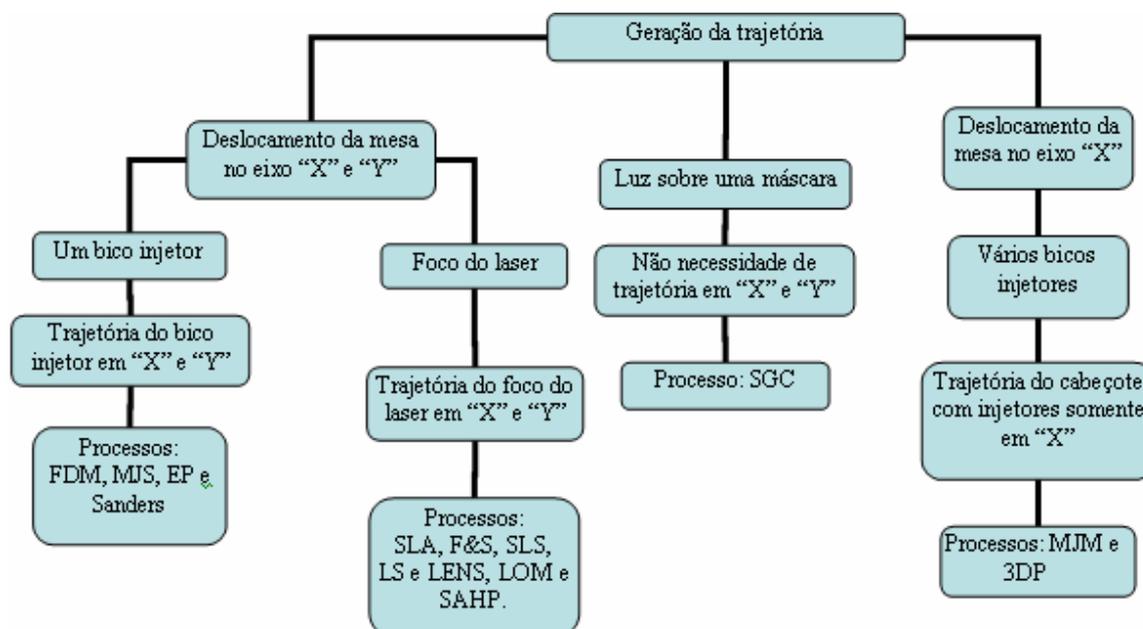


Figura 14 – Diferentes estratégias de trajetórias – (elaborado pelo autor).

No processo SGC (figura 14), a construção do protótipo é realizada pela ação da lâmpada sobre uma máscara, que foi previamente gerada com a forma da camada, de modo a não se necessitar de deslocamentos tanto no eixo X quanto no eixo Y.

A estratégia para trajetória em X e Y envolve a construção de cada camada do protótipo com um material que é depositado através de bico (s) extrusores (es) ou foco do *laser*. Nesse contexto, a trajetória do injetor é calculada considerando-se as características do material – isto é, se ele é sólido, fluidificado ou em pó –, assim com

do processo de transformação física utilizado, por exemplo, fusão via laser ou resistência elétrica, etc. Estes são alguns dos fatores que influenciam a estratégia de deslocamentos na direção X e Y do extrusor no processo de deposição de material, que pode ser, por exemplo, em forma de fio (FDM), em forma de pasta (MJS) ou em forma de grãos (EP).

4.2.1. Croqui do dispositivo extrusor

A figura 15 mostra em perspectiva o dispositivo extrusor¹³ de matéria-prima alternativa sob temperatura ambiente para se extrudar filamentos e fabricar um protótipo, camada a camada, via deposição de material.

Conforme o que ilustra a figura 15, o dispositivo extrusor consiste em um corpo (3), no qual é montado um cilindro reservatório (4) e também as guias de deslocamentos lineares (5), que guiarão o redutor de velocidade (2) a fim de comprimir o bico pressionador (9) contra o êmbolo (6) e este contra a matéria-prima confinada no cilindro reservatório¹⁴ (4) para que esta seja extrudada.

Ainda no corpo (3), tem-se montada uma bucha roscada (7) para atuar como suporte ao parafuso de movimento (8) para que este direcione o deslocamento advindo do redutor de velocidade, unido pelo acoplamento (13), ao bico pressionador (9), usado para deslocar o êmbolo (6) contra a matéria-prima alternativa. A matéria-prima, ao ser pressionada contra o êmbolo (6), gera pressão. Para reduzi-la, usou-se uma esfera (11) entre esses dois elementos.

O fim de curso do parafuso de movimento (8) é controlado por um sensor (10) que emite um sinal para desligar o motor (1) e assim efetuar-se a troca do cilindro reservatório (4) vazio.

¹³ Dispositivo patenteado. Tal patente foi elaborada pelo autor e registrada no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob código: PI 0602546-3.

¹⁴ Nele o material é confinado e, sob pressão, um filamento cilíndrico é extrudado através de um bico de diâmetro de saída igual a 0,64mm.

O motor (1) é acionado por uma fonte variável, que permite o ajuste da tensão, a qual rege a rotação do motor. Há ainda um sensor de rotação (*encoder*), acoplado ao motor, para determinar, com precisão, o valor da rotação.

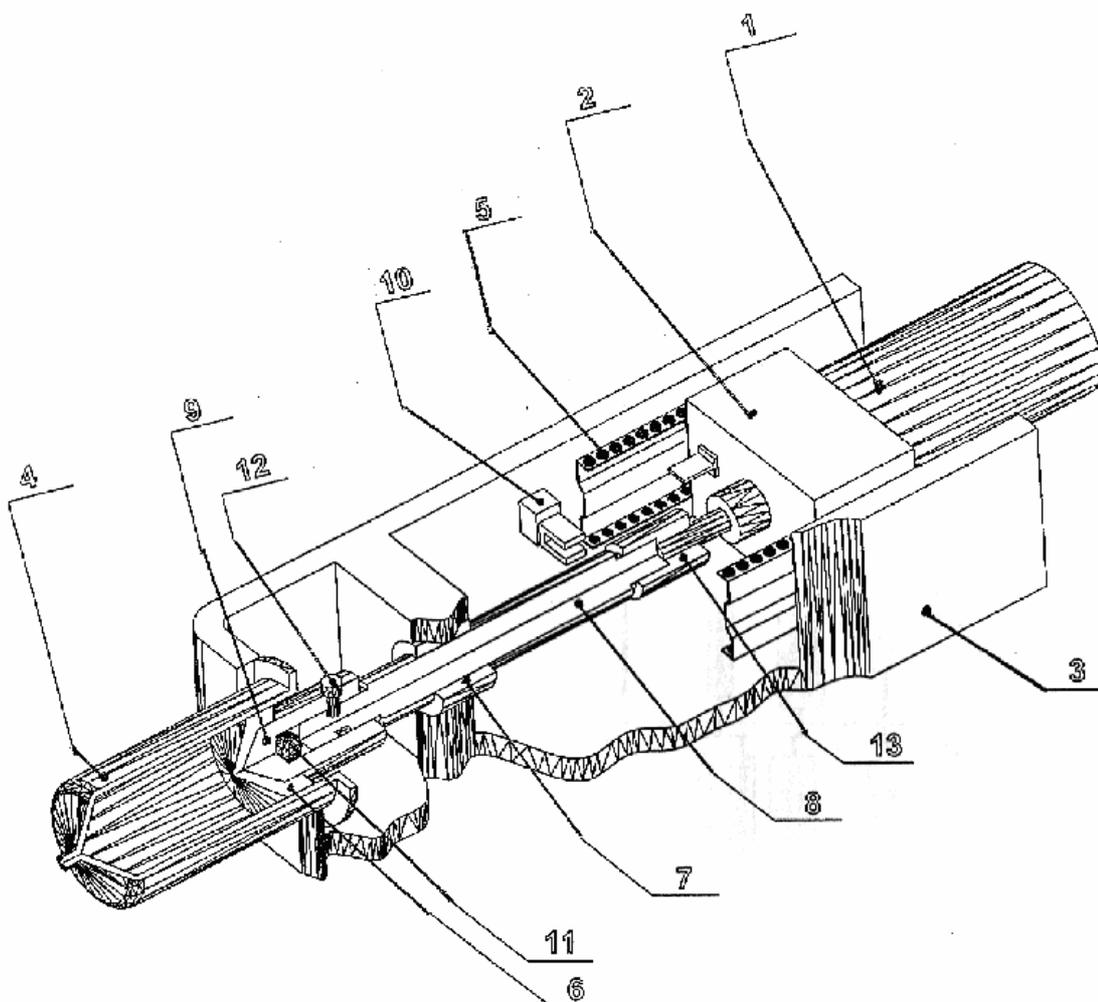


Figura 15 – Esquema do dispositivo para extrudar filamentos da MDTA – (elaborado pelo autor).

Na presente disposição, o cilindro reservatório (4) vazio é desmontado do corpo (3) somente se o bico pressionador (9) estiver totalmente recuado. O movimento de recuo ou de avanço do bico pressionador (9) é possível, pois o mesmo se encontra unido ao parafuso de movimento (8) pelo parafuso (12) montado radialmente.

Assim, o dispositivo extrusor funciona diferentemente dos demais, pelo fato de usar matéria-prima alternativa sob temperatura ambiente, a qual é confinada em um cilindro reservatório (4). Além disso, o processo de troca do reservatório é realizado de forma rápida e simples como segue: quando o cilindro reservatório (4) apresenta-

se vazio, é emitido um sinal, via sensor (10), para inverter o sentido de giro do motor (1) e, ao realizar o recuo do bico pressionador (9), faz-se a substituição do cilindro reservatório vazio.

Por meio desse dispositivo, é possível realizar vários estudos. Dentre essas possibilidades de estudo, destacam-se:

- Utilização de diversos materiais em estado pastoso que possam ser injetados sob temperatura ambiente;
- Flexibilidade no uso e instalação em fresadora CNC;
- Determinação dos parâmetros de trabalho, entre outros;
- Construção de protótipos visuais e protótipos funcionais para a fundição em areia, entre outros materiais.

Por fim, no capítulo 5, será realizada a modelagem do sistema injetor para posterior determinação das grandezas operacionais do sistema.

5. Modelagem cinemática de sistema para extrudar material em forma de filamento sob temperatura ambiente

Nesse capítulo, apresenta-se um resumo dos parâmetros nos processos de RP e a importância da modelagem do dispositivo extrusor para se obter a determinação experimental das grandezas operacionais a serem utilizadas durante a fabricação de peças.

5.1 Grandezas operacionais

Nas máquinas de usinagem convencional, as peças (metálicas ou não metálicas) são fabricadas pela retirada de material pela ação de ferramentas. Nessa técnica, são consideradas grandezas operacionais, como avanço da ferramenta, rotação da ferramenta (fresamento) ou peça (torneamento), profundidade de usinagem, velocidade de corte, entre outras (FERRARESI, 1985) (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 1998) (BELLINI, SHOR, GUCERI, 2005) (CHANG, 2004).

Para atender tecnicamente tais exigências, as estruturas mecânicas, devem ser capazes de vencer inércias ou ações de massas, forças assim como o torque dinâmico e também dispositivos eletrônicos (*drive*) que ofereçam avanços, acelerações e desacelerações suaves gerados via algoritmos apropriados.

Já as grandezas envolvidas nos processos de PR diferem das dos processos convencionais de usinagem, pois o princípio de geração de protótipos, nas máquinas de PR, é realizado camada sobre camada usando-se resinas termoestáveis, como no *Fused Deposition Modeling* (FDM), no qual os parâmetros são os seguintes: tempo de aquecimento, vazão do material, pressão de trabalho, velocidade de deslocamentos no eixo X, Y e Z e tempo de pausa, vazão de deposição, entre outros.

As grandezas operacionais no FDM são oriundas das características do material e do aparato e são tratadas para realizar as condições de transformação do material de sólido para líquido ou vice-versa. Nesse processo, durante a deposição de material, o fluxo é contínuo, de modo que a determinação das variáveis operacionais é importante para se fabricar um protótipo com as formas, dimensões e tolerâncias que o processo é capaz de fabricar sem que ocorra filamento com falta ou acúmulo de material.

Objetiva-se, assim, modelar o cinematiso dos elementos constituintes de um sistema injetor para depositar material em forma de filamento sob temperatura ambiente. Para tanto determina-se experimentalmente a vazão de deposição do compósito para que posteriormente, seja determinada a velocidade de deposição e obtenham-se, assim, as grandezas operacionais que influenciam a forma geométrica e a rugosidade durante a geração de protótipos sob temperatura ambiente.

5.2. Modelagem

Na figura 16, apresenta-se o sistema do dispositivo, extrudor, como segue: o motor DC transmite movimento para a caixa de redução e esta para o parafuso trapezoidal, na direção Z, com baixa rotação, controlando, conseqüentemente, a velocidade de deposição do material através do bico extrusor.

No item 2, tem-se o redutor de velocidade acoplado ao parafuso trapezoidal, o qual transmite movimento a um êmbolo alojado dentro do cilindro, o qual desloca o material confinado no cilindro. O material, sob pressão, é extrudado a fim de fabricar um protótipo com camadas de mesma dimensão sobre a mesa com deslocamento horizontal.

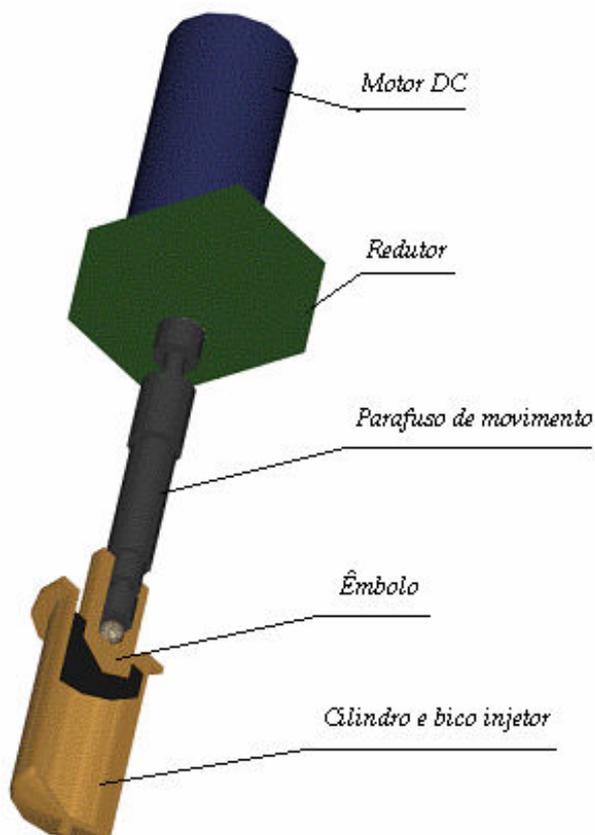


Figura 16 – Elementos constituintes do sistema “dispositivo extrusor” – (elaborado pelo autor).

No sistema do extrusor descrito, a velocidade de avanço do êmbolo que desloca o material através do diâmetro interno do cilindro é obtida por meio da relação entre a vazão e a área da secção transversal do cilindro:

$$V_{\text{êmbolo}} = \frac{Q}{A_{\text{cilindro}}} \quad (1)$$

A expressão 1, acima, é resultante da transmissão que antecede e movimenta o êmbolo, que, por sua vez, deslocará o material confinado no cilindro (figura 17).

A velocidade de avanço considera a relação entre o diâmetro do cilindro e do bico extrusor. Portanto, a velocidade de deslizamento do material corresponderá à velocidade de deposição teórica, que poderá ser diferente da velocidade de deposição real, pois a compressibilidade e a elasticidade do compósito a ser extrudado influenciarão na diferença de diâmetros do filamento antes e depois da extrusão, de modo que se faz necessária uma modelagem, como segue.

5.3. Modelagem cinemática do sistema extrusor

A modelagem cinemática do extrusor baseia-se nos conceitos de extrusão de polímeros (MANRICH, 2005) e no sistema de escoamento do fluídos (BRUNETT, 1974) conforme as grandezas ilustradas na figura 17. Nesse modelo observa-se que a vazão ocorre em cada ponto da secção do cilindro pode ser dada pela expressão:

$$Q = \int_A v da \quad (2)$$

Define-se velocidade média na secção interna do cilindro (V_{mc}) como sendo uma velocidade uniforme que, substituída pela velocidade real (V_{real}), reproduz a mesma vazão na secção.

$$Q = \int v da = V_{mc} A \quad \therefore V_{mc} = \frac{1}{A} \int v da \quad (3)$$

Pelo diagrama da curva, tem-se:

$$V = C_1 y^2 + C_2 \quad (4)$$

Ao determinarem-se as constantes C_1 e C_2 pelas condições de contorno, obtém-se a seguinte relação:

$$v = \frac{4v_o}{D_c^2} Y^2 \quad (5)$$

Usando-se a expressão 3, é determinada a velocidade média na secção interna do cilindro, como segue:

$$V_m = \frac{1}{\frac{\pi D_c^2}{4}} \int_0^{\frac{D_c}{2}} v D_c dy \quad (5a)$$

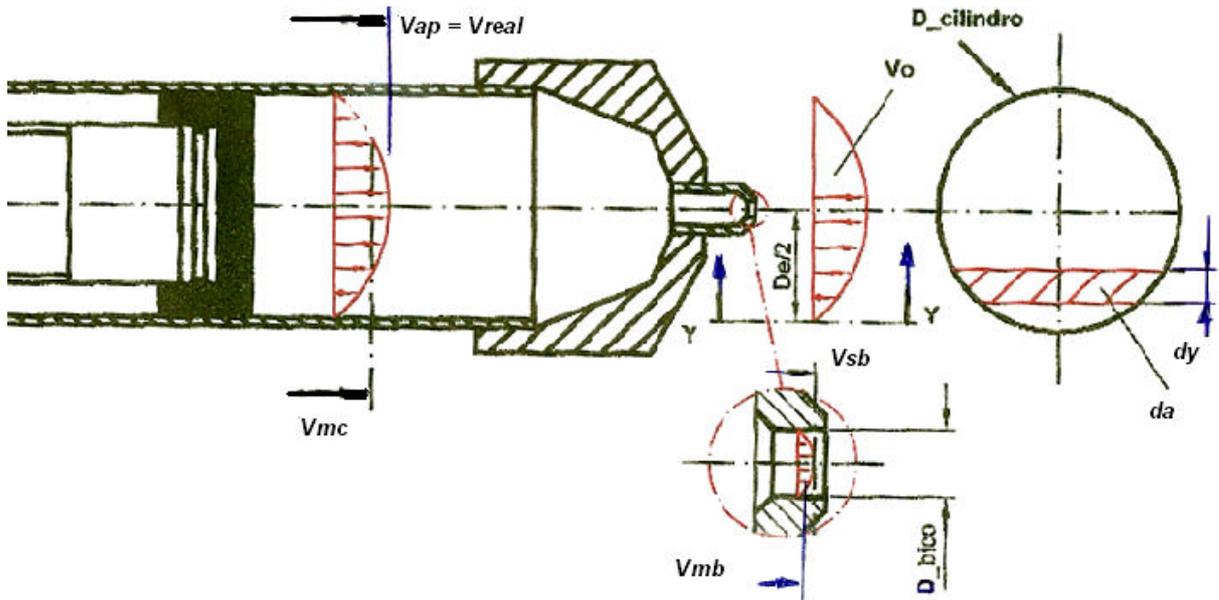


Figura 17 – Grandezas dimensionais constituintes do sistema “dispositivo extrusor” (LIRA, TAMAI, BATALHA, 2008).

Substituindo-se 4 (expressão acima) pela expressão 5 e simplificando-a, temos a velocidade média na secção interna do cilindro (V_{mc}) em função da velocidade real (V_o), como segue:

$$V_{mc} = \frac{2}{\pi} V_o \quad (5b)$$

Na expressão (5b), a velocidade real (V_o) é igual à velocidade de avanço do parafuso, que considera o produto entre a rotação de entrada ($\eta_{entrada}$) e o passo da rosca (P). O resultado desse produto é dividido pela relação de transmissão (i). Por fim, ao se substituírem tais grandezas na velocidade real (V_o) na expressão acima, tem-se:

$$V_{mc} = \frac{2}{\pi} \frac{\eta_{entrada}}{i} P \quad (6)$$

Conforme a figura 17, a velocidade média de saída do material através do bico (V_{msb}) é dada em função da velocidade real (V_o):

$$V_{msb} = \frac{2}{\pi} V_o \quad (7)$$

Sendo a vazão média na secção interna do cilindro (Q_{mc}) igual à vazão média na saída do bico (Q_{msb}), tem-se:

$$Q_{mc} = Q_{msb} \quad (8)$$

Resolvendo-se a igualdade, tem-se a velocidade de saída (V_{sb}) de material através do bico para materiais pouco compressíveis (em torno de 5%). A expressão abaixo considera a relação entre o diâmetro do cilindro (D_c) e do bico (D_b):

$$V_{sb} = \left(\frac{D_c}{D_b} \right)^2 \cdot \frac{\eta_e}{i} \cdot P \quad (9)$$

5.4. Determinação dos parâmetros do sistema extrusor

Nos itens que se seguem, serão apresentados os experimentos realizados para a validação do sistema cinemático para mover o material confinado no cilindro do dispositivo, para assim se determinar a velocidade de saída do material.

5.4.1. Rotação

É a grandeza de entrada do sistema mecânico e principia a movimentação do êmbolo de encontro ao material confinado no cilindro, que será extrudado através do bico.

É importante determinar o valor desse parâmetro operacional durante a deposição, principalmente com o motor realizando trabalho para extrudar o material através do bico, assim garantindo o valor numérico aproximado dessa grandeza, que será utilizado no sistema extrusor para se determinar a velocidade teórica de deposição.

5.4.1.2. Materiais e métodos

A seguir são descritos os materiais e métodos usados para a determinação da rotação do motor elétrico.

5.4.1.2.1. Materiais

Para a realização dos experimentos, utilizou-se um dispositivo (figura 16), o qual, ao acionar o motor de corrente contínua, impõe movimento à caixa de redução e esta ao parafuso trapezoidal, na direção Z.

A rotação deve ser determinada e sua mensuração é obtida com uso de osciloscópio (marca: Tektronik – TDS 2002). Nesse dispositivo lê-se a frequência gerada pelo *encoder* acoplado ao eixo do motor, que, conseqüentemente, controla a velocidade de deposição do material através do bico extrusor 0,64 mm, com tolerância de + 0,01 mm, lida via microscópio óptico.

5.4.1.2.2. Métodos

Ajustou-se a intensidade da tensão em valores pré-determinados para se obter uma gama de rotações mensuradas. Em cada valor de rotação, deixou-se material fluir por um período de dois minutos para o escoamento se estabilizar e extrudar o material através do bico extrusor até o sistema vencer qualquer variação da rotação do motor.

As leituras das rotações foram obtidas no osciloscópio, durante 10 minutos, sem que se interrompesse a deposição de material.

As médias das freqüências obtidas pelo osciloscópio foram consideradas para o cálculo das rotações (n), utilizando-se a expressão dos motores de corrente contínua, que considera a freqüência da rede elétrica (f) e o número de ranhuras do *encoder* (N):

$$n = \frac{f \cdot 60}{N} \quad (10)$$

5.4.1.3. Experimentos

Na tabela 3, são apresentados os valores, obtidos empiricamente, das rotações via osciloscópio. Esses valores serão utilizados para se determinar as velocidades de deposição via expressão 9. Ressalta-se que o valor da tensão mínima 10 Volts (tabela 3) está acima da tensão do regime de acionamento do motor utilizado nos experimentos, ou seja, tensão de 5 Volts.

Tabela 3 – Rotações via osciloscópio

	Tensão (Volts)							
	15	14	13	12	11	10	9	8
	Freqüência (KHz) (Osciloscópio)							
	4,425	4,032	3,731	3,448	3,125	2,825	2,451	1,950
	Rotação (Rpm)							
Média	2655	2419	2239	2069	1875	1695	1471	1176

5.4.1.4. Análise dos resultados

A tabela 3 possibilita a verificação dos resultados das freqüências variando-se a tensão e suas correspondentes rotações. Nota-se que na tensão de 8 Volts a rotação declinou em 500 Rpm. Isso sugere que o motor funciona próximo da curva de funcionamento sob carga, visto que a tensão nominal máxima é de 24 Volts. Por outro lado, à medida que se aumenta a tensão que faz o motor ganhar estabilidade, de uma maneira geral.

Tais resultados sugerem que os valores das rotações podem ser utilizados no modelo cinemático teórico para se determinar as velocidades teóricas de deposição.

5.5. Variação dimensional do diâmetro do filamento

A extrusão de polímeros fundidos normalmente produz extrudados com secção transversal mais larga do que o orifício de saída (SCHRAMM, 2006) (MANRICH, 2005). Na extrusão sob temperatura ambiente, esse fenômeno também ocorre, pois parte da energia potencial (pressão) presente na entrada para forçar o polímero a se deslocar através do bico é usada para deformação elástica das moléculas que estocam essa energia temporariamente até que o material fundido possa sair do bico. Após a saída, o diâmetro do material extrudado aumenta, conforme exemplificado na figura 18, onde está representado o diâmetro do filamento antes da deposição (Df_a), o qual tem mesma dimensão do diâmetro do bico extrusor e o diâmetro após a extrusão (Df_d).

A porcentagem de inchamento do extrudado (secção transversal do filamento antes da saída/ secção transversal do filamento após a saída) (figura 18) aumenta com o crescimento da taxa de extrusão (TE) e está relacionada com outras medidas de elasticidade em diferentes testes.

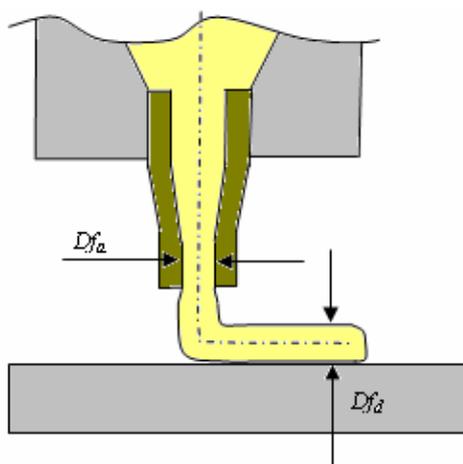


Figura 18 – Diferenças dimensionais do diâmetro do filamento antes e depois da extrusão – (elaborado pelo autor).

O diâmetro do filamento após a deposição (Df_d) é estabelecido com a consideração da taxa de extrusão (TE), que é uma relação entre o diâmetro do filamento após a deposição (Df_d) e o diâmetro do bico extrusor (D_{bico}), no sistema de extrusão. Essa taxa é inerente aos processos de extrusão, de modo que a velocidade de saída (V_{sb}), expressão 9, resulta em:

$$V_{sb} = \left(\frac{D_c}{D_b \cdot TE} \right)^2 \cdot \frac{\eta_e}{i} \cdot P \quad (11)$$

5.5.1. Materiais e métodos

Como mencionado, nos processos de extrusão ocorre o fenômeno do inchamento. Assim se faz necessário saber o quanto o material incha, pois essa grandeza é a saída do sistema mecânico e interfere na determinação da velocidade de deposição do modelo cinemático.

5.5.1.1. Materiais

Além do dispositivo propriamente dito, utilizou-se, para as leituras das larguras dos filamentos, um microscópio óptico, o qual possibilita maior precisão (milésimos de milímetros), já que o bico utilizado para a saída do material mede 0,64 mm.

5.5.1.2. Métodos

Ajustou-se o valor de tensão (conforme tabela 3), deixou-se o material fluir por um período de dois minutos para que o sistema extrusor, via motor redutor, garantisse escoamento uniforme de material, vencendo qualquer obstáculo que, durante a deposição, pudesse forçar o motor a variar sua rotação.

Na seqüência, obtiveram-se amostras de filamentos, com comprimento de 30 mm, para se realizar as leituras dos diâmetros, via microscópio óptico. Durante a leitura do diâmetro do filamento, manteve-se o dispositivo injetando material, para a retirada de próxima amostra de filamento sem que ocorresse a interrupção da extrusão ou alguma alteração decorrente dela.

5.5.1.3. Experimentos

Na tabela 4, são apresentados os valores, obtidos empiricamente, dos diâmetros dos filamentos via microscópio óptico. Esses valores serão utilizados para se determinar o fator de inchamento, que será utilizado para obtenção das velocidades de deposição via expressão 10.

Tabela 4 – Larguras dos filamentos lidos via microscópio óptico

	Tensão (volts)				
	11	12	13	14	15
Amostra	diâmetros dos filamentos (mm)				
1	0,66	0,67	0,67	0,69	0,66
2	0,67	0,69	0,68	0,66	0,67
3	0,69	0,67	0,66	0,66	0,67
4	0,68	0,68	0,69	0,68	0,69
5	0,68	0,67	0,68	0,67	0,68
6	0,67	0,69	0,69	0,66	0,66
7	0,68	0,69	0,66	0,67	0,68
8	0,69	0,67	0,68	0,66	0,67
9	0,68	0,67	0,67	0,67	0,68
10	0,68	0,68	0,68	0,69	0,67
11	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
12	0,67	0,67	0,67	0,67	0,68
Média	0,677	0,677	0,675	0,671	0,673
Valor mínimo	0,66	0,67	0,66	0,66	0,66
Valor máximo	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Desvio	0,009	0,009	0,010	0,011	0,009
Taxa de extrusão (TE)	1,057	1,057	1,055	1,048	1,052

5.5.1.4. Análise dos resultados

A tabela 4 possibilita verificar que ocorreu inchamento dos filamentos, em comparação ao valor do diâmetro do bico (0,64 mm). O inchamento ficou praticamente constante para diferentes tensões, se observada a relação entre o diâmetro do bico (0,64 mm) e os diâmetros do filamento após a saída. Com isso, determinou-se a taxa de extrusão (TE).

O conhecimento do valor do inchamento do filamento após a extrusão e dos valores da taxa de extrusão são importantes para se determinar a velocidade de deposição para, posteriormente, se estudarem os fenômenos do acúmulo e da falta de material durante a deposição.

5.6. Determinação da velocidade teórica de deposição

Para se avaliar o modelo propriamente dito (expressão 10), a etapa final consiste em verificar e comparar os valores das velocidades de deposição com os resultados das velocidades de deposição via volume deslocado e comprimento do filamento.

5.6.1. Materiais e métodos

Nesse item aplicam-se dois procedimentos empíricos (volume deslocado e comprimento do filamento) para se determinar as velocidades de deposição e assim poder-se compará-las e validar com a expressão 11. Além da importância de se conhecerem os valores das velocidades de deposição e de uso para a programação das velocidades de deslocamento da superfície de deposição de filamentos, esses dados servirão de objeto de estudo da ocorrência de acúmulo e da falta de material durante a deposição deste.

5.6.1.1. Materiais

Para medir-se a velocidade de deposição do compósito à base de carboidrato, via procedimento do volume deslocado, antes determinou-se a vazão de deposição. Para tanto utilizaram-se bulbos graduados com marcação entre níveis da ordem de 0,01 ml. Já na medição do procedimento do comprimento dos filamentos usou-se escala métrica (5 m de comprimento) para medição do comprimento dos filamentos.

Para mensurar a velocidade de deposição nos dois procedimentos descritos acima, utilizaram-se os seguintes materiais:

- Bico injetor com diâmetro de saída de 0,64 mm (medido com microscópio óptico);
- Cronômetro (para a tomada de tempo do volume depositado);
- Dispositivo extrusor.

5.6.1.2. Métodos

Nos dois procedimentos, a estratégia adotada para obterem-se as amostras de filamento, ao se ajustar a tensão da fonte, foi considerar um intervalo de tempo (três minutos) de deposição. No procedimento do volume deslocado mediu-se o nível do líquido deslocado na seringa antes e depois de inserido o volume de compósito que foi depositado, de modo a obter-se o volume deslocado.

Na obtenção das amostras, tanto no procedimento do volume deslocado quanto no do comprimento do filamento, o fornecimento de tensão ao motor do dispositivo não foi interrompido para não ocorrer qualquer variação na tomada dos valores durante a realização do experimento.

Na figura 19, tem-se a seqüência de etapas do método adotado para se determinar empiricamente a vazão (volume deslocado) e a velocidade de deposição (comprimento do filamento), conforme descrito abaixo:

a) Volume deslocado:

I. O dispositivo extrusor é acionado com avanço constante do êmbolo e extruda filamentos continuamente, através de um bico de saída com diâmetro de 0,64 mm. Adotou-se um intervalo de tempo de três minutos, durante a deposição, e, ao término desse intervalo, o volume de material extrudado será usado, na etapa II, para se obter o valor numérico desse volume;

II. Cada amostra será compactada manualmente após a deposição e será colocada dentro de um bulbo graduado (volume total de 1 ml – resolução de 0,01 ml) para se mensurar o volume de líquido deslocado;

III. Para a verificação do volume deslocado (Y), foi predeterminado o nível de líquido (X) do bulbo na etapa anterior, sendo que a diferença entre níveis fornecerá o volume de material depositado durante três minutos;

IV. De cada amostra, foi obtido o volume de material depositado, repetindo-se as etapas de I, II e III;

V. O processo de obtenção de amostras foi realizado para 20 amostras que resultaram em valores de volume (ml) e calculando-se o valor médio do volume deslocado;

VI. Com o valor médio do volume deslocado e usando-se diâmetro do bico de saída de material igual a 0,64 mm, aplicaram-se os valores na expressão geral da

vazão¹⁵ e calculou-se, para três vazões diferentes, a velocidade de deposição média (V).

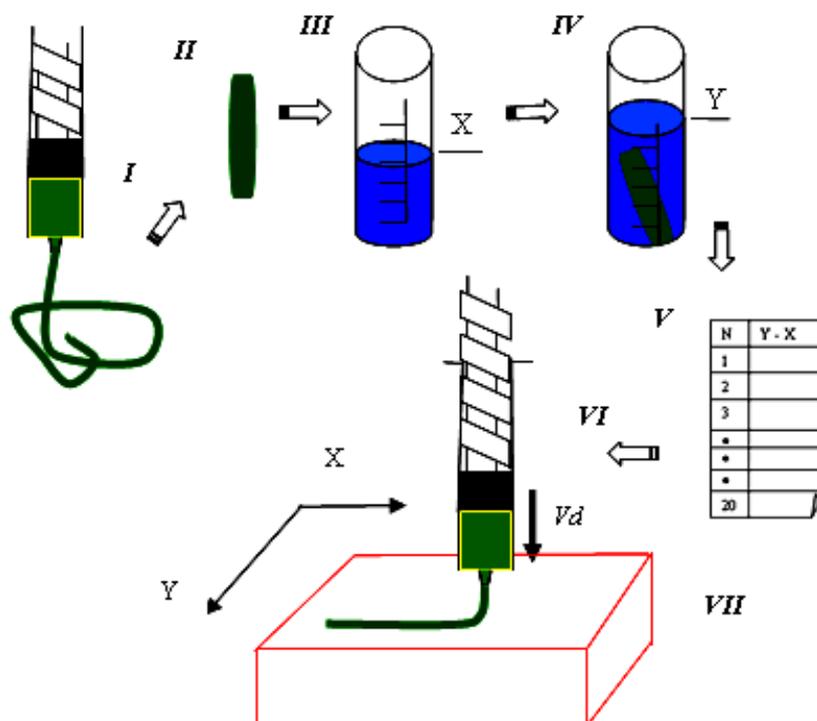


Figura 19 – Seqüência de etapas para cada procedimento (Lira et al, 2007).

b) Comprimento do filamento:

Repete-se o item da primeira etapa acima. Na seqüência, deposita-se o filamento expulso sobre a fita métrica, e, ao findarem os três minutos, efetua-se o corte do filamento e a mensuração. Com os valores obtidos dos comprimentos das amostras (6 amostras para cada valor de tensão), calculam-se as velocidades médias usando-se a expressão básica da cinemática¹⁶.

¹⁵ É o produto da velocidade de escoamento e a seção interna do conduto.

¹⁶ É a relação do espaço percorrido em determinado período.

5.6.2. Experimentos

Na tabela 5, são apresentados os valores das velocidades de deposição, obtidos empiricamente em cada procedimento, e, teoricamente, usando-se a expressão 10. Os valores em cada procedimento referem-se às médias de 9 amostras (volume deslocado e filamento). Tais resultados servem para avaliar o modelo teórico e também para se determinar a velocidade mais próxima da real, e assim auxiliar o estudo da influência da velocidade de deposição na largura do filamento.

Tabela 5 – Velocidades médias teóricas em cada procedimento

Tensão (volts)	Velocidades médias em cada procedimento (mm/min)		Velocidades médias teóricas (mm/min)	Relação (%)	
	Filamento	Volume		Filamento/teórico	Volume/teórico
11	269	257,2	270,9	0,66	5,05
12	305	278,1	300,8	1,26	7,55
13	335	317,5	327,7	2,32	3,11
14	367	351,8	353,0	3,99	0,32
15	399	364,5	388,0	2,95	6,05

5.6.3. Análise dos resultados

Os resultados da tabela 5 possibilitam verificar que ocorreu pouca variação entre as velocidades obtidas nos procedimentos e as teóricas, sendo que a relação Filamento/teórico. (tabela 5) maior é 0,66% e a menor 3,99 %. Por outro lado a relação Volume/teórico teve 7,55% como maior diferença e 0,33 % como menor diferença.

O procedimento relativo ao comprimento do filamento apresenta menor variação, pois os valores de velocidades são obtidos diretamente, ao passo que no procedimento referente ao volume deslocado, usa-se o valor do diâmetro do filamento após a extrusão (conforme estudo do inchamento, item 5.5) na expressão geral da vazão. Quanto às velocidades obtidas via expressão 10, os valores da taxa

de extrusão estão elevados à segunda potência, o que resultou em valores de velocidades de deposição diferente aos dos procedimentos.

Tais resultados sugerem um estudo para se verificar o grau de influência desses procedimentos durante a deposição e a construção de camadas para assim se validar o modelo teórico.

6. Projeto de experimentos

Neste capítulo são abordados dois aspectos a serem observados nos experimentos a fim de se conhecer e verificar as características qualitativas (capítulo 7) e quantitativas (capítulo 8) da MDTA durante a fabricação de peças. Os aspectos adotados são resultantes da discretização do processo de MDTA em variáveis de entradas e respostas. As variáveis selecionadas, no delineamento (Item 6.2), para os experimentos foram escolhidas de um grupo maior baseado na experiência e no conhecimento desse pesquisador ao respeito desse processo.

6.1. Discretização das variáveis na MDTA

No sistema MDTA, variáveis de entrada (figura 20) interligam-se, o que afeta as repostas intermediárias, como a largura do filamento. Esta, por sua vez, influencia a disposição entre camadas. A variável “*elementos constituintes e construtivos do dispositivo*”, por exemplo, recebe e envia influência dos parâmetros do processo e isso requer dimensionamento apropriado para vencer a resistência e efetuar a extrusão da matéria-prima para a construção do protótipo, devido às características da variável “*material*”, como a densidade. Essas influências podem, por um lado, alterar a resposta quantitativa, aumentando ou diminuindo o valor da rugosidade do protótipo, por exemplo. Por outro lado, essa variável também pode apresentar influência no aspecto qualitativo (resposta final), como na preparação, na operação e no custo de instalação.

Nota-se que a variável “*parâmetro do processo*” sofre influência tanto da variável “*material*” quanto da “*elementos constituintes e construtivos do dispositivo extrusor*”, de modo que optou-se, como foco de estudo, por alguns fatores dessa variável, a fim de verificar a resposta (quantitativa). Por outro lado, no capítulo 8, serão verificadas as características qualitativas.

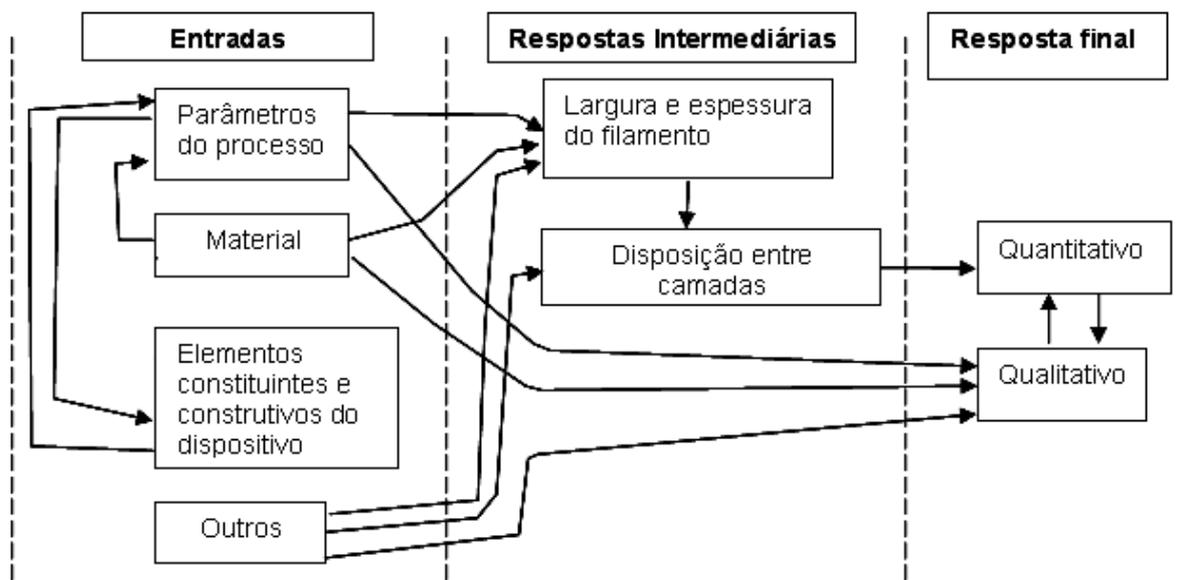


Figura 20 – Entradas e respostas (qualitativas e quantitativas) da MDTA – (elaborado pelo autor).

6.1.1. Entradas na MDTA

No sistema MDTA, foram identificadas 4 entradas interligadas e em cada entrada foram obtidas diversas variáveis. As descrições detalhadas das variáveis identificadas (figura 20) da MDTA, são apresentadas a seguir:

a) Parâmetros do processo

- Velocidade de deposição: oriunda do sistema extrusor (capítulo 5), é a velocidade de extrusão do material para não ocorrer falta ou acúmulo de material sobre a superfície ou sobre a camada depositada anteriormente. O valor deve ser conhecido e balanceado com a velocidade de deslocamento da superfície de deposição, altura de deposição e para não ocorrer falta ou acúmulo de material durante a deposição sobre a mesa;
- Velocidade de deslocamento da superfície de deposição: obtida pela programação dos eixos X e Y da mesa da fresadora CNC. O valor deve ser conhecido e balanceado com a velocidade e a altura de deposição, para não ocorrer falta ou acúmulo de material durante a deposição sobre a mesa;

- Altura de deposição: distância adequada do bico extrusor até a face da superfície de deposição do material, para o material não espalhar ou ficar muito distante da superfície de deposição;
- Inchamento do filamento: dilatação volumétrica sofrida pelo material ao sair pelo orifício do bico extrusor;
- Espaçamento: distância ideal entre as camadas para não ocorrer compressão ou espaços vazios de material;
- Aderência: ocorre entre os filamentos e entre as camadas conforme, item 3.1 (capítulo 3);
- Pressão entre filamentos e camadas: pressão necessária para ocorrer a adesão entre filamento e camadas;
- Ângulo de deposição: ângulo do bico em relação à superfície de deposição;
- Pressão de extrusão: grandeza importante para posterior aperfeiçoamento e redimensionamento do sistema de extrusão do dispositivo extrusor, entre outros fatores;
- Trajetória (X e Y);
- Velocidade de deslocamento do eixo Z (vertical): tem o mesmo valor numérico que a velocidade de deposição.

b) Material

- Densidade do material;
- Índice de fluidez;
- Não homogeneidade do material;

- Tempo de contração do material;
- Contração do material: ocorre devido à cura a partir da deposição. A porcentagem volumétrica de contração do material da camada nesse ponto do processo não foi determinada, porque esse dado requer um estudo específico, como o realizado por Künstner (2002) no processo *Multiphase Jet Solidification* (MJS);
- Aderência: ocorre tanto entre filamentos quanto entre camadas;
- Característica mecânica: resistência à tração, à torção e ao cisalhamento, entre outros.

c) Elementos constituintes e construtivos do dispositivo extrusor

- Diâmetro do cilindro: variação de cilindridade e/ou conicidade, de modo a proporcionar variação do volume deslocado ou mesmo resistência ao deslocamento do êmbolo;
- Diâmetro do bico: variação de cilindridade ocasionando variação do volume depositado;
- Passo do parafuso e/ou porca: variação linear na dimensão do passo, ocasionando deslocamento longitudinal ao longo do eixo Z e resultando em deslocamento irregular de volume;
- Relação de transmissão: variação que ocorre devido ao rendimento da transmissão por engrenagens;
- Geometria interna do bico;
- Rendimento do motor, do redutor, do parafuso, do cilindro e do bico;
- Rotação de entrada: variação na rotação devido à energização das bobinas e dos rolamentos dos mancais.

d) Outros

- Vibração: surge em decorrência do acionamento do motor ao transmitir movimento aos componentes do sistema de transmissão (reductor, parafuso, cilindro e bico);
- Atrito entre as paredes: fator relativo às paredes de deslizamento da caixa de redução na direção Z;
- Timer: intervalo de tempo que o *software* da máquina dispense em relação à próxima linha de comando;
- Aceleração/desaceleração: pode ocorrer próximo à interpolação dos eixos, em decorrência do tipo de motorização e/ou *software* usados;

6.1.2. Respostas intermediárias na MDTA

É grande o número de variáveis (entradas) identificadas que podem afetar a largura e a espessura do filamento e a disposição entre camadas. Tais indicações são decisivas para a determinação das repostas finais em termos qualitativos e quantitativos, de modo que deve-se adotar uma estratégia de seleção das entradas de maior influência nessas repostas.

6.2. Delineamento das estratégias dos experimentos na MDTA

A tabela 6 apresenta a interação (causa e efeito) entre fatores, cuja seleção para a verificação nos experimentos será baseada na maior frequência (incidência) na resposta qualitativa e na quantitativa.

Quanto ao aspecto qualitativo (tabela 6), algumas características do material serão objeto de verificação, assim como algumas características que a máquina tem que ter para realizar o processo de deposição, como o *timer*, ou seja, intervalo de tempo

que o *software* da máquina dispense para a próxima linha de comando; esse intervalo de tempo pode influir na qualidade da peça (espaçamento).

Por outro lado, algumas variáveis dos parâmetros operacionais podem exercer forte influência na qualidade do produto. Quanto ao aspecto quantitativo, consideram-se constantes variáveis, como material, elementos constituintes e construtivos do dispositivo, entre outras.

Ainda na tabela 6, selecionaram-se, também, algumas variáveis relativas aos “*parâmetros do processo*”, para se estudar o relacionamento entre as variáveis e respostas, como largura e espessura do filamento. Conseqüentemente, a forma geométrica e a rugosidade são relacionadas com a velocidade de deposição, a velocidade de deslocamento da superfície de deposição, a altura de deposição e o inchamento do filamento. Esses parâmetros foram escolhidos, pela hipótese de haver acúmulo ou falta de material, além de poderem influenciar os demais parâmetros (figura 20), tais como “*espaçamento e pressão entre filamentos e camadas*”, os quais foram considerados constantes.

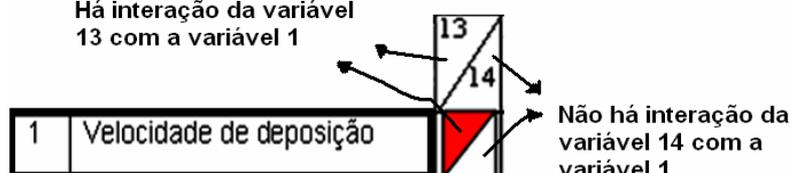
A variável “*ângulo de deposição*” do bico extrusor em relação à superfície de deposição foi medida (zero graus) e seu valor não foi alterado em toda a experimentação.

Por fim, embora a “*variável trajetória (eixos X e Y) de deposição*” seja importante em processos de deposição contínua para não ocorrer deposição de material (conforme capítulo 4), ela não será estudada, pois as peças fabricadas nos experimentos têm formas geometrias básicas.

Tabela 6 – Variáveis de entrada x interações entre variáveis – (elaborado pelo autor).

Variáveis de entrada		Interação entre variáveis																												
		1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
Parâmetros de controle	1	Velocidade de deposição																												
	2	Velocidade de deslocamento																												
	3	Altura de deposição																												
	4	Inchamento do filamento																												
	5	Espaçamento																												
	6	Aderência																												
	7	Pressão (filamen./camadas)																												
	8	Ângulo de deposição																												
	9	Pressão de extrusão																												
	10	Trajectoria (X e Y)																												
	Material	11	Velocidade eixo Z (vertical)																											
12		Densidade																												
13		Índice de fluidez																												
14		homogeneidade																												
15		Tempo de contração																												
16		Contração																												
17		Consistência																												
18		Características mecânicas																												
Construtivo	19	Diâmetro do cilindro																												
	20	Diâmetro do bico																												
	21	Geometria do bico																												
	22	Passo do parafuso/porca																												
	23	Relação de transmissão																												
	24	Rotação de entrada																												
Outros	25	Vibração																												
	26	Atrito entre as paredes																												
	27	Timer (pausa)																												
	28	Aceleração/desaceleração																												

Interpretação da tabela:

Há interação da variável
13 com a variável 1

De acordo com a tabela 6, as variáveis: velocidade de deposição e de deslocamento e a altura de deposição devem ser estudadas, pois podem causar grande impacto, devido ao acúmulo ou falta de material, na largura e na espessura do filamento, e na disposição entre camadas. Para tanto o efeito acúmulo ou falta de material será estudado a seguir.

6.3 Intervalos entre velocidade de deposição e deslocamento da mesa para acúmulo e falta de material

Independentemente do material a ser extrudado ou forma de processamento do sistema extrusor, deve haver relação da velocidade de deposição com a velocidade de deslocamento da superfície de deposição (V_{mesa}), para não ocorrer o acúmulo ou falta de material durante a deposição. Objetivando-se o balanceamento entre as velocidades impõe-se a determinação dos intervalos de limite, como a seguir.

No gráfico 1, apresenta-se uma curva da velocidade de deposição versus velocidade de deslocamento da superfície de deposição, na qual acham-se os pontos limites de acúmulo (*PLA*) e falta de material (*PLF*), de modo que é possível estabelecer os intervalos limites (*ILS* – intervalos limite de segurança) para equilíbrio tanto da velocidade de deposição quanto de deslocamento da superfície de deposição favorecendo a forma geométrica do protótipo, a rugosidade, entre outros.

A determinação dos intervalos limites dos parâmetros pode minimizar ou mesmo eliminar o problema da falta ou acúmulo de material para constatar, via peças fabricadas, se tais velocidades afetam a forma geométrica e a rugosidade e, assim, sedimentar e embasar a MDTA.

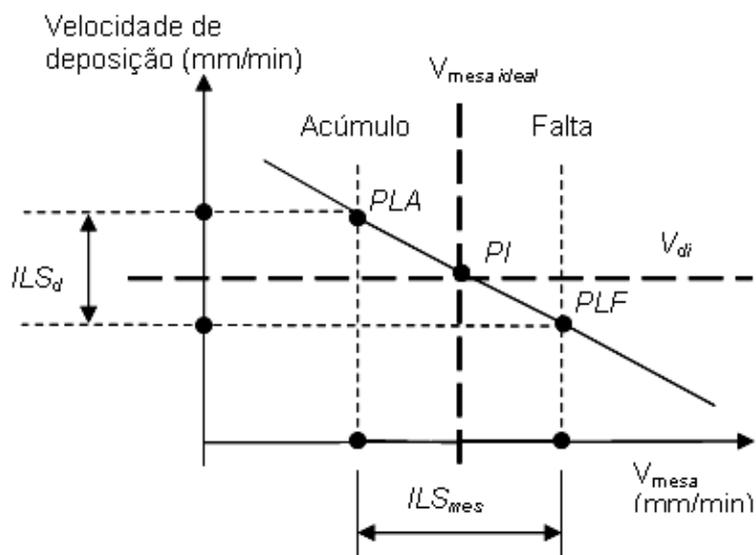


Gráfico 1 – Intervalos limites das velocidades de deposição e da superfície de deposição – (elaborado pelo autor).

6.4. Respostas qualitativas e quantitativas na MDTA

Para se conhecer e quantificar as características da MDTA os experimentos serão realizados sob dois aspectos (respostas finais – figura 20), quais sejam:

- a) Qualitativa: objetiva conhecer e verificar as características da MDTA com relação a preparação e operação; aspectos dimensional e de forma do protótipo fabricado; custos com material; utilização do protótipo; processamento e pós processamento. Tal aspecto será estudado detalhadamente no capítulo 7.
- b) Quantitativa: objetiva determinar o efeito de algumas variáveis em termos de faixas limites de acúmulo e de falta de material na largura do filamento, para posteriormente se verificar se os valores limites afetam a forma geométrica e a rugosidade para fundamentar a MDTA na fabricação de peças.

7. Experimentos qualitativos da MDTA

Neste capítulo são apresentados os experimentos realizados com material sob temperatura ambiente para que se obtenham as características qualitativas, de operação e de preparação entre outras a fim de fundamentar a proposição da MDTA como um processo para construir, com baixo custo, um protótipo via modelagem por deposição sob tal condição.

Nos experimentos, descreve-se a estratégia adotada, assim como o aparato usado nos experimentos, para com isso, determinarem-se as grandezas de trabalhos e os obstáculos durante a construção de um protótipo usando-se o compósito selecionado e testado no capítulo 3. Essas grandezas qualitativas obtidas serão utilizadas para se determinar, quantitativamente (via análise de variância), o grau de influência de cada grandeza.

7.1. Materiais e métodos

Para se determinar as características técnicas do processo proposto, conforme delineamento realizado no item 6.2, é importante conhecer os aspectos qualitativos (forma geométrica, custo do material, utilização, processamento e pós-processamento), de preparação e de operação, obtidos pelas avaliações feitas sobre materiais e métodos, as quais serão descritas a seguir.

7.1.1 Materiais

Conforme estabelecido no capítulo 3, foram selecionados materiais de baixo custo e atóxico com capacidade de aderência entre as camadas com possibilidade de

transformação sob temperatura ambiente. Dentre os materiais com essas características, selecionou-se um compósito à base de carboidrato, por ser facilmente moldado e que pode ser utilizado na construção de protótipos com geometrias básicas.

O dispositivo desenvolvido no capítulo 4, para o estudo do processo MDTA, foi montado no eixo Z (vertical) de uma fresadora (2 ½ eixos) CNC Didática¹⁷, marca: EMCO, modelo F1 – CNC, a qual realiza movimentos nos eixos em X, Y e Z. Com o uso dessa máquina, foi possível programar os deslocamentos da mesa e determinar parâmetros de trabalho, tais como: velocidade de deslocamento da mesa, distância ideal do bico injetor entre as camadas, velocidade de extrusão do material, entre outros.

7.1.2 Métodos

Para se depositar os filamentos sobre a superfície da mesa fresadora, a programação das coordenadas da trajetória do bico de saída de material foi feita linha a linha em código “G”¹⁸.

Em seguida, determinaram-se empiricamente os seguintes parâmetros de operação:

- a) velocidade de deslocamento da mesa;
- b) distância do bico injetor até a face da superfície de deposição do material, que não deve se espalhar ou ficar muito distante da superfície de deposição.

Tais parâmetros foram considerados na MDTA, pois, para a deposição de material, desloca-se a mesa (“X” e “Y”) com velocidade e distância de deposição (entre o bico

¹⁷ Fresadora CNC gentilmente disponibilizada pelo Centro de Estudos da Manufatura da FATEC-SP.

¹⁸ A ISO (International Organization for Standardization) adotou a forma de programação dos deslocamentos dos eixos da máquina em código G (general ou preparatory).

extrusor e a superfície de deposição) apropriadas para não ocorrer acúmulo ou falta de material durante a deposição.

Com os parâmetros acima determinados, o compósito é depositado camada sobre camada para se verificar se ocorre ou não a aderência entre elas, o que é um aspecto fundamental para construção de protótipos nos processos de PR, assim como na MDTA.

7.2 Experimentos

Usando-se o compósito à base de carboidrato, observou-se, após a cura, que ocorre aderência (item 3.1) entre camadas depositadas umas sobre as outras. Com essa constatação, foram programados os deslocamentos dos eixos em X, Y e Z da fresadora CNC para se construir protótipos em forma de cubos maciços e formas circulares ou mesmo com outra geometria. As características de programação da máquina são apresentadas no apêndice E. Também observou-se se as camadas permaneceram sobrepostas durante a deposição para a qual foi utilizado um bico extrusor de 0,64 mm +0,01 mm.

Concomitantemente à construção de protótipos, foram observados aspectos qualitativos, de preparação, de operação, de processamento e de pós-processamento, os quais serão discutidos no item a seguir.

7.3 Resultados e discussões

Os experimentos com o processo MDTA demonstram as seguintes características qualitativas:

a) Preparação e operação: o compósito à base de carboidrato encontra-se, inicialmente, pastoso e homogêneo, o que facilita seu escoamento ao ser extrudado. Essa consistência pastosa não requer aquecimento, tanto para o ambiente no qual o protótipo será construído, quanto para operação de deposição do material camada por camada, pois no compósito à base de carboidrato há elementos que, além de facilitar a fluidez e diminuir a resistência nas paredes internas do cilindro, possibilitam mais flexibilidade e maleabilidade durante o processo de extrusão.

b) Análise dimensional: usou-se bico com diâmetro de saída de 0,64 mm, de modo que tanto a largura quanto a altura das camadas são proporcionais à dimensão do diâmetro, enquanto a precisão varia na casa de décimos de milímetro (Apêndice F). Isso indica que o MDTA pode proporcionar igual ou maior precisão do que as do processo via *Fused Layer Modeling* (FLM). Para tanto, basta utilizar bico injetor de mesma dimensão.

c) Análise de forma: nos processos de PR via FLM, a deposição do material é contínua e não há interrupção automática, como nos processos via *laser*. Na deposição contínua, deve-se considerar a velocidade de deposição e deslocamento da superfície de deposição e também o *timer* de pausa para a leitura do comando de mudança de direção (X, Y e Z), o qual deve ser proporcional à vazão de deposição do material durante a trajetória (linear, circular ou qualquer forma curvilínea) do bico extrusor.

A trajetória também deve ser otimizada, ou seja, não pode ocorrer repetição da trajetória do bico na mesma camada em construção, isso porque ocorrerá acúmulo de material nesses pontos, de modo a influenciar negativamente na forma final do protótipo. O problema do acúmulo de material pode ser diminuído sensivelmente ou mesmo ser eliminado via *software* com *timer* apropriado para essa nova forma de gerar peças, via MDTA, considerando evidentemente que tanto a velocidade de deposição quanto a de deslocamento da superfície de deposição estejam balanceadas.

O *timer* do software da máquina usada nos experimentos no processo MDTA pode ser considerado longo. O resultado dessa relativa demora para a execução da próxima linha de programação pode ser observado nos pontos de mudança de direção, nas quais ocorre acúmulo de material (figura 21). Essa ocorrência é observada tanto na execução de trajetória linear (comando G01), quanto na trajetória circular (comando G03).

Nota-se que, em cada quadrante, há acúmulo de material. Isso se deve à configuração do *software*, que realiza somente um quarto de volta. O problema do acúmulo de material pode ser diminuído sensivelmente ou mesmo ser eliminado via software com *timer* apropriado à MDTA.

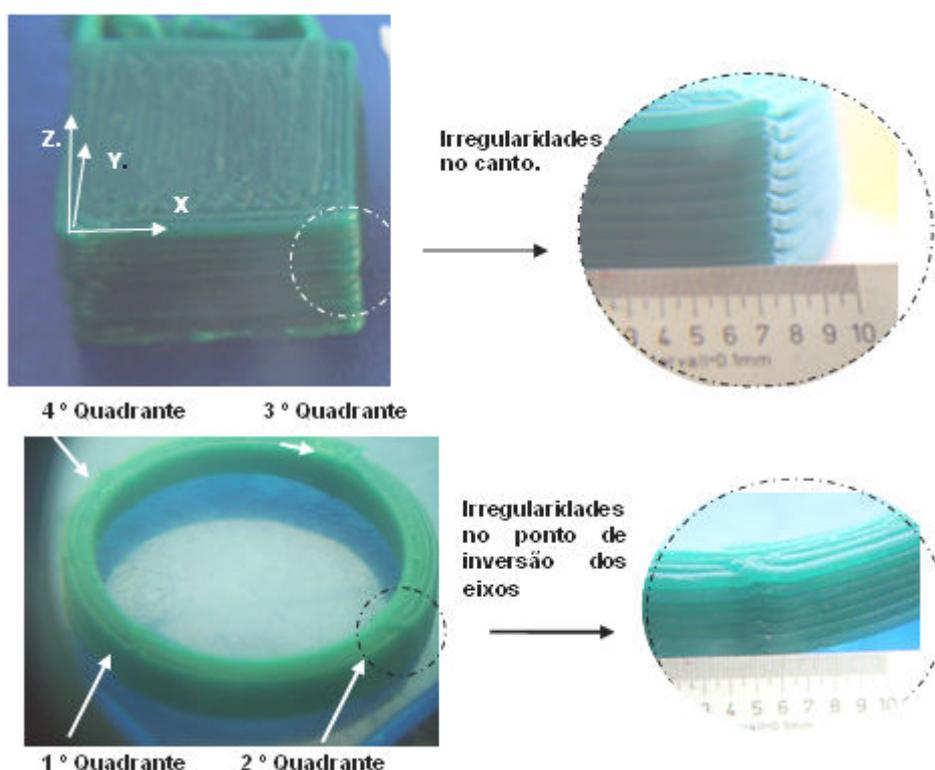


Figura 21 – Detalhe de protótipos de compósito à base de complexo de carboidrato via MDTA (LIRA, BATALHA, BARRETTO, 2007).

Outra ação a ser avaliada no sentido de se reduzir o volume de acúmulo de material é a redução do diâmetro do bico extrusor, de 0,64 mm, para dimensões menores.

O problema de acúmulo de material nos cantos, ocasionado pela mudança de direção, não é exclusivo do processo MDTA. Isso ocorre também, no processo FDM,

conforme observado na figura 22-a. Nota-se, quanto a esse último processo, que há acúmulo de material ABS¹⁹ no canto de uma das arestas do protótipo. No exemplo da EP (figura 22-b), ocorre acúmulo em maior escala no ponto de conclusão da circunferência devido ao *timer* dos eixos horizontais (X e Y) nesse ponto ser maior para se iniciar o deslocamento vertical (eixo Z), e na seqüência gerar a próxima camada.

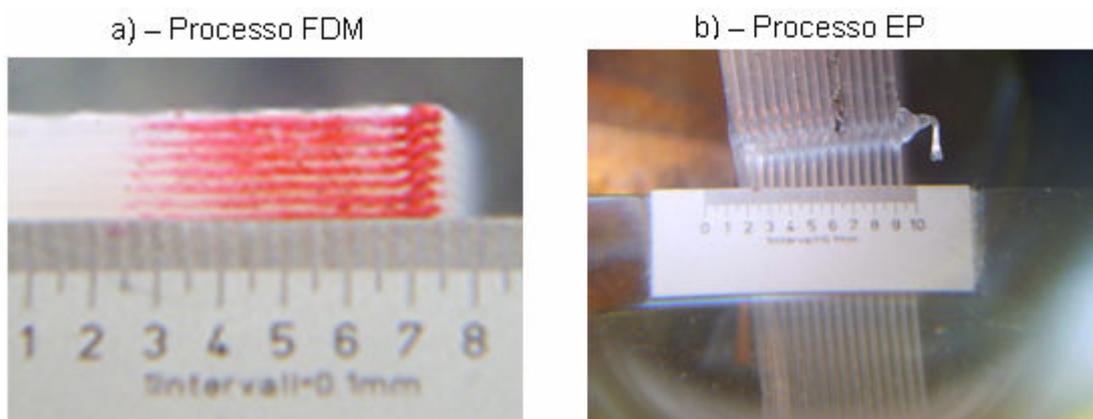


Figura 22 – Detalhe de protótipos com acúmulo de material nos pontos de parada para posterior movimentação na direção Z. – (elaborado pelo autor).

Com a MDTA, suplantado o problema de acúmulo de material com o uso de *software* com *timer* de pausa ajustado ao volume de material depositado, podem-se obter, nos pontos de mudança de eixo superfícies mais uniformes se comparadas à deposição com interpolação dos eixos, tanto no caso de retas quanto no de curvas de protótipos. Isso pode ser comprovado observando-se as regiões (A), onde não ocorreram paradas dos eixos horizontais (figura 23), casos em que os protótipos ficaram apresentaram camadas com acabamento uniforme quando comparados com as regiões de desaceleração (B) e nos pontos de paradas (C). Diante dessa constatação, vislumbra-se a aplicação da MDTA na geração de protótipos com diferentes formas geométricas.

¹⁹ O ABS foi parcialmente pintado de vermelho, pois sua cor branca não permite boa visualização do acúmulo de material.

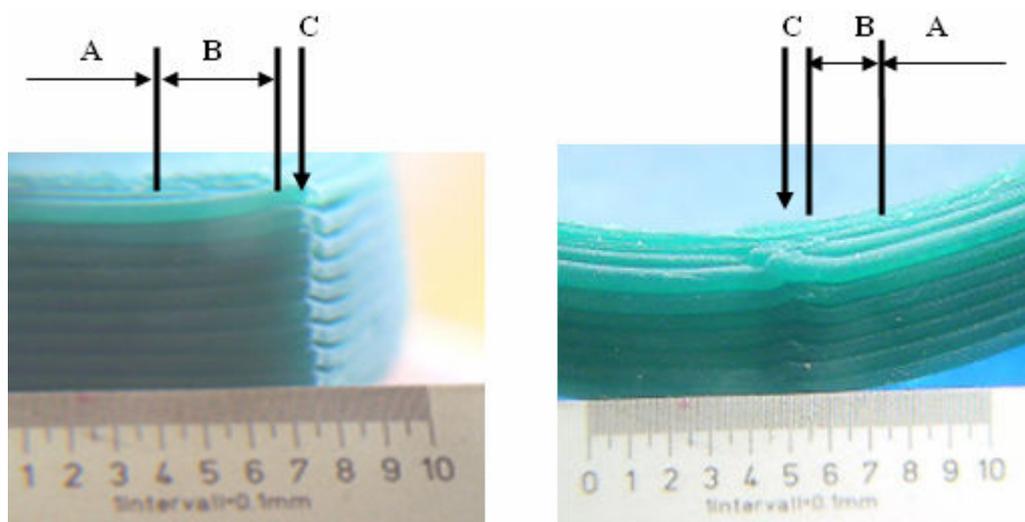


Figura 23 – Detalhe das regiões de movimentação dos eixos de paradas e desacelerações para posterior movimentação na direção Z – (elaborado pelo autor).

d) Custos com material: o custo do compósito à base de complexo de carboidrato é de R\$ 17,00/Kg (Setembro/2005) (ver comparativo no Apêndice F), considerado baixo, principalmente por encontrar-se disponível em cores variadas, o que pode ser um recurso desejável para a construção de protótipos.

e) Utilização: os protótipos gerados por esse processo podem ser utilizados de forma apropriada na modelagem concepcional, na confecção de objetos sob temperatura ambiente, assim como no *Rapid Tooling*. Nesse último, especificamente, moldaram-se em gesso de fundição, cavidades com a forma dos protótipos, para posterior fundição, por gravitação, de peças em estanho.

A MDTA ainda possibilita a confecção de brinquedos multicores, sendo essa uma característica importante para diferenciar ou notar formas. Por ser atóxico, o compósito à base de carboidrato não gera gases para posterior tratamento, nem requer proteção pessoal durante a sua manipulação ou extrusão, ao contrário do que ocorre nos processos via *laser*. Além disso, tal processo não exige controle de temperatura, como no FDM e no MJS, em que as temperaturas de trabalho estão acima da ambiente e devem ser controladas para que o material permaneça fluidificado. Portanto, com a MDTA, é possível trabalhar em diversos ambientes, tais como os de desenvolvimento de produtos ou de produção, bem como em instituições voltadas ao ensino da PR.

f) Processamento: o material usado no processo MDTA obtém consistência²⁰ em 15 minutos após a sua extrusão. Essa diferença de tempo deve ser observada quando se necessita fabricar protótipos de alta complexibilidade, nos quais existem muitas cavidades e/ou partes delgadas que estão localizadas interna ou externamente ao protótipo. Isso requer, portanto, um estudo da localização de estruturas de apoio nessas regiões. Para se obter um menor número de estruturas, deve-se usar material que exija menor tempo para se obter consistência ou mesmo acelerar a obtenção da consistência do material atual.

O dispositivo de extrusão construído para a MDTA utiliza reservatório removível, o que facilita o reabastecimento ou até a substituição do reservatório. Outra possibilidade é a utilização de dois reservatórios com materiais de cores diferentes, mantendo-se o baixo custo operacional.

A energia requerida no MDTA para extrudar material por meio de um bico com diâmetro de 0,64 mm, é baixa, pois o motor usado para realizar o trabalho de extrusão requer 3 Watts de potência. Deve-se também observar que o protótipo fabricado com o carboidrato deve ser manipulado em ambiente seco, pois em ambiente úmido o protótipo poderá perder parcialmente a forma original.

g) Pós-processamento: o acabamento se faz necessário em casos que requerem estruturas de apoio, as quais são fabricadas com o próprio material do protótipo, não havendo necessidade de outro reservatório de material para gerá-las. Portanto, a MDTA não requer trajetórias e deslocamentos adicionais para limpeza e posicionamento dos bicos extrusores.

²⁰ Conforme critério desenvolvido pelo autor (ver nota de rodapé capítulo 3).

8 Experimentos quantitativos

Neste capítulo são apresentados experimentos relativos ao estabelecimento dos parâmetros operacionais realizados com material sob temperatura ambiente, a fim de se obter as características quantitativas e assim fundamentar a proposição da MDTA como um processo para construir, com baixo custo, um protótipo via modelagem por deposição sob tal condição.

Na MDTA, a velocidade de extrusão do filamento deve ser sincronizada à velocidade de deslocamento da mesa (eixos X e Y).

Os parâmetros acima mencionados podem influenciar a forma dimensional do filamento. Logo, pretende-se verificar, conforme o delineamento elaborado no item 6.2, o grau de contribuição desses parâmetros, via *analise of variance* (ANOVA), medindo-se a largura dimensional do filamento, após a extrusão do compósito à base de carboidrato, o qual determina a especificação técnica (forma geométrica, tolerâncias, rugosidades, entre outras) do protótipo fabricado.

8.1 Velocidade de deslocamento da mesa e distâncias do bico injetor na superfície de deposição

Na MDTA, devem ser observadas as seguintes grandezas operacionais: vazão de deposição, velocidade de deslocamento da mesa e distância do bico extrusor. Nesse item, portanto, serão determinados estatisticamente, com uso de dados obtidos experimentalmente (capítulo 6), o nível de contribuição, no estabelecimento da largura do filamento depositado, da velocidade de deslocamento da mesa e das distâncias do bico extrusor em relação à superfície de deposição.

8.1.1 Materiais e métodos

A seguir descrevem-se os materiais e métodos usados para verificar o grau de interação da velocidade de deslocamento da mesa e da distância do bico extrusor, até superfície de deposição, na largura do filamento.

8.1.1.1 Materiais

Para a realização dos experimentos, utilizou-se um dispositivo, para extrudar materiais (capítulo 4) que possibilita o estudo do processo de modelagem por deposição de material em forma de filamento. Sendo um dispositivo mecânico para experimentação, ele possibilita a determinação dos parâmetros operacionais no processo de deposição de material sob temperatura ambiente.

O dispositivo foi instalado no eixo Z (deslocamento vertical) de uma fresadora CNC²¹ Didática (figura 24), marca: EMCO, modelo: F1 – CNC. Assim, foi possível emular os movimentos dos eixos (X, Y e Z) de uma máquina de PR e, com isso, obtiveram-se parâmetros de trabalho aqui estudados.

²¹O software da F1 – CNC objetiva o treinamento didático, sendo que os recursos disponíveis são destinados à programação de peças básicas, com programas limitados a 250 linhas, o que possibilita inserir a programação para gerar peças camadas sobre camadas e determinar a velocidade de deslocamento da mesa.

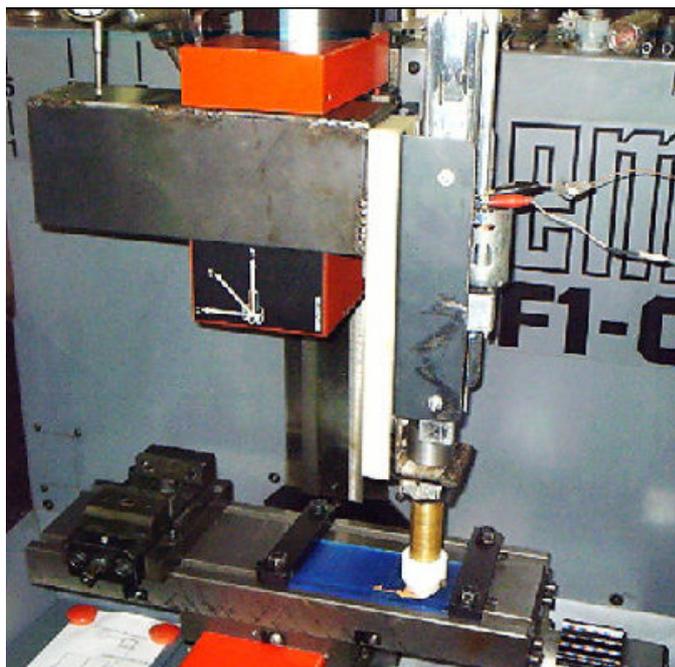


Figura 24 – Dispositivo montado na fresadora CNC – (elaborado pelo autor).

8.1.1.2 Métodos

A programação das coordenadas da trajetória do bico de saída de material foi feita linha a linha em código “G” para se depositar os filamentos sobre a superfície da mesa fresadora.

Em seguida, anotaram-se na programação em código “G” os seguintes parâmetros de operação:

- Distância do bico extrusor até a face da superfície de deposição do material, para o material não se espalhar ou ficar muito distante da superfície de deposição;
- Velocidade de deslocamento da mesa.

Com os parâmetros descritos, podem-se obter filamentos com larguras dimensionais variadas. Essa grandeza foi escolhida, pois, na deposição de material, pode ocorrer variação dimensional, tanto da largura quanto da espessura do filamento.

Conseqüentemente, pode haver variação dimensional, o que afeta a qualidade do protótipo.

Considerando-se que o filamento incha após a extrusão (capítulo 5 – item 5.5 – tabela 4), adotou-se uma faixa dimensional de limite máximo e mínimo para a largura do filamento, como segue:

- Largura média do filamento, após a extrusão, igual a 0,676 mm (tabela 4).
- Largura máxima do filamento: filamentos com largura de até 0,792 mm foram adotados como sendo o limite máximo da faixa de variação dimensional adequada para não ocorrer acúmulo de material na largura do filamento. Esse valor representa 17% acima do diâmetro do filamento após a extrusão;
- Largura mínima do filamento: filamentos com largura de até 0,693 mm foram adotados como sendo o limite mínimo da faixa de variação dimensional adequada para não ocorrer “falta” (esticamento), pois o filamento relaxa após a saída do bico extrusor, à pressão ambiente. Esse valor representa 2,5% acima do diâmetro do filamento após a extrusão.

Para a determinação dos valores das larguras do filamento, fixou-se a rotação inicial do motor²², e assim obteve-se a velocidade de deposição constante. Foram ajustadas a velocidade da mesa e da distância (D), o que possibilitou a obtenção de filamentos com larguras diferentes (figura 25, detalhe da secção A-A).

Ressalta-se que a verificação da distância (D) foi realizada via relógio apalpador (resolução igual a 0,01 mm) fixo no eixo Z (vertical) da máquina CNC. O apalpador foi zerado rente à superfície da mesa da máquina. Para verificar o valor da distância programada, acionou-se o comando para deslocar o eixo Z e em seguida ler o valor indicado no apalpador, a qual corresponde a distância D.

²² Para se medirem os valores da rotação do motor utilizou-se osciloscópio Tektronik – modelo TDS 2002 (ver experimentos realizados no item 5.4) .

Por meio da análise das medidas da largura do filamento, pretende-se conhecer o grau de contribuição da velocidade de deslocamento da mesa e da distância para deposição do material no processo estudado.

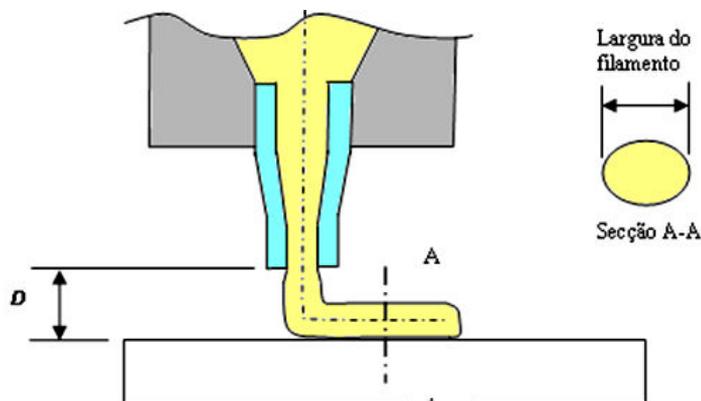


Figura 25 – Distância do bico extrusor à superfície de deposição (D) e largura do filamento – (elaborado pelo autor).

No tratamento estatístico das larguras dos filamentos, será utilizada a ANOVA, metodologia bastante empregada para a análise de dados experimentais. Em geral, a finalidade da ANOVA é testar diferenças significativas entre variâncias e assim verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores (velocidade de deslocamento da mesa e da distância para deposição no processo MDTA) exercem influência em alguma variável dependente, como a larguras dos filamentos. O procedimento para a implementação da ANOVA foi baseado em Drumond, Werkema, Aguiar (1996) e Spiegel, Schiller, Srinivasan (2004).

8.1.2 Experimentos

Inicialmente, na tabela 7, são apresentados os valores, obtidos empiricamente, das velocidades de deslocamento da mesa (4 níveis) e das distâncias (5 níveis). Com o uso desses parâmetros foram obtidos os valores das amostras das larguras dos filamentos que serão tratados estatisticamente, via ANOVA, para a verificação de quais fatores afetam mais a largura do filamento durante a deposição de material.

Tabela 7 – Grandezas de construção do dispositivo extrusor

Velocidades de deslocamento da mesa (mm/min)				Distância de deposição (mm) – distância entre a superfície de saída do bico e a superfície da mesa.				
305	350	370	400	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85

Foram mensuradas 120 amostras de filamentos (tabela 8), via microscópio óptico universal. Os valores foram tratados estatisticamente pela análise de variância, a qual permite estabelecimento do grau de contribuição dos fatores que afetam a qualidade de um produto ou processo e, especificamente nesse estudo, a forma geométrica do filamento depositado.

Tabela 8 – Valores das larguras das amostras de filamentos.

Velocidade da mesa: 305 mm/min						Velocidade da mesa: 350 mm/min					
Distância de deposição (mm)						Distância de deposição (mm)					
	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	
Largura do filamento	0,92	0,88	0,83	0,83	0,8	0,87	0,81	0,82	0,76	0,72	
	0,88	0,88	0,88	0,86	0,84	0,79	0,88	0,87	0,8	0,74	
	0,87	0,85	0,88	0,86	0,78	0,81	0,78	0,75	0,76	0,73	
	0,92	0,91	0,91	0,89	0,84	0,81	0,8	0,77	0,75	0,71	
	0,93	0,88	0,9	0,9	0,9	0,93	0,82	0,81	0,8	0,76	
	0,93	0,94	0,86	0,88	0,83	0,89	0,84	0,83	0,8	0,78	
Velocidade da mesa: 370 mm/min						Velocidade da mesa: 400 mm/min					
Distância de deposição (mm)						Distância de deposição (mm)					
	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	
Largura do filamento	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,72	0,73	0,72	0,72	0,7	
	0,79	0,73	0,75	0,71	0,69	0,71	0,78	0,72	0,73	0,8	
	0,87	0,81	0,73	0,73	0,7	0,64	0,64	0,63	0,62	0,64	
	0,74	0,75	0,74	0,71	0,69	0,65	0,69	0,65	0,66	0,63	
	0,76	0,74	0,73	0,71	0,68	0,6	0,67	0,68	0,66	0,65	
	0,71	0,69	0,7	0,66	0,69	0,67	0,7	0,69	0,68	0,69	

8.1.3 Análise dos resultados

A tabela 9, montada em planilha eletrônica (Excel), possibilita a verificação dos resultados em termos de contribuição e significância dos fatores (velocidade de deslocamento da mesa e distância para deposição).

Nota-se, a partir da análise dos dados obtidos, que a velocidade apresenta uma contribuição de 73,4% nos resultados das dimensões geométricas das larguras dos filamentos, enquanto a da distância para deposição é de apenas 6,1% e a da interação entre ambas de apenas 3,5%.

Tabela 9 – Análise de variância.

		Soma dos quadrados	GL	Média quadrática	F_0	$F_{5\%}$	Contribuição (%)
Total	$v =$	0,875	119				
Distância	$v_d =$	0,053	4	0,01326	9,570127	2,466	6,1
Velocidade	$v_v =$	0,642	3	0,21417	154,7566	2,696	73,4
Subtotal	$v_s =$	0,726	11				
Interação	$v_i =$	0,031	4	0,0076	5,530364	2,466	3,5
Residual	$v_e =$	0,149	108	0,001384			
							17,1 (Variação entre as repetições)

No gráfico 2, observa-se que na curva correspondente à velocidade de 305 mm/min, todos os valores das médias das distâncias de deposição estão acima de 0,792 mm, o que corresponde a 17% acima do diâmetro do bico, apresentando assim acúmulo de material.

Na curva correspondente à velocidade de 400 mm/min, praticamente todos os valores das médias das distâncias de deposição estão abaixo de 0,693 mm, o que corresponde a 2,5% acima do diâmetro do bico injetor, sendo o limite mínimo da faixa de variação dimensional, denotando assim a ocorrência de falta de material, ou seja, os filamentos sofreram alongamentos durante a deposição.

Em contrapartida, nas curvas correspondentes às velocidades de 350 mm/min e 370 mm/min os valores das médias das larguras encontram-se nos intervalos de acúmulo e de falta de material, o que reforça o alto grau de contribuição da velocidade de deslocamento da mesa sobre o processo.

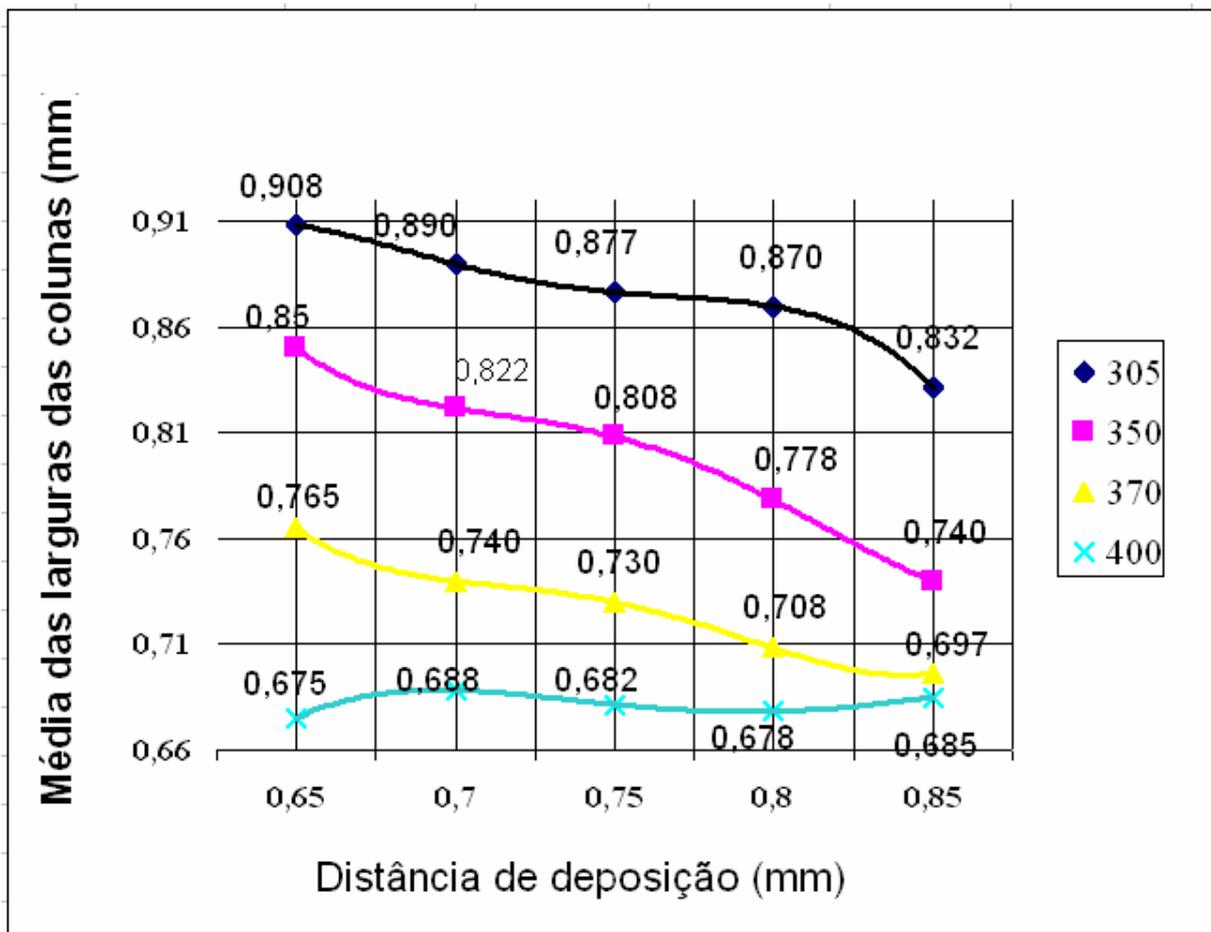


Gráfico 2 – Efeito da interação velocidade de deposição X distância para deposição – (elaborado pelo autor).

8.2 Velocidade de deposição e relativa

Nesse experimento objetiva-se verificar o grau de influência das velocidades de deposição e da velocidade relativa em relação à largura do filamento, as quais irão resultar em uma grandeza de rugosidade e, conseqüentemente, na forma geométrica durante a geração de protótipos por meio da MDTA.

Inicialmente, determinou-se experimentalmente a vazão de deposição do compósito, via procedimento descrito no capítulo 6, para, posteriormente, determinar-se a velocidade de deposição e utilizá-la também como velocidade de deslocamento da superfície de deposição.

8.2.1 - Materiais e métodos

Usando-se uma determinada velocidade de deposição e de deslocamento, na direção X e Y, pretende-se verificar o grau de contribuição desses dois parâmetros, medindo-se a largura do filamento após a extrusão do compósito à base de carboidrato sobre a superfície de deposição. Os valores das larguras obtidos serão tratados estatisticamente via ANOVA.

8.2.1.1 – Materiais

O compósito à base de carboidrato encontra-se, inicialmente, pastoso e homogêneo, o que facilita seu escoamento ao ser extrudado com uso do dispositivo desenvolvido no capítulo 4.

O dispositivo foi instalado no eixo Z (deslocamento vertical) de uma fresadora CNC Didática, marca: EMCO, modelo: F1–CNC, assim foi possível emular os movimentos dos eixos (X, Y e Z) de uma máquina de PR e, com isso, obtiveram-se os parâmetros de trabalhos aqui estudados.

8.2.1.2 – Métodos

No capítulo 6, item 6.6.1.2, foram descritas as etapas adotadas para se determinar empiricamente os valores referentes à vazão e as velocidades de deposição a serem utilizados na deposição dos filamentos no processo de MDTA. A seguir, serão apresentados os procedimentos que levaram à obtenção dessas grandezas.

Com o valor médio do volume deslocado e usando-se diâmetro do bico de saída de material igual a 0,64 mm, aplicaram-se os valores na expressão geral da vazão e

calculou-se, para quatro vazões diferentes, a velocidade de deposição média (Vd), obtendo-se aproximadamente 325, 355, 371 e 388 mm/min. Ainda nessa etapa, adotou-se uma faixa de acúmulo ideal e de falta (alongamento) de material para a velocidade relativa (V_R) em função da velocidade deposição, como segue:

$V_{R-25} = vd$: corresponde à faixa limite para acúmulo de material: a tolerância de até -25 mm/min abaixo da velocidade de deposição média foi adotada como limite máximo para observar a influência do acúmulo de material na rugosidade e na forma geométrica do protótipo;

$V_{R0} = vd$: corresponde ao valor “ideal”, para as condições de deposição de material descritas, sem que ocorra acúmulo ou falta de material: a velocidade de deslocamento da superfície de deposição é igual à velocidade de deposição média, sendo observadas a influência destas na rugosidade e na forma geométrica do protótipo;

$V_{R+25} = vd$: corresponde à faixa limite para falta (alongamento) de material: a porcentagem de até +7,5% acima da velocidade de deposição média foi adotada como limite máximo para observar a influência do falta (alongamento) de material na rugosidade e forma na geométrica do protótipo;

A programação das coordenadas da trajetória do bico de saída de material foi feita linha a linha em código “G” para se depositar os filamentos sobre a superfície da mesa fresadora a fim de verificar, sob as condições descritas acima, a largura do filamento.

8.2.2 – Experimentos

Na tabela 10, são apresentados os valores das velocidades de deposição (3 níveis) e de deslocamento da superfície da mesa (9 níveis) utilizados no experimento. Com

o uso desses parâmetros foram obtidos os valores das amostras das larguras dos filamentos que serão tratados estatisticamente, via ANOVA, para a determinação dos fatores que mais afetam a largura do filamento durante a deposição de material.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros operacionais

Velocidades de deposição (mm/min)				Velocidades de deslocamento da superfície da mesa (mm/min)											
325	337	371	388	300	325	350	312	337	362	346	371	396	363	388	413
				Velocidades relativas (mm/min)											
				-25	0	+25	-25	0	+25	-25	0	+25	-25	0	+25

Inicialmente, depositaram-se 54 amostras de filamentos (tabela 11), as quais foram mensuradas, via microscópio óptico universal, e os valores obtidos foram tratados estatisticamente, via ANOVA, que, especificamente nesse estudo, permitiu obter-se o grau de contribuição de determinados fatores na largura do filamento.

É importante ressaltar que a altura de deposição foi mantida constante para todas as combinações entre as velocidades.

Tabela 11 – Valores das larguras das amostras de filamentos.

		Velocidade relativa (mm/min)		
		+25	0	-25
Velocidades de deposição (mm/min)	325	0,67	0,73	0,71
		0,65	0,71	0,7
		0,66	0,73	0,72
		0,64	0,71	0,74
	337	0,64	0,69	0,72
		0,64	0,67	0,71
		0,66	0,66	0,7
		0,61	0,64	0,66
	371	0,67	0,77	0,78
		0,65	0,72	0,75
		0,63	0,66	0,72
		0,63	0,7	0,75
	388	0,68	0,7	0,76
		0,69	0,7	0,75
		0,7	0,7	0,77
		0,66	0,7	0,75

8.2.2 – Análise dos resultados

A tabela 12, produzida em planilha eletrônica (Excel), possibilita verificar os resultados em termos de contribuição e significância dos fatores (velocidade de deposição e de deslocamento da superfície da mesa). Nota-se, observando-se os dados, que a interação das velocidades contribui com 99,54% nos resultados das dimensões geométricas das larguras dos filamentos, enquanto que separadamente a contribuição é inexpressiva.

Tabela 12 – Análise de variância.

Fonte de variação		Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	F 5%	Contribuição (%)
Total	v_t	18,561	107				
Veloc. mesa	v_m	0,026	8	0,003	5,614	2,06	0,137
Veloc. deposição	v_d	0,007	2	0,004	6,4	3,11	0,039
Subtotal	v_s	18,509	15				
Interação	v_i	18,476	5	3,695	6508,6	2,33	99,54
Residual	v_r	0,052	92	0,001			0,281

8.3 Estudo de acúmulo e de falta de material na largura do filamento

Independentemente da tecnologia de transmissão de movimento empregada no sistema extrusor (item 5.2) para deslocar o êmbolo contra o material e gerar movimento, conforme modelagem descrita no item 5.3, a velocidade do embolo (V_e) deve ter relação com a velocidade de deposição (V_d) que está vinculada ao diâmetro do bico extrusor (D_b). Sendo assim, a velocidade de deposição deve ser balanceada com a velocidade de deslocamento da superfície de deposição (V_{dsd}), para não ocorrer o acúmulo ou falta de material durante a deposição. Para que se estabeleça o balanceamento entre esses fatores, impõe-se a determinação de intervalos de limite, como será discutido a seguir.

O gráfico 3 apresenta uma curva da velocidade de deposição versus velocidade de deslocamento da superfície de deposição, na qual acham-se os pontos limites de

8.3.1 Materiais e métodos

No experimento anterior, verificou-se a importância da velocidade de deposição e da velocidade da superfície de deposição na direção “X” e “Y”. Com base nesse estudo, pretende-se, agora, verificar os pontos limites de acúmulo (*PLA*) e de falta de material (*PLF*). Isso será verificado por meio das medidas das larguras dos filamentos.

8.3.1.1 Materiais

Com o uso da máquina à CNC dos experimentos anteriores foi possível emular os movimentos dos eixos (X, Y e Z) de uma máquina de PR e, com isso, obtiveram-se parâmetros de trabalhos aqui estudados. Ressalta-se que, nos experimentos, continuará usado o diâmetro do bico de saída de material igual a 0,64 mm.

8.3.1.2 Métodos

Serão depositados três filamentos (figura 26), com 70 mm de comprimento cada, sobre uma superfície e posteriormente serão lidas seis larguras, as quais estão equidistantes em 10 mm uma da outra no mesmo filamento.

Ressalta-se que as velocidades de deposição teórica 301 mm/min, 328 mm/min e 353 mm/min foram obtidas via expressão 11, item 5.5.

Os valores das velocidades de deposição e de deslocamento estão descritas a seguir:

- Para a velocidade de deposição de 301 mm/min, temos as seguintes velocidades de deslocamento da superfície de deposição, em mm/min: 275; 290; 305; 320 e 336;
- Para a velocidade de deposição de 328 mm/min, temos as seguintes velocidades de deslocamento da superfície de deposição, em mm/min: 285; 302; 318; 335; 352; e 369;
- Para a velocidade de deposição de 353 mm/min, temos as seguintes velocidades de deslocamento da superfície de deposição, em mm/min: 331; 349; 367; 386 e 404.

Os valores das velocidades de deposição foram obtidos conforme o que foi apresentado no item 5.5 (capítulo 5) e o tratamento estatístico das larguras dos filamentos será feito pelo valor médio aritmético das larguras lidas.

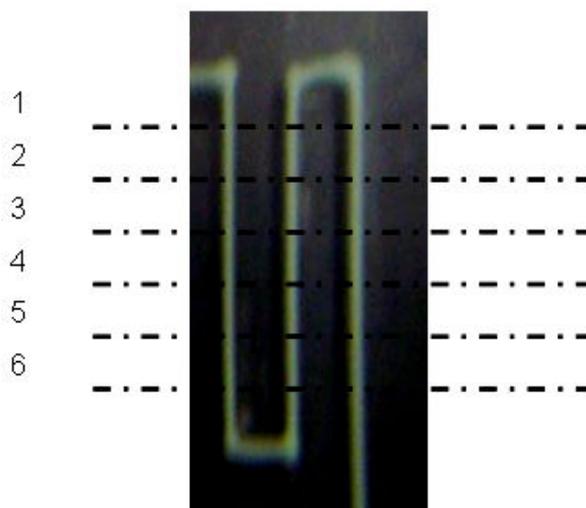


Figura 26 – Filamentos depositados sobre superfície – (elaborado pelo autor).

8.3.2 Análise dos resultados

Na presente análise, foram obtidos os seguintes resultados para a velocidade de deposição:

Nos gráficos 4, 5 e 6 tem-se o valor de 0,677 mm, que corresponde ao diâmetro do filamento após a extrusão (capítulo 5, item 5.5, tabela 4). Esse dado serve de parâmetro para verificar se o filamento, ao ser depositado sobre a mesa da máquina, é mais largo que o diâmetro após a extrusão, denotando acúmulo de material, ou menos largo, denotando falta de material.

No gráfico 4, com uso da velocidade teórica, nota-se que o filamento com largura de 0,69 mm, na velocidade de deslocamento de 290 mm/min, é maior, o que isso evidencia o acúmulo de material. Já na velocidade de deslocamento 305 mm/min o filamento tem 0,66 mm de largura, denotando falta de material.

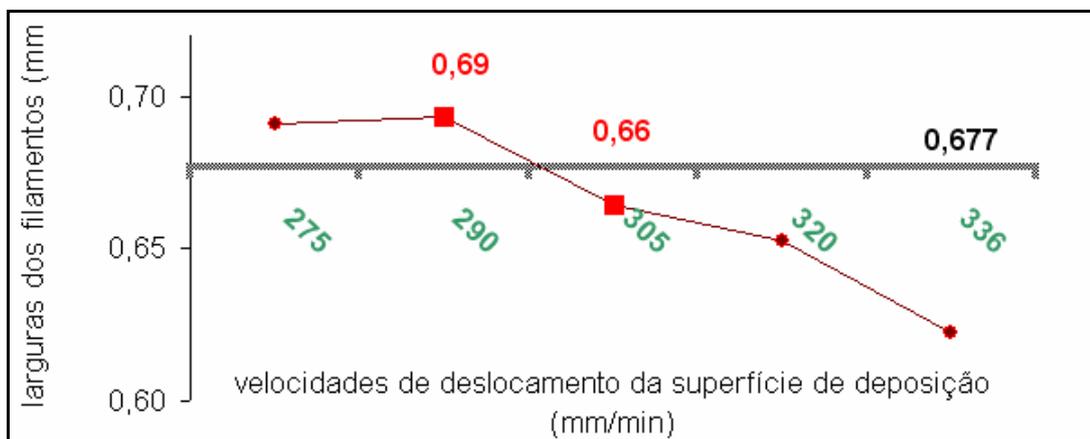


Gráfico 4 – Larguras médias de filamentos na Velocidade teórica 301 mm/min e altura de deposição igual a 0,67 mm – (elaborado pelo autor).

A largura do filamento 0,69 mm (gráfico 5), na velocidade de deslocamento 318 mm/min, é maior que o valor de 0,677 mm, que corresponde ao diâmetro do filamento após a extrusão. Assim, têm-se os valores de acúmulo e falta de material para as seguintes velocidades de deslocamento: 318 mm/min e 335 mm/min, respectivamente.

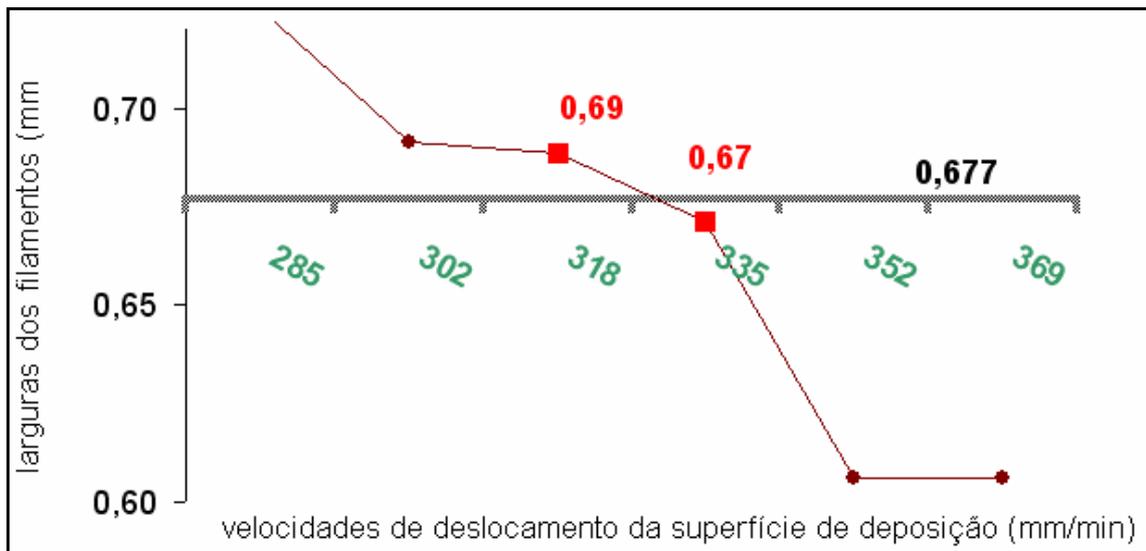


Gráfico 5 – Larguras médias de filamentos na Velocidade teórica 328 mm/min e altura de deposição igual a 0,67 mm – (elaborado pelo autor).

No gráfico 6, têm-se os valores de acúmulo e de falta de material para as seguintes velocidades de deslocamento: 330 mm/min e 367 mm/min, respectivamente. Ressalta-se que não se utilizou a velocidade de deslocamento 349 mm/min, pois a mesma está abaixo da velocidade teórica 353 mm/min.

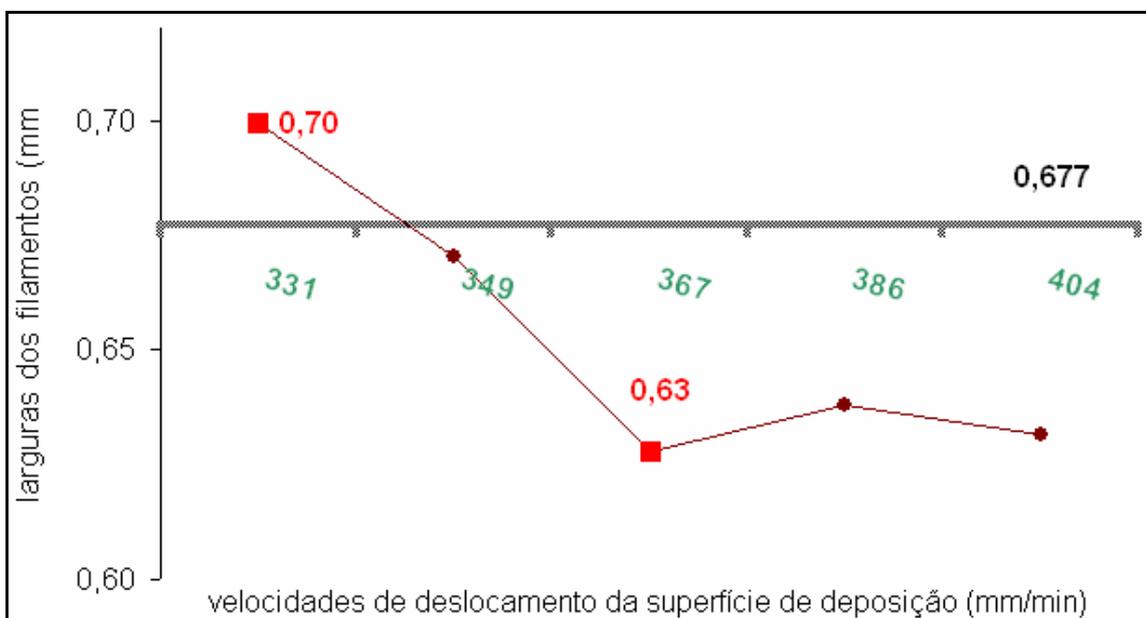


Gráfico 6 – Larguras médias de filamentos na Velocidade teórica 353 mm/min e altura de deposição igual a 0,67 mm – (elaborado pelo autor).

Nas velocidades de deposição 290 mm/min e 305 mm/min, 318 mm/min e 335 mm/min e 330 mm/min e 367 mm/min, evidenciou-se o acúmulo e falta de material na largura do filamento. Tais velocidades serão objeto de estudo, no item 8.4, para

se verificar qual influencia na forma geométrica e rugosidade na fabricação de peças na MDTA.

8.4. Experimento quantitativo: forma geométrica e rugosidade

Nesse experimento serão usados os valores das velocidades de deposição e da velocidade de deslocamento da superfície de deposição (item 8.3), para se determinar o efeito desses parâmetros na forma geométrica e na rugosidade e, assim, fundamentar e usar a MDTA na fabricação de protótipos.

8.4.1 Materiais e métodos

Com base no estudo dos pontos limites de acúmulo (*PLA*) e falta de material (*PLF*) (item 8.3), a seguir, apresentam-se os materiais e métodos adotados para se verificar, via uso das velocidades de deposição, quais valores limites, inferior e/ou superior, da velocidade de deslocamento da superfície de deposição influenciam positivamente tanto na rugosidade quanto na forma geométrica da peça fabricada.

8.4.1.1 Materiais

Nesse experimento, o compósito à base de carboidrato foi confinado no dispositivo instalado no eixo Y (deslocamento vertical) de uma fresadora MAHO, a qual executa movimentos circulares em 360 graus com apenas uma parada em um quadrante da circunferência, ao contrário da F1 – EMCO (para a cada $\frac{1}{4}$ de volta). Logo, com uso da MAHO, ocorre apenas um ponto de acúmulo de material decorrente dessa pausa, conforme verificado no item 7.3.

Ao se fixar o dispositivo extrusor no cabeçote vertical da fresadora, é possível emular os movimentos dos eixos X, Y e Z de uma máquina de PR e, com isso, fabricar peças circulares em camadas sobrepostas.

Por fim, será utilizado um microscópio óptico para medir os valores dos vales e picos da peça fabricada. Isso possibilitará o cálculo da Rugosidade Média (R_z)²³ e, simultaneamente, a verificação da forma geométrica da peça em termos de disposição dos filamentos sobrepostos.

8.4.1.2 Métodos

Serão depositados três filamentos (figura 27), a uma distância de 0,670 mm entre si. Tal distância considera o fator de inchamento do filamento, conforme estudo do inchamento do filamento realizado no item 5.5.

Com relação à forma geométrica da peça, sua circunferência externa mede 20 mm, a central, 18,66 mm, e a interna, 17,32 mm. Essa peça terá camadas sobrepostas, sendo que na primeira camada a altura de deposição será de 0,65 mm, que é a distância da face do bico extrusor até a superfície de deposição. As demais camadas terão altura de deposição igual a 0,63 mm.

²³ É o valor médio da rugosidade unitária Z_i obtida em cinco comprimentos de medição unitário " l_e " dentro do perfil de rugosidade.

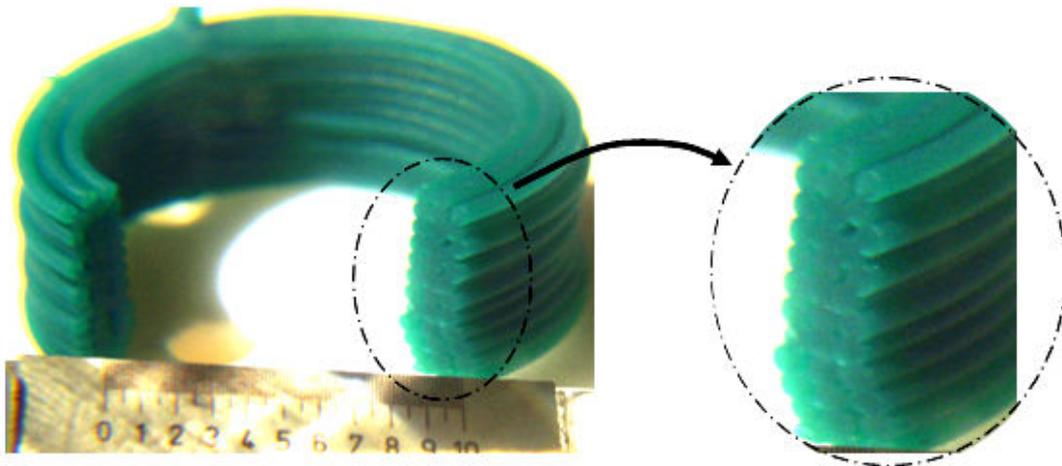


Figura 27 – Peça em forma circular e detalhe dos filamentos sobrepostos – (elaborado pelo autor).

Os valores das velocidades utilizadas nos experimentos serão as mesmas dos resultados obtidos no item 8.3.2 (tabela 13), pois os valores limites de deslocamento da superfície de deposição se referem aos valores de acúmulo e falta de material.

Tabela 13 – Valores de velocidades de deposição e de velocidade limite de deslocamento da superfície de deposição

Velocidades de deposição (mm/min)					
301		328		353	
Velocidades limites de deslocamento da superfície de deposição (mm/min)					
Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
290	305	318	335	330	367

Para se medir a rugosidade das peças, serão mensurados os vales e os picos dos filamentos sobrepostos (figura 28), considerando-se que o comprimento de 17,5 mm, adotado na amostragem (l_m), está em conformidade com a norma DIN 4768, assim como a distância aproximada de 3,2 mm entre picos e vales (l_e).

Com relação aos valores dos diâmetros dos filamentos da circunferência circunscrita interna, os mesmos serão usados para se calcular a rugosidade Z, que é obtida pela média aritmética da soma dos valores $R_{Z1} + \dots + R_{Z5}$ (figura 28).

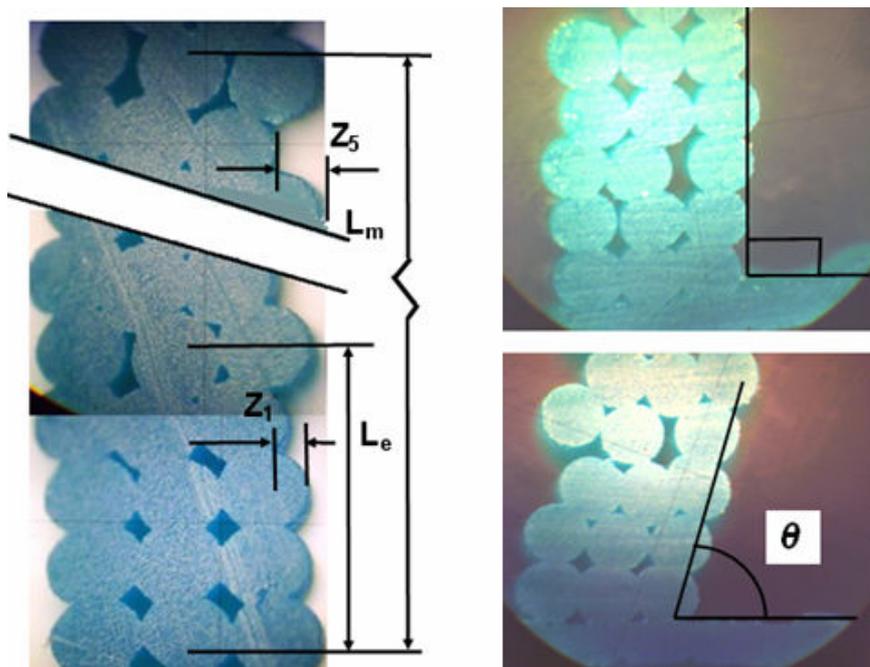


Figura 28 – Estratégia para a leitura dos picos e vales nos filamentos – conforme norma DIN 4768 e inclinação das peças (elaborado pelo autor).

A forma geométrica será verificada por meio da inclinação lateral da peça (figura 28) indicada pelo ângulo (θ) mensurado via microscópio óptico.

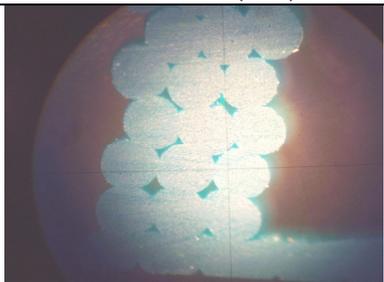
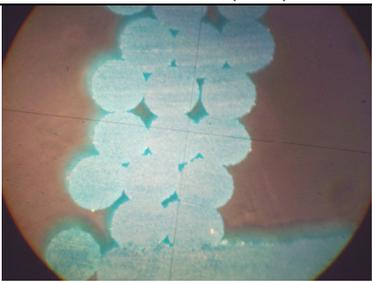
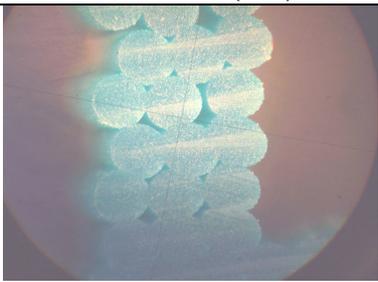
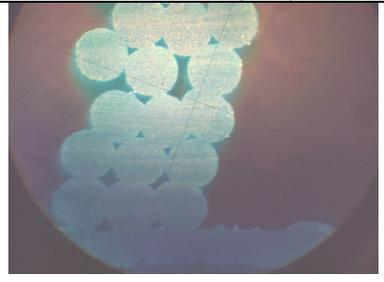
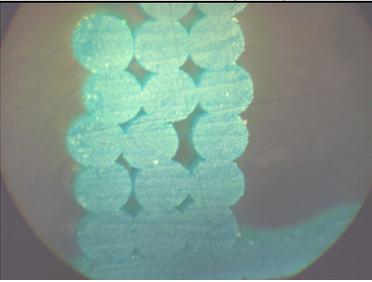
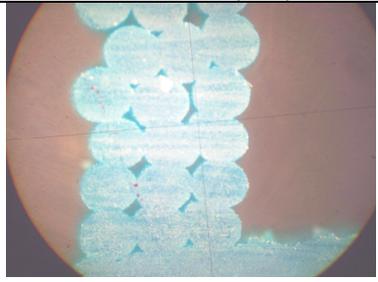
8.4.2 Análise dos resultados

Conforme apresentado na tabela 14, as amostras 03, 05 e 06 apresentaram pouca inclinação angular ($\theta_{\text{médio}} = 87^{\circ} 20'$), mas nas amostras 01, 02 e 04, ocorreram defeitos de forma geométrica mais acentuados ($\theta_{\text{médio}} = 73^{\circ}$), o que representa 50% das amostras analisadas. Essa porcentagem alta de defeitos é decorrente do valor de 290 mm/min da velocidade de deslocamento da superfície de deposição, a qual é menor que a velocidade de deposição (301 mm/min).

Esse desequilíbrio entre valores de velocidades influenciou negativamente os valores da rugosidade, os quais sofreram grande variação, conforme a amostra 03, que teve o maior valor de Rugosidade Média ($R_z = 197,2 \mu\text{m}$), e a amostra 05, que teve o menor valor de Rugosidade Média ($R_z = 121,4 \mu\text{m}$), principalmente nas amostras em que a forma geométrica se manteve praticamente perpendicular à superfície de deposição.

A diferença entre as velocidades de deposição e de deslocamento proporcionou inclinação lateral somente na disposição entre camadas, mas a forma geométrica do filamento do compósito não sofreu deformação após sair do bico extrusor.

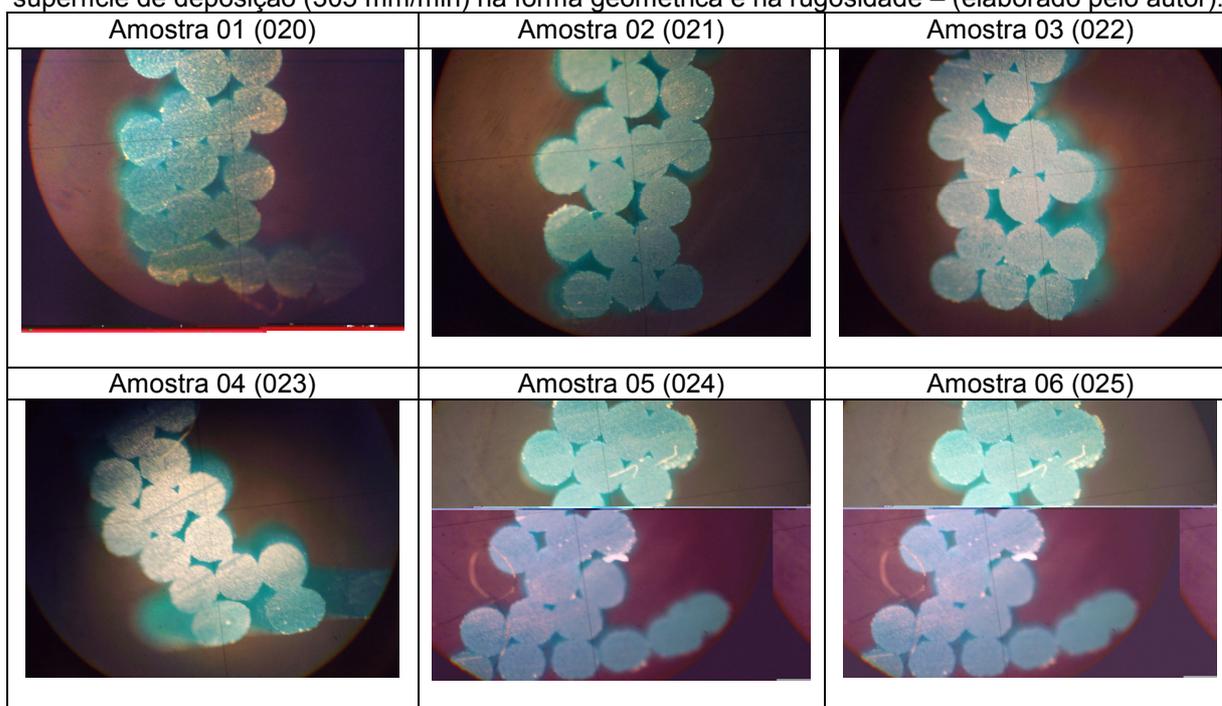
Tabela 14 – Efeito da velocidade de deposição (301 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição (290 mm/min) na forma geométrica e na rugosidade – (elaborado pelo autor).

Amostra 01 (003)		Amostra 02 (004)		Amostra 03 (005)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ), conforme figura 28 – item 8.4.1.2.								
75 °		72 °		86 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,221	148,6	R_{z1}	0,183	140,4	R_{z1}	0,274	197,2
R_{z2}	0,111		R_{z2}	0,100		R_{z2}	0,160	
R_{z3}	0,205		R_{z3}	0,175		R_{z3}	0,262	
R_{z4}	0,118		R_{z4}	0,111		R_{z4}	0,124	
R_{z5}	0,088		R_{z5}	0,133		R_{z5}	0,166	
Amostra 04 (006)		Amostra 05 (007)		Amostra 06 (008)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ)								
72 °		88 °		88 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,228	133,0	R_{z1}	0,103	121,4	R_{z1}	0,227	156,8
R_{z2}	0,101		R_{z2}	0,167		R_{z2}	0,131	
R_{z3}	0,123		R_{z3}	0,103		R_{z3}	0,142	
R_{z4}	0,101		R_{z4}	0,128		R_{z4}	0,152	
R_{z5}	0,112		R_{z5}	0,106		R_{z5}	0,132	

Conforme apresentado na tabela 15, o valor da velocidade de deslocamento da superfície de deposição de 305 mm/min, que é o valor superior em relação à velocidade de deposição de 301 mm/min, influencia negativamente a forma geométrica da secção transversal em 100% das amostras. Tal fato também

impossibilitou a obtenção dos valores da Rugosidade Média (R_z). Isso denota que o valor superior da velocidade de deslocamento da superfície de deposição está inteiramente em descompasso com velocidade de deposição.

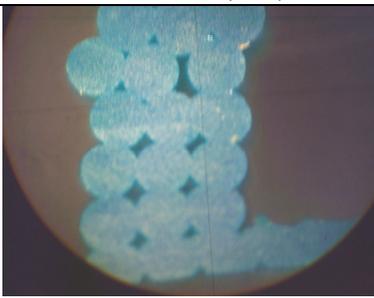
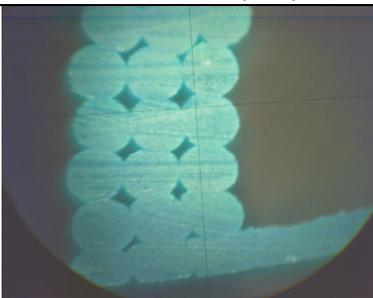
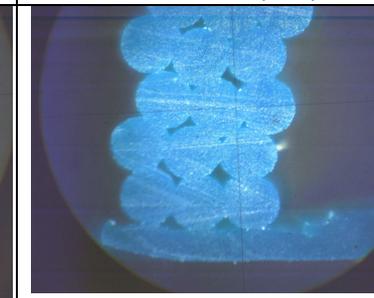
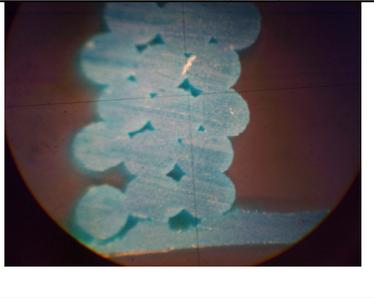
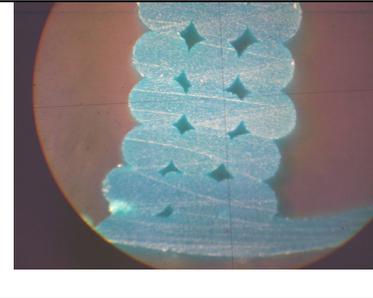
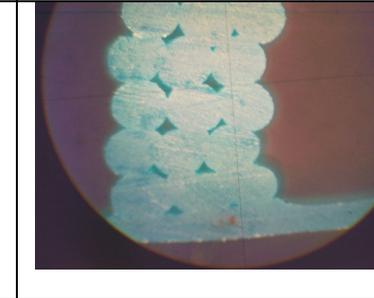
Tabela 15 – Efeito da velocidade de deposição (301 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição (305 mm/min) na forma geométrica e na rugosidade – (elaborado pelo autor).



As amostras (tabela 16), de uma maneira geral, tiveram pouca inclinação lateral ($\theta_{\text{médio}} = 85^{\circ} 30'$), que corresponde ao defeito da forma geométrica, excetuando-se a amostra 05, que teve inclinação lateral mais acentuada, principalmente a partir da 4ª camada.

Já os valores das rugosidades estiveram próximos, com exceção da amostra 01 ($R_z = 144,00 \mu\text{m}$ – menor valor entre as amostras). Tais resultados sugerem que os parâmetros (velocidades de deposição = 382 mm/min e de deslocamento = 318 mm/min) estão próximos do balanceamento entre ambas, o que possibilita a obtenção de peças com forma geométrica e rugosidades tendendo a serem constantes.

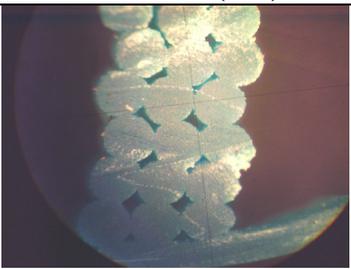
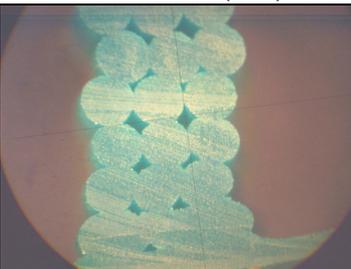
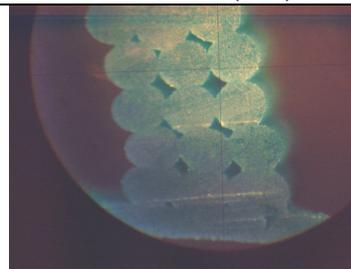
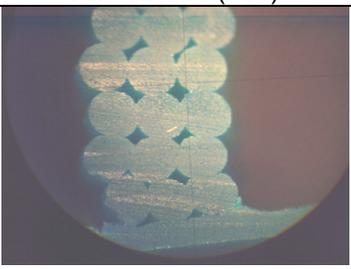
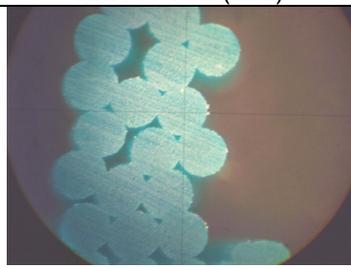
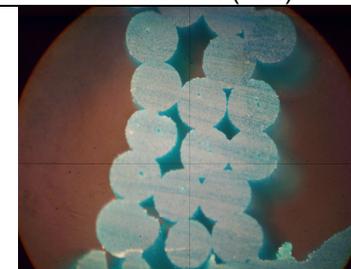
Tabela 16 – Efeito da velocidade de deposição (328 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição (318 mm/min) na forma geométrica e rugosidade – (elaborado pelo autor).

Amostra 01 (027)		Amostra 02 (028)		Amostra 03 (029)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ), conforme figura 28 – item 8.4.1.2.								
87 °		90 °		84 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,089	144,00	R_{z1}	0,169	184,4	R_{z1}	0,165	210,8
R_{z2}	0,177		R_{z2}	0,199		R_{z2}	0,287	
R_{z3}	0,139		R_{z3}	0,194		R_{z3}	0,122	
R_{z4}	0,239		R_{z4}	0,268		R_{z4}	0,337	
R_{z5}	0,079		R_{z5}	0,092		R_{z5}	0,143	
Amostra 04 (030)		Amostra 05 (031)		Amostra 06 (032)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ)								
85 °		81 °		86 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,154	188,4	R_{z1}	0,249	207,6	R_{z1}	0,083	184,8
R_{z2}	0,244		R_{z2}	0,270		R_{z2}	0,271	
R_{z3}	0,140		R_{z3}	0,174		R_{z3}	0,154	
R_{z4}	0,302		R_{z4}	0,211		R_{z4}	0,297	
R_{z5}	0,102		R_{z5}	0,134		R_{z5}	0,119	

Para os parâmetros ajustados (tabela 17), ocorreram defeitos de disposição entre filamentos e camadas afetando a forma geométrica das amostras 01 e 03 (33,33 % das amostras), já os valores de rugosidade das amostras 05 e 06 foram descartados pela irregularidade da forma geométrica. Tais amostras representam 33,33% do universo analisado.

Observa-se, a partir desses dados, que novamente a velocidade de deslocamento com valor superior (335 mm/min) ao da velocidade de deposição (328 mm/min) prejudica tanto a forma geométrica quanto a rugosidade da peça fabricada.

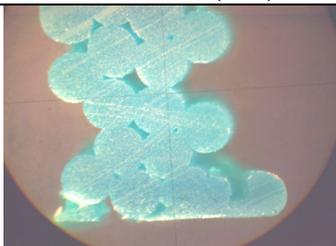
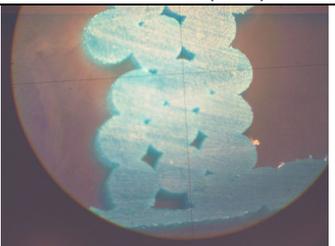
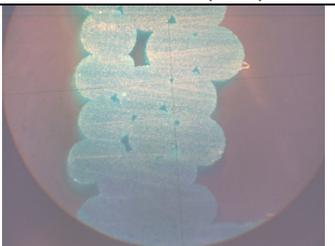
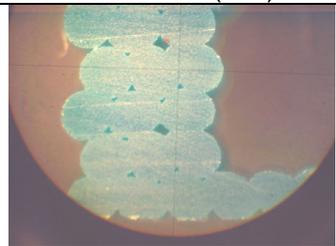
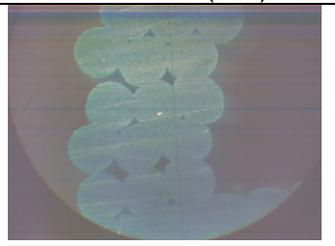
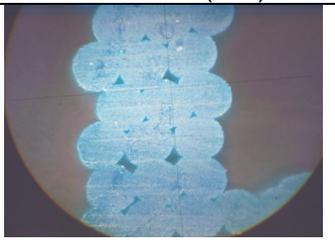
Tabela 17 – Efeito da velocidade de deposição (328 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição (335 mm/min) na forma geométrica e na rugosidade

Amostra 01 (066)		Amostra 02 (067)		Amostra 03 (068)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ), conforme figura 28 – item 8.4.1.2.								
81 °		86 °		75 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,209	225,8	R_{z1}	0,085	181,6	R_{z1}	0,133	181,4
R_{z2}	0,266		R_{z2}	0,231		R_{z2}	0,129	
R_{z3}	0,189		R_{z3}	0,198		R_{z3}	0,160	
R_{z4}	0,322		R_{z4}	0,253		R_{z4}	0,078	
R_{z5}	0,143		R_{z5}	0,141		R_{z5}	0,407	
Amostra 04 (069)		Amostra 05 (070)		Amostra 06 (071)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ)								
89 °		85 °		81 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,151	202,4	R_{z1}	-	Peça irregular	R_{z1}	-	Peça irregular
R_{z2}	0,241		R_{z2}	-		R_{z2}	-	
R_{z3}	0,208		R_{z3}	-		R_{z3}	-	
R_{z4}	0,262		R_{z4}	-		R_{z4}	-	
R_{z5}	0,150		R_{z5}	-		R_{z5}	-	

Nas amostras 03, 04, 05 e 06 (tabela 18), a rugosidade, em algumas amostras, variou muito, como nas amostras 03 ($R_z = 292,4 \mu\text{m}$ – maior valor) e 04 ($R_z = 165,6 \mu\text{m}$ – menor valor). Por outro lado, houve pouca inclinação ($\theta_{\text{médio}} = 88^\circ 48'$), principalmente nas amostras 03, 04, 05 e 06, favorecendo a forma geométrica. Isso

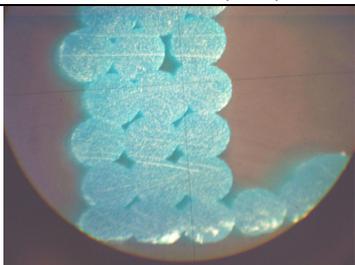
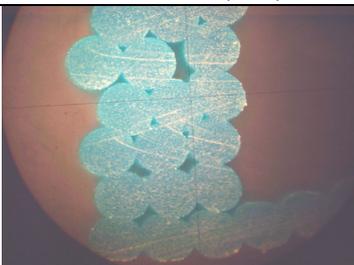
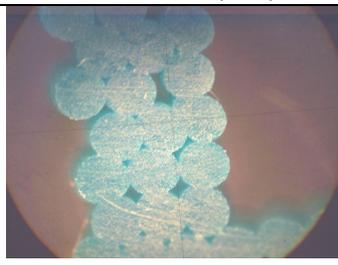
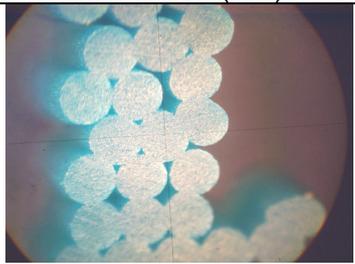
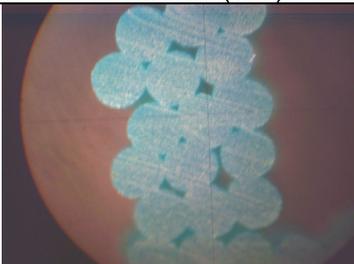
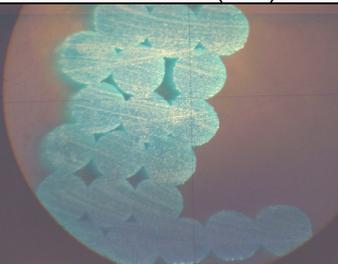
reforça a idéia de que o valor da velocidade de deslocamento da superfície de deposição deva ser menor ou até mesmo próximo ao valor da velocidade de deposição, conforme visto nos casos anteriores.

Tabela 18 – Efeito da velocidade de deposição (353 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição (330 mm/min) na forma geométrica e na rugosidade

Amostra 01 (053)		Amostra 02 (054)		Amostra 03 (055)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ), conforme figura 28 – item 8.4.1.2.								
-		89 °		85 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	-	Peça irregular	R_{z1}	0,151	166,8	R_{z1}	0,400	292,4
R_{z2}	-		R_{z2}	0,175		R_{z2}	0,122	
R_{z3}	-		R_{z3}	0,097		R_{z3}	0,417	
R_{z4}	-		R_{z4}	0,342		R_{z4}	0,074	
R_{z5}	-		R_{z5}	0,069		R_{z5}	0,449	
Amostra 04 (056)		Amostra 05 (057)		Amostra 06 (032)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ)								
90 °		90 °		90 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R_{z1}	0,147	165,6	R_{z1}	0,169	195,6	R_{z1}	0,172	198,2
R_{z2}	0,212		R_{z2}	0,258		R_{z2}	0,263	
R_{z3}	0,122		R_{z3}	0,131		R_{z3}	0,123	
R_{z4}	0,287		R_{z4}	0,359		R_{z4}	0,323	
R_{z5}	0,060		R_{z5}	0,061		R_{z5}	0,110	

Para a velocidade de deslocamento ajustada em 367 mm/min (valor superior ao da tabela 19), em relação à velocidade de deposição de 353 mm/min, os filamentos, na maioria das amostras, estão sobrepostos de maneira irregular e com vários vazios entre si, prejudicando a rugosidade, que teve muita variação, como nas amostras 03 ($R_z = 175,6 \mu\text{m}$ – menor valor) e 06 ($R_z = 262,4 \mu\text{m}$ – maior valor).

Tabela 19 – Efeito da velocidade de deposição (353 mm/min) e velocidade de deslocamento da superfície de deposição (367 mm/min) na forma geométrica e rugosidade

Amostra 01 (059)		Amostra 02 (060)		Amostra 03 (061)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ), conforme figura 28 – item 8.4.1.2.								
90 °		90 °		88 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R _{z1}	0,167	183,2	R _{z1}	0,209	181,8	R _{z1}	0,232	175,6
R _{z2}	0,197		R _{z2}	0,230		R _{z2}	0,188	
R _{z3}	0,183		R _{z3}	0,169		R _{z3}	0,145	
R _{z4}	0,234		R _{z4}	0,218		R _{z4}	0,187	
R _{z5}	0,135		R _{z5}	0,083		R _{z5}	0,126	
Amostra 04 (062)		Amostra 05 (063)		Amostra 06 (064)				
								
Valores do ângulo de inclinação (θ)								
84 °		84 °		71 °				
Leituras dos picos e vales (mm) e valor médio da rugosidade (μm)								
R _{z1}	0,256	237,6	R _{z1}	0,235	212,8	R _{z1}	0,224	262,4
R _{z2}	0,355		R _{z2}	0,245		R _{z2}	0,298	
R _{z3}	0,183		R _{z3}	0,130		R _{z3}	0,251	
R _{z4}	0,281		R _{z4}	0,286		R _{z4}	0,319	
R _{z5}	0,113		R _{z5}	0,168		R _{z5}	0,22	

Por fim, observou-se que existe uma tendência de melhora tanto da rugosidade quanto da forma geométrica da peça fabricada, especificamente quando se ajustam as velocidades de deslocamento com valores inferiores aos da velocidade deposição, como 290 mm/min, 318 mm/min e 330 mm/min e as correspondentes velocidades teóricas de deslocamento (301 mm/min.; 328 mm/min. e 353 mm/min.), as quais proporcionam melhores resultados tanto na forma geométrica quanto na rugosidade das amostras.

9. Conclusões

Como na epígrafe do sábio Albert Einstein: “Die Vorstellung ist wichtig als das Wissen“, ou seja, “a imaginação é tão importante quanto o conhecimento”, pois muitas das soluções da vida, e especificamente da tecnologia, são obtidas pela imaginação. Com base nesse pensamento é que, inicialmente, imaginou-se um novo caminho na prototipagem rápida e, posteriormente, foram estudados os processos e a transformação do estado do material.

9.1. Conclusões sobre uso de material alternativo

Nos processos da família *Fused Layer Modeling* (FLM), é necessário que a matéria-prima, antes de ser injetada e modelada, mude do estado originalmente sólido para fundido via aquecimento oriundo de resistência elétrica, acoplada ao dispositivo injetor.

Outro problema acarretado com tais processos são os altos custos do protótipo, da matéria-prima, do equipamento e da manutenção (Apêndice A)(Apêndice F), devido à mudança de estado da matéria-prima.

Assim, desenvolveu-se o processo de Modelagem por Deposição sob Temperatura Ambiente (MDTA), o qual proporciona uma nova ramificação no modo de se trabalhar materiais. Isto é, ao se realizar a extrusão sob temperatura ambiente, a cura do material é obtida naturalmente, sem aquecimento, como nos processos FLM, que usam material no estado sólido.

Algumas características do material alternativo e dos protótipos construídos com esse material, via MDTA, são apresentadas no item 9.3 (Experimentos qualitativos).

9.2. Conclusões sobre uso dispositivo da MDTA

Somente são conhecidos dispositivos e processos de prototipagem rápida via modelagem por deposição a quente, como segue:

Fused Deposition Modeling (FDM) e Extrusora Prototipadora (EP), que utilizam termoplástico como matéria prima para produzir protótipos;

Mult Jet Solidification (MJS), que utiliza as seguintes matérias-primas: metálicos e cerâmicos (adicionados a aglutinante e mistura), termoplásticos, polímeros e ceras;

Sanders/Inkjet Modeling e *Multi-Jet Modeling* (MJM), que utilizam termoplástico e cera;

Three Dimensional Printing (3DP), que utiliza-se aglutinante à base de água, que é aspergido sobre pó (amido de batata ou gesso). Outra possibilidade é usar resina foto sensível como aglutinante sobre o material.

Embora esses processos de prototipagem rápida via modelagem por deposição a quente tenham aplicação prática na produção de protótipos, alguns inconvenientes podem-lhe ser atribuídos. Nos processos FDM, MJS, *Sanders/Inkjet Modeling* e MJM, por exemplo, deve-se ter um sistema para medir, ajustar e controlar a temperatura da matéria-prima a ser fundida e, especificamente no FDM, deve-se também ter um sistema para medição, ajuste e controle da atmosfera de fabricação do protótipo. Nesses processos necessita-se ainda de construção de proteção, devido à fusão da matéria-prima.

Tendo em vista esses problemas e com o propósito de superá-los, foi desenvolvido o dispositivo extrusor e o processo para a fabricação de protótipos via modelagem por deposição sob temperatura ambiente realizada com o compósito à base de carboidrato no estado sólido.

O dispositivo extrusor e o processo para a fabricação de protótipos via MDTA solucionam os inconvenientes aventados na prototipagem rápida via modelagem por deposição, pois o dispositivo extrusor do compósito à base de carboidrato dispensa uso de resistência elétrica, bem como do sistema para medir, ajustar e controlar a temperatura, para fundir a matéria-prima e da atmosfera de fabricação do protótipo. Isso possibilita que tanto a preparação quanto a operação do dispositivo extrusor da MDTA tornem-se extremamente mais simples que a dos processos de prototipagem rápida via modelagem por deposição a quente, devido ao fato de que o dispositivo extrusor tem nova e simples construção, de modo que também pode ser montado em máquinas fresadoras a CNC para execução de trabalhos de prototipagem rápida.

A seguir, serão apresentados os resultados dos experimentos realizados nessa pesquisa.

9.3. Conclusões dos experimentos qualitativos

Após comparação realizada entre os protótipos construídos com a MDTA e os construídos com os processos EP e FDM (Apêndice F), conclui-se que:

Embora o compósito à base de carboidrato seja pastoso, suporta o peso de uma camada sobre a outra, ocorrendo aderência entre ambas, sem ocorrer deformação da forma cilíndrica do filamento, de modo que o protótipo mantém estabilidade mesmo antes da cura.

O tempo de cura na MDTA é longo, necessitando-se de aproximadamente de 24 horas para que o protótipo seja manipulado sem que ocorra deformação. Essa variável pode ser reduzida via estudo dos elementos constituintes do compósito.

Na MDTA, para fabricar protótipos, não é necessária a preparação da máquina como no FDM, em que a atmosfera para a construção do protótipo deve ser controlada para que camadas e filamentos de ABS se adiram. O compósito à base de

carboidrato é confinado em um recipiente e pode ser utilizado após grandes intervalos de tempos de espera não prejudicando a aderência entre camadas e filamentos.

Realizaram-se, ainda, testes com os protótipos fabricados por meio da MDTA, na construção de cavidades em gesso para posterior fundição de modelos (Apêndice G) e os resultados indicam que esse processo pode ser utilizado também para este fim.

Os processos de PR foram e são desenvolvidos em outros países, de modo que o custo para aquisição dos equipamentos de PR é grande (por exemplo, o custo da máquina de EP (EXTRUDEX KUNSTSTOFFMASCHINEN – modelo: 16D75417) é de R\$ 195.000,00 (setembro 2005), e da FDM (modelo: Prodigy - Plus) é de cerca R\$ 205.920,00 (setembro 2005) não inclusos os custos de instalação). Já a MDTA possibilita, por sua característica de operação, supor que o preço do equipamento seja menor. Além disso, o mercado nacional, também nessa área, é dependente, pois os processos FDM e EP usam tecnologia dos países de origem, enquanto na MDTA a tecnologia do processo pode ser aqui aprimorada.

9.4. Conclusões dos experimentos quantitativos

Com base nos resultados dos experimentos (item 8.1) usando-se a MDTA, observou-se, no tratamento estatístico, que a contribuição da velocidade de deslocamento da mesa é muito expressiva (73,4%) comparada com a distância de deposição (6,1%), afetando assim a dimensão geométrica da largura do filamento, pois na velocidade de 305 mm/min ocorre acúmulo de material (maiores larguras de filamento), ao passo que na velocidade de 400 mm/min ocorre falta de material (menores larguras de filamento).

A determinação da interação (item 8.2) dos parâmetros operacionais da MDTA, como a velocidade de deposição e a de deslocamento da superfície da mesa tem expressiva interação (99,54%) na dimensão geométrica da largura do filamento se

comparada com ambas atuando separadamente. Isso denota a importância dos valores das velocidades serem próximos para não ocorrer acúmulo de material (maiores larguras de filamento) ou falta de material (menores larguras de filamento).

Durante a extrusão do material, observou-se que as velocidades de deposição e de deslocamento devem ser balanceadas (item 8.3) entre si, ou seja, devem-se obter valores numéricos próximos para evitar o acúmulo e falta de material durante a deposição de material nas diversas velocidades de deposição e de deslocamento da superfície de deposição. Isso possibilita, construir peças camadas sobre camadas e verificar a forma geométrica e as rugosidades.

Com relação à forma geométrica e rugosidade (item 8.4), fizeram-se experimentos com diversas velocidades de deposição e de deslocamento e observou-se que existe uma tendência de melhora tanto da rugosidade quanto da forma geométrica da peça fabricada, especificamente quando se ajustam as velocidades de deslocamento com valores inferiores aos da velocidade deposição, como 290 mm/min 318 mm/min e 330 mm/min e as correspondentes velocidades de deslocamento (301 mm/min; 328 mm/min e 353 mm/min). Tais resultados reforçam a validade dos resultados do estudo da influência da velocidade de deposição e de deslocamento da superfície de deposição realizado, no item 8.3.

Tais constatações são de fundamental importância para o estudo dos parâmetros operacionais da MDTA e também para outros processos de deposição de formas livres visando a obter valores das rugosidades e das formas geométricas.

9.5. Conclusões finais da MDTA

Ao se analisarem parâmetros como temperatura de fusão, velocidade de deposição, preparação da máquina, tempo de espera, tempo de deposição, processo de geração do modelo, custos operacionais, custo de material e tipos de protótipos, conclui-se que os materiais com potencial para serem trabalhados sob temperatura

ambiente são uma alternativa válida para a construção de protótipos com custo relativamente menor.

Por meio de experimentos qualitativos e quantitativos, avaliou-se que o processo de PR com os materiais alternativos propostos é viável, de modo a ser possível construir os protótipos para diversas aplicações, assim como reduzir o custo tanto do processo em si quanto da máquina e ainda reduzirem-se os equipamentos periféricos envolvidos.

10. – Sugestões para trabalhos futuros

Estudar a abrangência de aplicação da MDTA na construção de protótipos, tais como na fabricação de pequeno volume de produtos para o mercado, objetos personalizados, maquetes, moldes peças de mostruário, peças para fins didáticos, etc.

Estudar a aplicabilidade da MDTA no *Rapid Manufacturing* (RM).

Estudar novos materiais para trabalhar à temperatura ambiente na construção de protótipos por meio da MDTA, como na área médica para reconstituição de partes do corpo humano (DAS, et al, 2003) (ANG, LEONG, CHUA, 2006) (KALITA, et al, 2005) (LANDERS, et al, 2002) (KHALIL, NAM, SUN, 2005) (WORLD TECHNOLOGY EVALUATION CENTER INC., 2004).

Estudo do MDTA na aplicação da reprodução de imagens via modelagem por deposição à temperatura ambiente de materiais alternativos de baixo custo.

Estudar a abrangência de aplicação do MDTA no *Rapid Tooling* (RT) (LINDNER, 2002).

Aprimorar e estudar as variáveis do MDTA, tais como:

1) Trajetória para a deposição do material, pois durante a extrusão ocorre acúmulo de material ao se repetir o caminho na mesma camada, o que se deve à extrusão de material ser contínua (KÜNSTNER, 2002) (WEITZEL, 2003) (QIU, et al, 2001);

2) Forma interna do bico de extrusão, pois a geometria do bico extrusor pode influenciar negativamente a saída de material através do bico afetando a velocidade de extrusão (KÜNSTNER, 2002) (WEITZEL, 2003);

3) Pressão entre as camadas para conhecer a aderência entre camadas e sua influência na forma do filamento depositado (KÜNSTNER, 2002) (WEITZEL, 2003);

4) Ajuste da distância de deposição que pode auxiliar na pressão de aderência entre filamentos ou mesmo camadas, conforme coeficiente de inchamento do material (item 5.5 – capítulo 5), pois o material pode sofrer variação dimensional após a extrusão (LEE, ABDULLAH, KHAN, 2005) (MASOOD, 1996). Esse estudo é importante para avaliar a relação diâmetro, vazão, pressão, entre outros elementos.

5) Coeficiente de contração do material. O compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico assim como o compósito à base de complexo de carboidrato, são materiais que sofrem contração durante o processo de cura. Isso pode afetar a dimensão e a forma geométrica do protótipo em várias aplicações;

Estudo e aprimoramento dos seguintes aparatos:

1) Dispositivo de extrusão, pois a troca de material no dispositivo atual, durante o processo é relativamente demorada (aproximadamente 10 minutos);

2) Estudo de dispositivo apropriado para o depósito do compósito de matriz polimérica com reforço cerâmico. O material base deve permanecer separado do aglomerante até o momento de deposição na camada em construção, devido ao tempo de cura ser pequeno;

3) Desenvolvimento de um sistema de controle eletrônico (BUKKAPATNAM, CLARK, 2007) para o dispositivo extrusor de compósito à base de carboidrato manter o fluxo de material constante a fim de que não ocorra falta ou por outro lado acúmulo de material depositado;

4) Estudo da variação dimensional do diâmetro de saída do material no processo MDTA, durante a extrusão. Esse estudo é importante para avaliar a relação diâmetro, vazão, pressão, entre outros fatores;

5) Desenvolvimento de um método para otimizar (CHOI, SAMAVEDAM, 2002) (THRIMURTHULU, PANDEY, REDDY, 2004), eliminar ou diminuir a variação da largura do filamento em relação à largura esperada ou mesmo que permita ajustar os parâmetros (formato do bico injetor, diâmetro, inclinação, etc.) do processo para se ter a largura desejada (ZIEMIAN, CRAWN, 2001). A própria largura do filamento pode ser um parâmetro a ser escolhido no processo, pois uma largura menor significa melhor resolução na construção do protótipo (ANITHA, ARUNACHALAM, RADHAKRISHNAN, 2001) (ARMILLOTTA, 2006), e uma largura maior significa menor tempo de construção.

11. Bibliografia de referência

AHN, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping*, v 8, n 4, p 248 – 257, 2002.

ANG, K.C.; LEONG, K.F.; CHUA, C.K.; CHANDRASEKARAN, M. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modeling-fabricated porous structures. *Rapid Prototyping Journal*, v. 12, n 2, p 100 - 105, 2006.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, v 118, p 385 – 388, 2001.

ARMILLOTTA, A. Assessment of surface quality on textured FDM prototypes. *Rapid Prototyping Journal*, v. 12, n 1, p 35 - 41, 2006.

BÄSECKE, W. **Einsatz von Rapid Prototyping – Technologien in der industriellen Gußproduktentwicklung.** 1999. Tese (Doutorado) – Fakultät für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Alemanha.

BEAL, V.E. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção.** 2002. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.

BELLINI, A.; SHOR, L.; GUCERI, S.I. New developments in fused deposition modeling of ceramics. *Rapid Prototyping Journal*, v. 11, n 4, p 214-220, 2005.

BIRKE, C. **Der Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren im Konstruktionsprozeß.** 2002. Tese (Doutorado) – Institut für Maschinenkonstruktion Otto von-Guericke, Universität Magdeburg, Magdeburg, Alemanha.

BOURELL, D.L.; BEAMAN, J.J.; BARLOW, J.W.; CRAWFORD, R.H.. Current and future trends in solid freeform fabrication. **The International Society for Optical Engineering**. Volume 2910, p. 104-112, Nov. 1996.

BRANDNER, S.. **Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**. 1999. Tese (Doutorado) – Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik, Technischen Universität München, München, Alemanha.

BREINTINGER, F. **Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**. 2002, Tese (Doutorado) – Lehrstuhl Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften, Technischen Universität München, München, Alemanha.

BRUNETT, F.: **Tópicos de mecânica dos fluidos**. Editora USP, 1974, 235p.

BUKKAPATNAM, S.; CLARK, B. Dynamic Modeling and Monitoring of Contour Crafting – An Extrusion – Based Layered Manufacturing Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 129, p 135-142, 2007.

CAND, E. W.; MUELLER, D. H.; MUELLER, H. Beschreibung ausgewählter Rapid Prototyping Verfahren. In: Bremen Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft an der Universität Bremer (BIBA), Bremen, Alemanha, 2002. p8.

CAPUANO, E. A. P. **Análise crítica do papel da Prototipagem Rápida voltada ao desenvolvimento de produtos**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil.

CHANG, C.C. Rapid prototyping fabrication by UV resin spray nozzles. *Rapid Prototyping Journal*, v. 10, n 2, p 136-145, 2004.

CHARTIER, T.; CHAPUT, C.; DOREAU, F.; LOISEAU, M. Stereolithography of structural complex ceramics parts. *Journal of Materials Science*. v 37, p 3141 – 3147, 2002.

CHOI, S.H.; SAMAVEDAM, S. Modelling and optimisation of Rapid Prototyping. Computers in Industry, v 47, p 39 – 53, 2002.

COREMANS, A. L. P. **Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**, 1999. Tese (Doutorado) – Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie von der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander, Universität Erlangen-Nürnberg, Alemanha.

DAS, S.; HOLLISTER, S.F.; FLANAGAN, C.; ADEWUNMI, A.; BARK, K.; CHEN, C.; RAMASWANY, K.; ROSE, D.; WIDJAJA, E. Freeform fabrication of Nylon-6 tissue engineering scaffolds. Rapid Prototyping Journal, v. 9, n 1, p 43-49, 2003.

DINIS, A. E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**; São Paulo, 1. Edição, Editora MM, 1998, 242p.

DOMININGHAUS, H. **Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften**. Berlin 3. Edição, Editora: Springer Verlag, 2005, 1633p.

DRUMOND, F. M.; WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S.. **Análise de variância: Comparação de variáveis situações**, 1ª Edição, Vol. 6, Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 1996, 276 p.

DUSEL, K. H. **Rapid Tooling, Spritzgiessen mit Prototyp Werkzeugen und der Einfluss auf die Bauteileigenschaften**. 2000. Tese (Doutorado) – Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik, Universität Stuttgart, Stuttgart, Alemanha.

EBENHOCH, M.. **Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß**. 2001. Tese (Doutorado) – Fakultät Konstruktions und Fertigungstechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, Alemanha.

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais**, São Paulo, 3. Edição, Editora MC GRAW, 1985, 751p.

FINKE, S.; FEENSTRA, F.K. Solid Freeform Fabrication by extrusion and deposition of semi-solid alloys. *Journal of Materials Science*. v 37, p 3101 – 3106, 2002.

FRITZ, B.; NOORANI, R. Conformação de materiais utilizando ferramental rápido. **Revista Máquinas e Metais**, nº 407, p.10, Dez. 1999.

GEBHARDT, A.: **Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung**. München, Alemanha: Hanser, 2000. 409 p.

GEIGER, M.. **Prozeßplanung und Prozeßführung bei Generativen Fertigungsverfahren**. 2000. Tese (Doutorado) – Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, Stuttgart, Alemanha.

GEUER, A. **Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung**. 1996. Tese (Doutorado) – Fakultät für Maschinenwesen, Technischen Universität München, München, Alemanha.

GONÇALVES, A.C.. Injeção a baixa pressão de peças metálicas com geometria complexa. **Revista Máquinas e Metais**, nº 410, p.14, Fev. 2000.

GREULICH, M.; GREUL, M.; PINTAT, T. Fast, functional prototypes via multiphase jet solidification. *Rapid prototyping Journal*, v. 1, n 1, p 20 - 25, 1995.

HAGIWARA, T; ITO, T. Recent progress of stereolithography resin. In: International User`s Conferende & Exhibition on Rapid Prottotyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing, **4**, Frankfurt/Main, Alemanha, 2003. p B/5.

HALLER, B.; SIEGERT, K. Produção de protótipos de peças e de ferramentas. **Revista Máquinas e Metais**, nº 410, p.104 - 119, Mar. 2000.

HELD, M. **Compilergenerierung aus Hardwarebeschreibungen und deren Anwendung für den Entwurf anwendungsspezifischer programmierbarer Prozessoren.** 1996. Tese (Doutorado) – Vom Fachbereich 19 der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt, Alemanha.

HINSE, S. A. **Laserheißdrahtbeschichten.** 1998. Tese (Doutorado) – Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Technischen Universität Clausthal, Clausthal, Alemanha.

KALITA, S.J.; BOSE, S.; HOSICK, H.L.; BANDYOPADHYAY, A. Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering*, C3, p 611 – 620, 2003.

KASCHKA, U. **Methodik zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl und Bewertung von konventionellen und Rapid Tooling-Prozeßketten.** 1999. Tese (Doutorado) – Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technischen Universität Chemnitz, Aachen, Alemanha.

KHALIL, S.; NAM, J.; SUN, W. Multi-nozzle deposition for construction of 3D biopolymer tissue scaffolds. *Rapid prototyping Journal*, v. 11, n 1, p 9 - 17, 2005.

KIMURA, I. **Product development with mathematical modeling, rapid prototyping.** 2002. Tese (Doutorado) – Fakultät für Maschinenbau, Otto von Guericke Univeristät Magdeburg, Magdeburg, Alemanha.

KRAUS, J. **Laserstrahlumformen von Profilen.** 1997. Tese (Doutorado) – Technischen Fakultät der Friedrich Alexander Universität Nürnberg, Nürnberg, Alemanha.

KRAUSE, T. **Lasersintern von Porzellan.** 2002. Tese (Doutorado) – Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Technischen Universität Clausthal, Clausthal, Alemanha.

KULKARNI, P.; MARSAN, A.; DUTTA, D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid prototyping Journal*, v. 6, n 1, p 18 - 35, 2000.

KÜNSTNER, M.. **Beitrag zur Optimierung des Multiphase Jet Solidification (MJS) – Verfahrens zur Freiformenden Herstellung funktionaler Prototypen.** 2002. Tese (Doutorado) – Universität Bremen, Bremen, Alemanha.

LANDERS, R.; PFISTER, A.; HÜBNER, U.; JOHN, H.; SCHMELZEISEN, R.; MÜLHAUPT, R. Fabrication of soft tissue engineering scaffolds by means of rapid prototyping techniques. *Journal of Materials Science*. v 37, p 3107 – 3116, 2002.

LEE, B.H.; ABDULLAH, J.; KHAN, Z.A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, v 169, p 54 – 61, 2005.

LEIBINGER, B.. Der Laser in Deutschland – ein Erfolgsmodell zwischen Wissenschaft und Industrie. **Stuttgarter Lasertage '03**, p 6-7.2003.

LINDNER, F. **Vergleichende Analyse zur Seriennähe von Rapid Tooling-Prozessketten und spritzgegossenen Kunststoffprototypen.** 2002. Tese (Doutorado) - IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung, Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen,Alemanha.

LIRA, V.M.; BATALHA; G.F.; BARRETTO, M.R.P. Proposta de um Processo de Prototipagem Rápida via Modelagem por Deposição sob Temperatura Ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, Estância de São Pedro. Resumos. Estância de São Pedro: COBEF, 2007. In CD. 84

LIRA, V.M.; TAMAI, E.H.; BARRETTO, M.R.P.; BATALHA; G.F. An Experimental Approach for the Operational Parameters on the Filament width in Deposition Modeling in Rapid Prototyping Process at Room Temperature. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MECÂNICA, 19, Brasília. In CD. Brasília: COBEM, 2007. Res. p.

LIRA, V.M.; TAMAI, E.H.; BATALHA; G.F.; BARRETTO, M.R.P. Influence of operational parameters on the filament width in deposition modeling process at room

temperature. In: FLEXIBLE AUTOMATION AND INTELLIGENT MANUFACTURING, 17., 2007, Philadelphia, USA: FAIM, 2007. p

LIRA, V.M.; TAMAI, E.H.; BATALHA; G.F. Modelagem de sistema de extrusão de material em forma de filamentos sob temperatura ambiente para prototipagem rápida. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM 2008), 5; Salvador. In CD. Bahia: CONEM, 2008. Res.p.

MACHT, M. A. **Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping.** 1999. Tese (Doutorado) – Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technischen Universität München, München, Alemanha.

MANRICH, S.: **Processamento de Temoplásticos.** Editora Artliber, 2005, 431p.

MASOOD, S.H. Intelligent rapid prototyping with fused deposition modeling. Rapid Prototyping Journal, v. 2, n 1, p 24 - 33, 1996.

MEINERS, W.. **Direktes selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe.** 1999. Tese (Doutorado) – Fakultät für Maschinenwesen, Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH), Aachen, Alemanha.

MENGHUI, W.. **Numerische Simulation dentalprothetischer Gießtechnik mit Titanlegierungen.** 2000. Tese (Doutorado) – Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der Rheinisch-Westfälischen, Technischen Hochschule Aachen, RWTH, Aachen, Alemanha.

MUELLER, D. H.; MUELLER, H. Experiences Using Rapid Prototyping Techniques to Manufacture Sheet Metal Forming Tools. Presented at: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMOTIVE TECHNOLOGY AND AUTOMATION (ISATA), **33th**, Dublin, Irlanda, 2000. p 9.

MÜLLER, B. **Präzisionsguss mit neuen Technologien, Grundlagen zur Entwicklung neuer Prozessketten für kleine und mittelständische Gießereien unter Einbeziehung moderner Rapid-Technologien.** 2002. Tese (Doutorado) – Fakultät für Maschinenwesen, Technischen Universität Dresden, Dresden, Alemanha.

MÜLLER, D. H.; WEITZEL, R. **Datenverarbeitung und Prozessplanung für Rapid Prototyping Verfahren.** Disponível em: http://www.ppc.biba.uni-bremen.de/projects/rp/Download/RP_Datenverarbeitung.pdf . Acesso em: 20 set. 2003.

MUNHOZ, A.L.J. **Cura Localizada de Resina Termosensível Utilizando o Laser de CO₂ como Fonte Seletiva de Calor.** 1997. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, Brasil.

PIEVERLING, J. C. **Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling.** 2002. Tese (Doutorado) – Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaft (iwb), Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München, München, Alemanha.

QIU, D.; LANGRANA, N.A.; DANFORTH, S.C.; SAFARI, A.; JAFARI, M. Intelligent toopath for extrusion-based LM process. Rapid Prototyping Journal, v. 7, n 1, p 18 - 23, 2001.

RETTENMAIER, M.. **Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile.** 2002. Tese (Doutorado) – Fakultät für Konstruktions und Fertigungstechnik, Universität Stuttgart, Alemanha.

SCHRAMM, G.: **Reologia e Reometria – Fundamentos Teóricos e Práticos.** Editora Artliber, 2006, 232p.

SCHUBART, D.. **Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂- Laserstrahlung**. 1999. Tese (Doutorado) – Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT), Technischen Fakultät der Friedrich Alexander Universität, Nürnberg, Alemanha.

SOUZA, M.A.; RICETTI, F.; CENTENO, T.M.; PEDRINI, H.; ERTHAL, J.L.; MEHL, A.. **Reconstrução de imagens tomográficas aplicada à fabricação de próteses por Prototipagem Rápida usando técnicas de Triangulação**. Disponível em: <http://www.hab2001.sld.cu/arrepdf/00256.pdf> . Acesso em: 30 out. 2004.

SPIEGEL, M.R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R.A. Probabilidade e Estatística, 2a Edição, Porto Alegre, Ed. Bookman, Coleção Schaum, 2004, 398p.

STEINBERGER, J.. **Optimierung des Selektiven-Laser-Sinters zur Herstellung von Feingußteilen für die Luftfahrtindustrie**. 2001. Tese (Doutorado) – Technischen Universität München, München, Alemanha.

TECHEL, A., NOWOTNY, S., LÖSCHAU, W.. **Aktivitäten zum Rapid Prototyping und Rapid Tooling**. In: Institut für Werkstoff und Strahltechnik (IWS), Fraunhofer-Institut für Werkstoff und Strahltechnik, Rapid Product Development, set. 1999. p 264.

THRIMURTHULU, K.; PANDEY, P.M.; REDDY, N.V. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v44, p 585–594, 2004.

TILLE, M. C. **Probleme und Grenzen der Stereolithographie als Verfahren zur schnellen Herstellung genauer Prototypen**. 2003. Tese (Doutorado) – Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikrotechnik von der Fakultät für Maschinenwesen, Universität Technischen München, Alemanha.

TSENG, A.A.; TANAKA, M. Advanced deposition techniques for freeform fabrication of metal and ceramics parts. Rapid prototyping Journal, v. 7, n 1, p 6 - 17, 2001.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. *Assembly Automation*. v 23, n 4, p 318–330, 2003.

VENKATARAMAN, N.; RANGARAJAN, S.; MATTHEWSON, M.J.; HARPER, B.; SAFARI, A.; DANFORTH, S.G.; WU, G.; LANGRANA, N.; GUCERI, S.; YARDIMCI, A. Feedstock material property – process relationships in fused deposition of ceramics (FDC). *Rapid Prototyping Journal*, v. 6, n 4, p 244 - 252, 2000.

WEITZEL, R. **Maschinenneutrale Prozeßdatenaufbereitung für Schichtfertigungsverfahren**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Fachbereich Informatik der Universität Bremen, Alemanha.

WESTKÄMPER, E., How many Rapid Technologies does a Company need. In: *International User`s Conferende & Exhibition on Rapid Prottotyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing*, 4Th, Frankfurt/Main, Alemanha, 2003. p 7.

WESTKÄMPER, E.; BIESINGER, B., KOCH, K. U.. *Innovative Generative Manufacturing of 3-Dimensional Structures*, Production Engineering, Fraunhofer Institut for Manufacturing Engineering and Automation (IPA) Stuttgart, Germany, páginas 43-46, Vol IX/1, 2002.

WIRTZ, H. M. **Selektives Lasersintern von Keramikformschalen für Gießanwendungen**. 2000. Tese (Doutorado) – Berichte aus der Produktionstechnik von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, Aachen, Alemanha.

WOHLERS, T.T.: *Wohlers Report 2001. Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report* . Collins; Wohlers Associates ; 2001.

WOHLERS, T.T., Wohlers Associates, Inc.: *Wohlers Report 2003*.

WOLF, R.. **Rapid Protototyping in der Mikrotechnik mittles Laserablation**. 2003. Tese (Doutorado) – Lehrstuhl für Feingerätebau und Mikrotechnik, Technischen Universität München, München, Alemanha.

WORLD TECHNOLOGY EVALUATION CENTER INC. **Additive/Subtractive Manufacturing Research and Development in Europe, 2004**. Baltimore, USA, 2004. 138p.

ZIEMIAN, C.W.; CRAWN, P.M. Computer aided decision support for fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, v. 7, n 3, p 138 - 147, 2001.

APÊNDICE A – Viabilidade econômica da PR

A viabilização econômica da utilização da PR, segundo Gebhardt (2000), envolve dois aspectos: estratégico e operativo.

Quanto ao aspecto estratégico, deve-se fazer a verificação de fatores decisivos, tais como a exigência do mercado e a concorrência e se tempo e prazos são fatores determinantes e há necessidade de trocas de informações rápidas entre diferentes setores da indústria, etc (WESTKÄMPFER, 1996).

Em relação ao aspecto operativo, pode-se perguntar se o processo PR é ideal para o desenvolvimento de projeto na fábrica (oficina), para o trabalho nos departamentos de desenvolvimento de produtos ou ainda para a utilização tanto na prestação de serviços quanto no uso interno.

Existem alguns critérios técnicos a serem respeitados para a utilização econômica da PR, tais como: o protótipo precisa ser complexo (KÜNSTNER, 2002); possibilidade de determinar o tempo de desenvolvimento que deve ter uma grande importância para atender o mercado (MUELLER, MUELLER, 2002); o sistema CAD - 3D deve ser a orientação volumétrica de uso contínuo no desenvolvimento de produtos (BRANDNER, 1999). Esse último critério deve ser necessariamente preenchido, do contrário não tem sentido a utilização da PR, pois a maioria dos softwares do sistema PR são baseados nesse modo de trabalho.

Como a utilização da PR se dá tanto na prestação de serviços quanto no uso em departamento de desenvolvimentos de produtos, necessita-se de um critério de decisão para escolha e a avaliação econômica do processo ideal.

A pergunta, depois da avaliação econômica, tem dois aspectos principais: a) que processo de PR preenche a exigência da qualidade no tempo ideal de construção? b) que custo resulta do uso do processo de PR (tabela 20)?

Essas perguntas não representam uma validação geral para se obter uma resposta decisiva sobre qual tecnologia de PR deve ser adotada. Deve-se, ainda, fazer uma avaliação, de acordo com estudo de Ebenhoch (2001), das seguintes características: precisão, detalhamento, superfície de acabamento, material, dimensões, características tecnológicas mecânicas, processos subsequentes e *Rapid Tooling* (RT). Também é necessário que se avalie se este processo necessita de preparação, tempo de aquecimento (FDM, EP), tempo de espera (*Sinter - Laser*), tempo de resfriamento (*Laser -Sinter*), troca de material (FDM, extrusão), acabamentos subsequentes (envernizamento no LLM- modelagem). Também deve-se levar em consideração a possibilidade de haver necessidade de pós-processamento e de sistemas operacionais específicos. Essa avaliação é importante para se escolher um processo de PR economicamente apropriado

Para a avaliação econômica do processo de PR, os itens que mais influenciam, segundo Gebhardt (2000), são: custos dos investimentos, investimentos paralelos, custo do local de trabalho da máquina, custos de manutenção e de padronização, custos dos materiais, custos funcionais e custos de pessoal.

Paralelamente aos custos da máquina, há custos correspondentes aos investimentos no sistema CAD e software de interfaces, ao treinamento, à instalação e aos equipamentos para pós-processamento (PIEVERLING, 2002). Incluem-se ainda os custos do local (departamento de engenharia de desenvolvimento, ou oficina), em média 50% a 100% dos custos da máquina, dependendo de seu porte (extrusora prototipadora – US\$ 62.000,00 + 30% em impostos). Se o material for tóxico, deve-se também levar em consideração, pois necessita-se de equipamento, agregado à máquina, para tratar os gases oriundos do processo, o qual eleva o custo da máquina, que na sinterização, está em torno de US\$ 425.000,00.

Os ciclos de inovação do protótipo são muito curtos. Os custos com *updates* (*software*) e *upgrades* (*hardware*), assim como os de manutenção e instalação são de 15% a 25% dos custos da máquina. Deve-se considerar também, quanto ao aspecto econômico, se o fabricante dispõe no mercado de condições para se fazer atualizações ou substituições integrais de módulos (GEBHARDT, 2000).

Os custos dos materiais, como a matéria-prima são altos e estão entre 188 e 375 US\$/kg, com algumas exceções para o processo LLM, que utiliza cerca de 6,25 US\$/kg e Z-Corp 50 US\$/kg. Entretanto não é necessário nenhum produto semi acabado, logo não há necessidade de máquinas especiais e elementos de fixação.

Embora as pesquisas tenham propiciado melhoria das características qualitativas das resinas fotossensíveis (durabilidade, umidade, precisão, etc) (HAGIWARA, ITO, 2003), são ainda raros os casos de materiais reaproveitáveis. Além disso, equipamentos grandes de *laser sinter* necessitam aproximadamente US\$1,250.00 para o preenchimento do pó no reservatório. Já os equipamentos de stereolithography, com dimensões proporcionais, acima de US\$125,000.00, para o preenchimento do reservatório.

Custos operacionais incluem os custos do consumo de energia para a operação do *laser (sinter, stereolithography, entre outros)*, custo de aquecimento do sistema (FDM, Extrusora), custos do processamento do gás (*laser sinter*) (GEBHARDT, 2000). O processo a laser consome muita potência e influencia assim, de maneira negativa, o aspecto econômico. Há necessidade de instalação de equipamento para resfriamento (por exemplo: 11 kW de potência absorvida em 440 mW de potência de alimentação). Existem, entretanto, equipamentos a *laser* de corpo rígido que consomem menos potência e, além disso, processos que não usam o *laser* são mais acessíveis.

O cálculo desses fatores compreendem também o tempo efetivo de trabalho sobre o custo para o processo de construção do protótipo, principalmente no tempo de início, tempo de partida, período de espera e outros tempos adicionais (GEBHARDT, 2000) (EBENHOCH, 2001).

Os custos com pessoal diferenciam-se e não são significativos quando comparados com a fabricação convencional do protótipo. É importante observar que é necessário um especialista em CAD, mesmo que não haja necessidade de nenhuma construção em 3D na área de prototipagem (GEBHARDT, 2000). Além disso, não existe nenhum curso de formação de trabalhadores na área de PR.

As freqüentes discussões realizadas sobre a agilidade do prototipador (“projetista de protótipo”), de algum modo levam, na prática, a diferentes resultados, não somente na prototipagem feita na câmara de processo da máquina, mas também no processo completo de construção do protótipo, do processamento de dados e até no pós-processamento. Considera-se também, para o usuário, as limitações do sistema, em poder proporcionar visibilidade durante o processo de geração do protótipo, o que possibilitaria rejeitar, comparar o protótipo e também determinar os tempos adicionais para fatiamento e finalizações ou recálculo do tempo total máximo ou mínimo (GEBHARDT, 2000).

Para ilustrar algumas grandezas descritas acima com valores numéricos, Capuano (2000) pesquisou as grandezas que envolvem a prototipagem em duas máquinas de *Rapid Prototyping* (SL e FDM) e na prototipagem convencional (PC). Alguns dos resultados, (tabela 20), são relativos a dados em termos de fabricação de seu protótipo, e não representam a decisão de seleção sobre qual tecnologia para prototipagem é melhor em detrimento de outra, pois devem ser considerados outros itens de avaliação, tais como qualidade do protótipo e flexibilidade.

Tabela 20 – Dados de fabricação de protótipos via prototipagem convencional (PC) e via PR pela SL e FDM (CAPUANO, 2000).

Dados de trabalho:	PC	PR	
		SL	FDM
Preparação do protótipo ¹	-	15 min	10 min
Fabricação do protótipo ⁴	24 h 37 min	-	-
Geração do protótipo	-	10 h ²	16 h. 6 min ³
Material do protótipo	ABNT 1020	Resina acrílica	ABS
Acabamento ⁵	-	20 min	-
Custos de produção	R\$ 350,00	R\$ 800,00	R\$ 680,00
Espessura de cada camada	-	0,025mm-0,15mm	0,254mm
Relação custo/tempo	14,21 R\$/h	76,58 R\$/h	41,64 R\$/h

1 – Verificação do protótipo, correção da direção das normais, *layout* da plataforma, geração da estrutura do suporte e fatiamento do modelo;

2 – Não foram computados os tempos para pré-aquecimento e resfriamento;

3 – A estrutura do suporte foi feita com material diferente (Water Works);

4 – A fabricação do protótipo corresponde às seguintes etapas preparação, usinagem, montagem, acabamento;

5 – O protótipo teve o suporte retirado, recebeu jato de areia e pintura em verniz incolor.

APÊNDICE B – Exemplos de aplicações da PR em algumas áreas

B1) automobilística: como exemplo de utilização da PR nessa área, cita-se o trabalho de Spreng (1996), o qual desenvolveu um método para selecionar via software um processo de PR a ser utilizado na indústria automobilista. A partir das características do produto, o *software* descreve as fases de desenvolvimento e de construção de protótipos e trabalha as variáveis de tempo de desenvolvimento, de custos operacionais entre outros, e ainda prediz as etapas de trabalhos entre a fase de criação até o produto final. Pesquisas práticas foram realizadas por Mueller e Mueller (2000) utilizando diferentes tecnologias de PR para a fabricação de ferramentas para conformar chapas metálicas em peças de geometria complexa e peças de plásticos de alta demanda na indústria automobilística. Foram estudadas as variáveis de alguns processos de PR aplicadas na RT. A análise dos custos e dos tempos de produção permitiu não só um comparativo econômico das ferramentas obtidas através do RT, mas também uma visão e a proposta de critérios de seleção dessas tecnologias na aplicação em peças pequenas de geometrias complexas que podem ser fabricadas com materiais plásticos ou metálicos.

B2) Medicina e Odontologia: a tecnologia da PR pode ser utilizada no desenvolvimento de próteses com uso de novos materiais para suporte ou sustentação da estrutura danificada ou defeituosa e que por meio de cirurgia, são implantados no paciente (WESTKÄMPFER, BIESINGER, KOCH, 2002) (MENGHUI, 2000). Na odontologia, através da reconstrução por imagens tomográficas em seqüência de fatias (*slices*), protótipos de próteses são construídos com o auxílio de uma máquina de PR. Os protótipos gerados possibilitam simulação das funções, a fabricação de próteses e muitas outras aplicações, como o estudo de reconstrução da estrutura óssea maxilo-facial, crânio-facial, mandibular, em virtude de tratamento de tumores, deformidades e mal formações físicas (SOUZA, 2004). A tecnologia de PR, na odontologia, também propicia construir protótipos para o *Casting Modeling* (modelagem para fundição em casca) de prótese dentária com titânio (MENGHUI, BERGBAU, HÜTTENWESEN, GEOWISS, 2000).

B3) outros (exemplo na fundição): Bäsecke, Dusel e Müller pesquisaram a aplicação da tecnologia de PR em empresas produtoras de moldes para fundição projetados e gerados por processos de PR e verificou a influência desses processos na fabricação de peças fundidas e a qualidade dos moldes para a fundição via testes de compressão, de precisão e de contração, entre outros (BÄSECKE, 1999) (DUSEL, 2000) (MÜLLER, 2002)

APÊNDICE C – Geração de arquivos para fatiamento

Na tabela 21, observa-se que os sistemas CAD trabalham dados em 3D, que é o formato padrão STL, mas que é possível também trabalhar dados em 2D, utilizados por exemplo, nos softwares usados para captação de imagens via escaneamento tomográfico e para a engenharia reversa. Esse formato requer um *software* específico de tratamento dos contornos dos objetos obtidos pelo escaneamento e a correção de eventuais erros de curvas do contorno do objeto para posterior fatiamento em 2D. Com isso reduz-se erros, por exemplo, de fechamento, o que possibilita reproduzir melhor a superfície do sólido e ainda obter arquivos de tamanho menor. Em face dessas limitações, o formato 2D não é largamente aceito em sistemas de PR.

Macht (1999) e Gebhardt (2000) descrevem alguns formatos de arquivos (tabela 21) para a PR:

C1) Formato 2D: dados escaneados, dados da fatia (contornos):

- **SLC** – *Stereolithography Contour* da empresa *3D Systems*: é um formato utilizado na transferência dos dados de cada fatia do protótipo e para preparação dos parâmetros de construção nos processos de PR via *stereolithography*;
- **CLI** – *Common Layer Interface* da empresa *EOS*: é a representação fatiada do protótipo para a entrada dos dados de sua geometria para processos baseados na tecnologia *Layer Manufacturing Technologies (LMT)*;
- **HPGL** – *Hewlett Packard Graphics Language*: é um formato para o reconhecimento de contornos para a plotagem, o qual aproveita o contornamento realizado direto no *CAD* para posterior plotagem na máquina de PR.

C2) - Formato 3D: modelos sólidos, dados digitalizados, dados da malha:

- **STL** – Abreviação de “*stereolithography tessellation language*” e representa um formato de arquivo, que gera finitos triângulos, os quais representam toda a superfície do modelo, para que esta seja reconhecida, pelo *software* de fatiamento, como uma teia unida por meio de milhares de triângulos e seja fatiada em camadas de espessuras finas. É o formato predominante usados pelos sistemas de PR como pode ser observado pela *Tabela 13*;
- **IGES** – *Initial Graphics Exchange Specification*: é um padrão definido mundialmente que pode reconhecer formas geométricas e realizar interface com sistemas de PR, mas apresenta muitas variações da forma da geometria reconhecida, a qual deve ser precisamente especificada para posterior trabalho na máquina de PR;
- **STEP** – *Standard for the Exchange of Product Model Data*: o desenvolvimento dos formatos IGES entre outros foram adotados pelo STEP como um padrão *ISO (International Standard Organisation)* cujo objetivo é cobrir todos os aspectos do ciclo de desenvolvimento do produto na indústrias. Sendo um modo de verificação e transmissão de dados geométricos de um objeto e também de informações de parâmetros operacionais de construção do objeto, o formato STEP permite a manipulação dos dados e a transmissão do modelo do programa *CAD* para a máquina PR;
- **DXF** – *Drawing Exchange Format* da empresa *Autodesk*: é um formato de dados para aplicação em CAD. É muito utilizado, pois oferece suporte a objetos em 3D, trabalha dados em 2D e 3D e possibilita representação de contornos, curvas e textos.

Tabela 21 – Formatos de troca de dados para máquinas com Solid Free Form (SFF)

	Processo de PR	Formatos	Nome do Software	Obs.:
Stereolithographie (SL)	3D – Systems	STL	MAESTRO – EOS	
	Stereos – EOS	STL	EOS	Trabalha dados em SLI
	Fockele & Schwarze	HPGL	LMS (versão 3.0)	Usa um gerador para trabalhar os dados de contorno e dar suporte a modelos de sólidos e com cavidades
		HPGL - 1	–	Gera dados do arquivo STL e converte no formato de dados F&S
	Solid Ground Curing	STL	<i>Cubital</i>	
	Mikrostereolithographie - Microtec	–	–	A máquina transmite as informações geométricas de interface neutra direto do CAD.
Laser – Sinter (LS)	Selektive Laser – Sinter – DTM	STL	<i>Magics RP – Software</i>	Também pode usar um formato neutro
	Laser – Sinter – EOS	STL	<i>RP Tools</i>	Dados de contorno (CLI)
Layer Laminate Manufacturing (LLM)	Laminated Object Manufacturing (LOM) (Helisys)	STL	LOM <i>slice</i>	Nesta máquina PR pode-se trabalhar direto do CAD algumas funções de desenho
	Rapid Prototyping System (Kinergy)	STL	–	O <i>software</i> não é conhecido
	Selective Adhesive and Hot Press Process	STL	RPCAD	
	JP Systems 5 – Schroff Development Corp.	STL	<i>Silver Screen 3D CAD Solid Modeler</i>	
	Layer Milling Process (LMP) – Zimmermann	–	–	Dados direto do CAD
	Stratoconception – Charlyrobot	–	<i>Stratoconception – PC</i>	Recebe os dados do arquivo CAD
	Stratified Object Manufacturing (SOM) – ERATZ	IGES VDAFS		– Dados do CAD em formato neutro, – Desenvolve-se compatibili-zação com o STEP , mas não concluída ainda.
Fused Layer Modeling (FLM)	Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys	STL	<i>QuickSlice</i>	Os dados podem ser lidos no SLC
	Multiphase Jet Solidification (MJS) – ITP	STL	–	O <i>software</i> da máquina gera e processa os arquivos
	3D – Ploter (Stratasys)	STL	AUTO – Gen	

	ModelMaker – Sanders Prototype Inc.	STL, SLC HPGL, DXF	<i>ModelWorks</i>	Nesta máquina PR podem-se trabalhar direto do CAD algumas funções de desenho
	Multi – Jet Modeling (MJM) – 3D Systems	STL	<i>Solid – Object – Printer</i>	Pode-se fazer visualizações direto do CAD
Three Dimensional Printing (3DP)	Rapid Prototyping Systems – Z Corporation	STL	–	O trabalho dos dados geométricos e do conversor STL se dá fora da máquina
	Rapid Tooling System – ExtrudeHome	STL, SLC	<i>IMAGEWARE</i>	
	Direct Shell Production Casting (DSPC)	–		A máquina necessita dos dados do CAD numa interface neutra
Laser – Generation (LG)	Laser Engineered Net Shaping (LENS) (Optomec)	STL	<i>Solid Works Rapid Prototyping (Optical)</i>	Os dados do CAD são trabalhados em uma Interface neutra.

Legenda: **STL, DXF, IGES, STEP**, etc: **formato 3D**: modelos sólidos, dados digitalizados, dados da malha;

SLC, SLI, HPGL, CLI F&S, etc: **formato 2D**: dados escaneados, dados da fatia (contornos).

A representação é binária, o que proporciona volume de informações menor do que o ASCII. Além disso, carrega e processa os dados mais rapidamente que o STL-ASCII, pois usa a codificação de máquina, ou seja, zero (0) e um (1).

APÊNDICE D – Processos de PR

D1) PR via *Stereolithography*

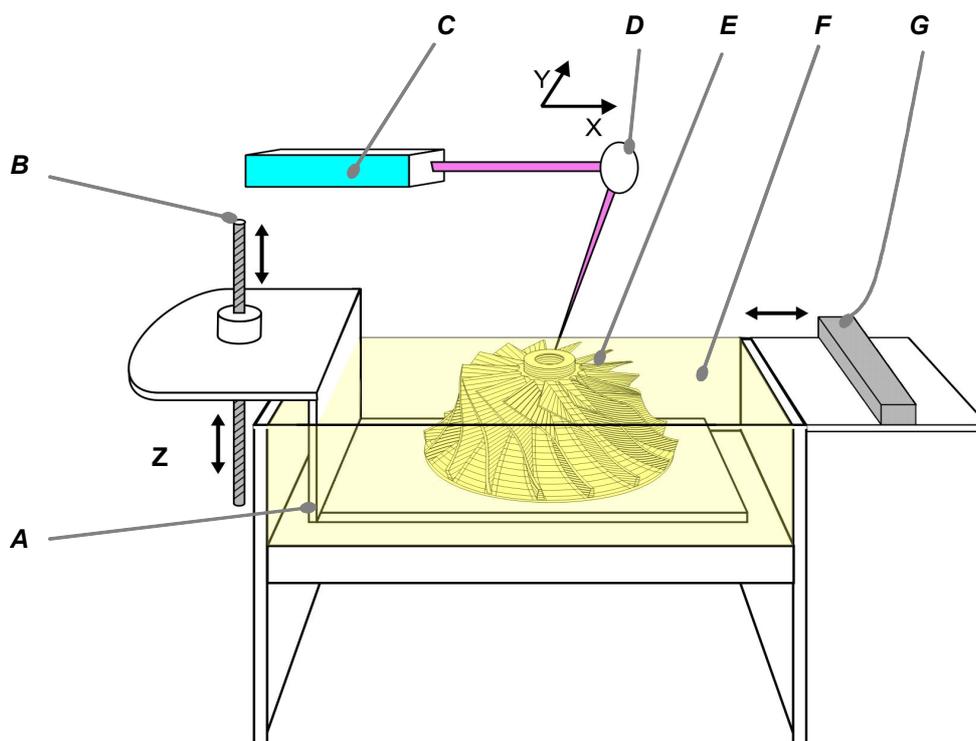
Nesse processo o foco do *laser* incide a uma dada profundidade da superfície do material e por meio do efeito da fotopolimerização, solidifica a área coberta pelo foco do *laser* e descrita pelo perfil da fatia do protótipo. Ao término da primeira fatia, o depósito de material fluidificado movimenta-se na direção do eixo Z (regra da mão direita) em uma profundidade pré-determinada. Esse processo se repete até a conclusão do protótipo fatiado. Os fabricantes (tabela 22) dispõem em geral de diferentes estratégias para a realização deste processo.

Tabela 22 – Fabricantes e sistemas de PR via *stereolithography*

Fabricante	Sistema	Sigla
<i>3D-Systems</i>	<i>Stereolithography Apparatus</i>	SLA
<i>EOS</i>	<i>STEREOS</i>	-
<i>Fockele & Schwarze</i>	<i>Stereolithographie</i> (figura 30)	F & S
<i>Cubital</i>	<i>Solid Ground Curing</i> (figura 32)	SGC
<i>MicroTEC</i>	<i>Microstereolithographie</i>	-

D1.1. *Stereolithography* (3D-Systems e Fockele & Schwarze)

Conforme a figura 29, no espaço de trabalho, tem-se uma plataforma (elevador) que possui um movimento vertical controlado. Inicialmente é mergulhada no recipiente (tanque) cheio de resina, de modo que seja coberto por apenas décimos de milímetros de resina líquida. Em seguida, o *laser* descreve sobre a plataforma, o perfil da fatia do protótipo a ser solidificada a alguns décimos de milímetros dentro da resina, de modo que essa porção definida pela ação do *laser* ultravioleta seja curada, desenhando assim cada secção da fatia do protótipo em construção.



- A – Plataforma
- B – Fuso de movimento
- C – Fonte de laser – CO₂
- D – Espelho
- E – Protótipo concluído
- F – Tanque com a resina
- G – Nivelador de superfície

Figura 29 – Esquema do processo SLA e F&S



Figura 30 – Máquina de stereolithography, Instituto Fraunhofer para Automação – Empresa: Fockele & Schwarze

Segundo Meiners (1999), Gebhardt (2000), Ebenhoch (2001), Rettenmaier (2002),

Birke (2002) e Chartier, et al, (2002) as características do processo de *stereolithography* das máquinas SLA e F& S, são as seguintes:

Abreviação: SLA e F& S;

Princípio: o laser ultravioleta incide, precisamente, sobre a superfície do material fluidificado e também com uma dada profundidade de forma a solidificar este material;

Precisão do protótipo gerado: $\pm 0,05 - 0.1$ mm;

Altura da fatia: 0,1 – 0,5 mm;

Materiais: epóxi e resina de acrílico, entre outros;

Utilização: protótipos para avaliação funcional, protótipos de moldes para ferramentas que podem ser usadas para testar a produção, protótipos para a área médica; protótipos para concepção, marketing, testes de montagem; protótipos para processo de fundição a vácuo; protótipos para fundição em areia; protótipos para injeção metálica; protótipos descartáveis para fundição de precisão; fabricação de protótipos para moldagem por injeção de insertos maciço, em forma de casca, pelo processo denominado de *conformal cooling* (canais incorporados) e com aletas [Beal, 2002]; protótipos para a fabricação de *Electro Discharge Maschining* (EDM), protótipos para teste de tensão óptica; e teste CNC;

Vantagens: alta resolução para protótipos inteiros mesmo com estruturas verticalmente finas, complexas e muitos elementos com geometrias diferentes; oferece a possibilidade de construção de protótipos que não podem ser gerados por meio de processos convencionais simples. É indicado para muitas áreas de desenvolvimento de produtos, pois o protótipo pode ser gerado sem necessidade de supervisão humana permanente. A mudança de material é relativamente simples, pois envolve apenas a substituição do recipiente. Devido à alta velocidade de

varredura do laser e o tempo de interrupção do laser ser muito curto o protótipo pode ter precisão centesimal.

Desvantagens : o protótipo fabricado requer pós-processamento. A precisão do protótipo gerado não é equivalente às peças utilizadas usualmente nas máquinas de usinagem. Requer cuidados especiais de isolamento ao espaço de trabalho devido às propriedades dos materiais (proteção de contato com polímero e dos gases) (TILLE, 2003). Requer a implementação de suportes para fabricar saliências e cavidades do protótipo, o que envolve custo adicional para a geração e a remoção dessas estruturas. Até o momento, os materiais ainda não preenchem todas as características desejadas, tais como precisão e resistência mecânica dos materiais usados em processos convencionais. Dificuldade de controle dos parâmetros operacionais do laser e seu alto preço por unidade. Alto preço por protótipo construído e para o retrabalho. Há necessidade de tratamento em estufa ou forno de tensões internas. Podem ocorrer erros de confecção da superfície do protótipo devido à lentidão do processo para se fabricar o protótipo; contração do protótipo. A durabilidade do protótipo construído tem influência da luz do dia; alto custo para proteção durante o trabalho (proteção de contato com polímero e com os gases).

D2) - Solid Ground Curing (Cubital)

O *Solid Ground Curing* (SGC), também conhecido como processo de solidificação, foi desenvolvido pela empresa *Cubital Inc.*, de Israel. Utilizando o mesmo princípio da *stereolithography*, sua diferença básica é o uso de uma máscara por onde os feixes do laser passam e solidificam uma camada inteira. Ao término da produção de uma camada, realiza-se a etapa de fresamento para garantir o nivelamento para a deposição da próxima camada. O processo inteiro é descrito abaixo.

Conforme a figura 31, esse processo apresenta dois ciclos, sendo um da geração da máscara e outro da fabricação da fatia. É de aproximadamente 2 minutos o tempo necessário para completar esses 2 ciclos.

Para a primeira fatia do protótipo ser construída, é aplicado inicialmente um revestimento da resina fotopolímera (D), que ficará exposta a lâmpada (C). Uma máscara da secção transversal do protótipo requerido é gerada eletrostaticamente, pela transferência do toner (J), de modo que um injetor de elétron descreve a forma da fatia sobre a máscara de vidro (B). Para fatia do protótipo ser fabricada, a placa de vidro (A) move-se para baixo da máscara (B) para a fatia do protótipo eletrofotografado não refletir sobre a camada sem estar inteiramente na posição abaixo da lâmpada UV (C)

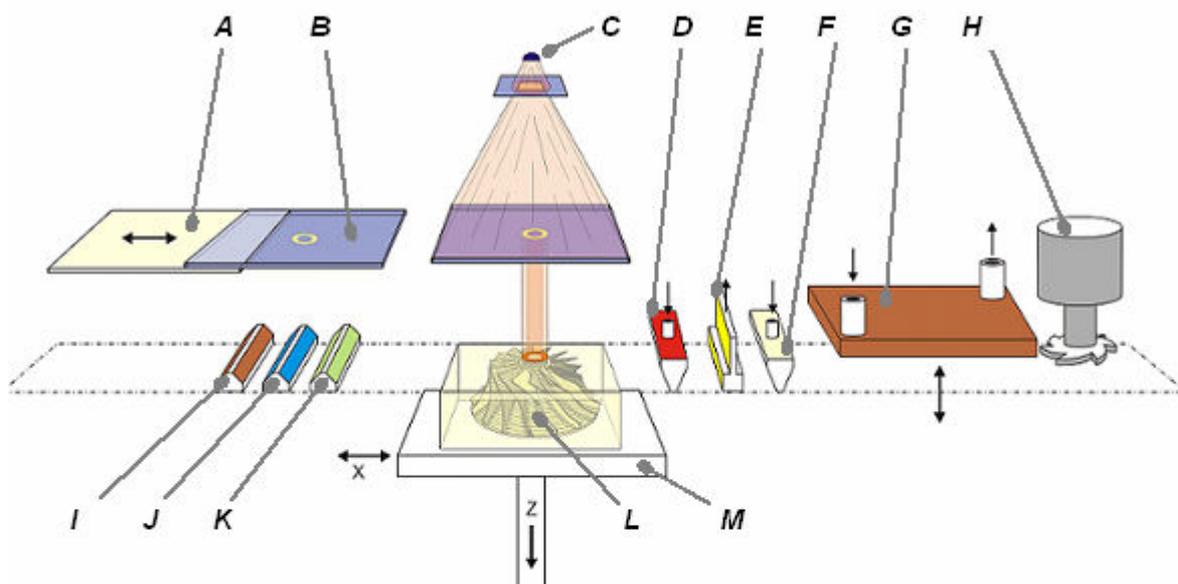
Um obturador é aberto, permitindo a passagem da luz da lâmpada UV e a exposição da máscara para a cura da fatia, ou seja a fotopolimerização de uma fatia do protótipo. O *laser* UV incide sobre toda a fatia que é totalmente curada, não sendo necessária uma segunda operação de cura como é o caso da *stereolithography*.

A seguir, o *toner* da máscara de vidro é removido deixando-a limpa para que uma nova fatia seja fotograficamente gerada sobre a máscara, de modo que o ciclo se completa. O protótipo move-se agora para se aspirarem e descartarem (E) partes da resina que não foram endurecidas.

A seguir, tem-se a aplicação da cera (F) no protótipo para o preenchimento dos espaços onde a resina não endurecida foi removida. A cera é, então, endurecida na estação de resfriamento (G), onde uma placa fria é pressionada de encontro ao protótipo.

A etapa final é a operação de fresamento (H). O protótipo é, então, fresado para retirar o material sobressalente (cera e fotopolímero) até que a superfície desejada esteja completamente formada dentro de uma matriz de cera.

Operações posteriores são ainda requeridas para se remover a cera que ficou derretida. O protótipo, nesse caso, é lixado ou finalizado de maneira diferente da *stereolithography*. Na matriz de cera é desnecessário gerar uma estrutura extra de sustentação para saliências, como na *stereolithography*.



- A – Placa da máscara
- B – Máscara de vidro eletrofotográfica
- C – Lâmpada UV
- D – Aplicação da resina fotopolímera
- E – Removedor de resíduos do polímero da superfície fresada
- F – Aplicação da cera
- G – Placa de resfriamento
- H – Cabeçote de Fresamento
- I – Carregamento elétrico
- J – Desenvolvimento da máscara via aplicação de tomer
- K – Limpeza da máscara
- L – Protótipo sendo fabricado dentro de uma matriz de cera
- M – Plataforma

Figura 31 – Esquema do processo SGC



Figura 32 – Máquina de SGC, modelo: SGC 5600 – Empresa: Cubital

Segundo Gebhardt (2000), Ebenhoch (2001), Rettenmaier (2002) e Birke (2002), as características do processo da máquina de SGC são as seguintes:

Abreviação: SGC;

Princípio: o raio ultravioleta incide, a uma dada profundidade, através da máscara na superfície do material líquido e solidifica-o (como uma fotopolimerização);

Precisão do protótipo gerado: $\pm 0,05 - 0.1$ mm;

Altura da fatia: 0,1 – 0,2 mm;

Materiais: resina de acrílico; resina epóxi;

Utilização: protótipos para avaliação de desempenho funcional, protótipos para estudo técnico e funcional, moldes para fundição a vácuo e de precisão;

Vantagens: possibilita a construção de protótipos com alta complexibilidade; não há necessidade de estruturas de suporte porque a cera é usada como elemento de apoio;

Desvantagens: pós-processamento é necessário para se remover a cera, a resistência mecânica fornecida pela cera limita o campo de aplicação, a onda dissipada pela lâmpada apresenta riscos; elevado consumo de cera.

D3) - PR via *Laser-Sinter*

Para o processo *laser-sinter* há dois fabricantes de máquinas (tabela 23), os quais utilizam a seguinte estratégia de fabricação do protótipo: o *laser*, nesse caso, é a ferramenta de construção das fatias e o material a ser utilizado é um pó plástico ou metálico com granulação em torno de $10\mu\text{m}$, confinado em um depósito. Esse pó é espalhado por meio de um rolo sobre a superfície que será varrida pelo foco do laser. O foco do *laser* também incide sobre o pó, com dada profundidade, fundindo a região abrangida e gerando assim uma nova e pequena região sólida. Com o

movimento do *laser* sobre a “cama” de pó, outras pequenas regiões são solidificadas até ser percorrida a região inteira da camada.

Na seqüência, a mesa, que contém a fatia construída, movimenta-se na direção Z e o rolo espalha, sobre esta, uma nova camada de pó e repete-se o processo até ser gerado o protótipo.

Tabela 23 – Fabricantes e sistemas de PR via *Laser-Sinter*

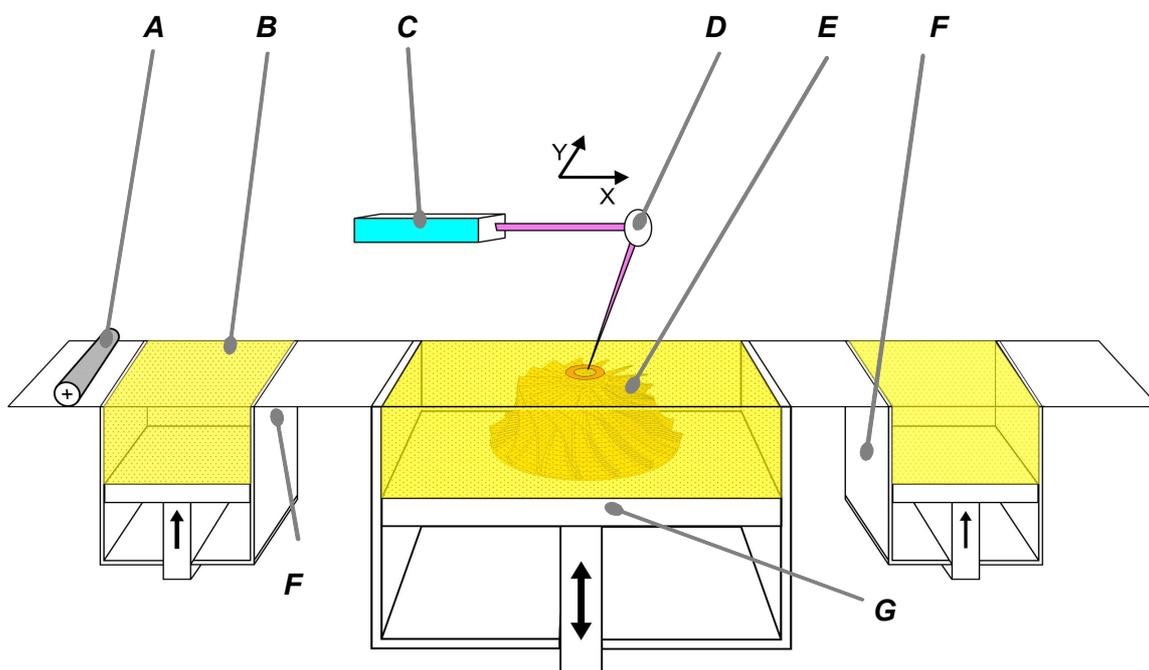
Fabricante	Sistema	Sigla
DTM	<i>Selective Laser-Sinter</i>	SLS
EOS	<i>Laser-Sinter</i> (figura 34)	LS

D3.1. *Laser Sintering* (EOS)

O calor de um feixe de *laser* de CO₂ faz com que o material em pó seja fundido e forme objetos sólidos. São obtidos protótipos cujas propriedades mecânicas, como resistência mecânica, correspondem a 95% das mesmas propriedades das peças injetadas.

Conforme a figura 33, o feixe de *laser* segue o contorno de uma fatia do protótipo, aquecendo as partículas de modo a fundi-las.

O feixe de *laser* promove a sinterização da camada a cada varredura. A mesa é móvel e desloca-se na direção Z após a passagem do *laser*, para que nova camada de pó, por meio da movimentação do rolo, seja espalhada sobre a mesa.



- A – Rolo alimentador e nivelador do pó
- B – Pó
- C – Laser – CO₂
- D – Espelho
- E – Protótipo concluído
- F – Reservatório de pó
- G – Plataforma

Figura 33 – Esquema do processo LS



Figura 34 – Máquina de sinterização, Instituto Fraunhofer para Automação – Empresa: EOS

Segundo Meiners (1999), Gebhardt (2000), Steinberger (2001) Ebenhoch (2001), Rettenmaier (2002), (KRAUSE, 2002) e Birke (2002), as características do processo de *laser-sinter* da máquina LS são as seguintes:

Abreviação: LS;

Princípio: o laser de CO₂ funde e solidifica o material que forma a superfície do protótipo a dada profundidade;

Precisão do protótipo gerado: $\pm 0,1 - 0,2$ mm;

Altura da fatia: 0,1 – 0,2 mm;

Materiais: Pó de metal e de plástico, cera de modelagem, termoplásticos, como *Nylon*, poliestireno (PS), policarbonato (PC), poliamida (PA), PVC, areia de *croning*²⁴ para fundição, areia para construção, areia para fundição entre outros;

Utilização: protótipos de plásticos ou metal, protótipos de formas diversas, protótipos para representação visual (mostruário) e funcional de peças, molde para uso em cera, moldes e matrizes para fundição (WIRTZ, 2000), de precisão e areia. Este processo também produz protótipos em diversos materiais utilizados na análise para verificação de ajuste; protótipos de fabricação; moldes de fundição; protótipo descartáveis para processo de fundição protótipos para processo de fundição a vácuo com vantagem de apresentar porosidade e superfícies ideais para escoamento de gases; eletrodos de carbono ou grafite para erosão EDM (*Electro Discharge Machining*); molde de forjamento; protótipos de cerâmicas em escala artesanal;

Vantagens: os protótipos não precisam de pós-cura exceto quando construídos em cerâmica; não há necessidade de criar estruturas para suporte com outro material independente da geometria; abundante possibilidade de escolha de matéria-prima;

²⁴ O processo de fundição por *Shell Molding* ou Moldagem em *Shell* foi inventado em 1941 por Johannes Croning e usa areia de *croning* e resina.

capacidade de construir protótipos com geometria complexa (com cortes laterais, entre outros); o protótipo pode ser retrabalhado; protótipos com alta dureza; sem necessidade de processo de endurecimento posterior (embora haja infiltrações para alguns casos de utilização); reutilização do material restante;

Desvantagens: o processo de produção de protótipos é demorado e pode chegar a dias, por isso durante a solidificação, pode acontecer que pó adicional endureça na borda da camada, o que prejudica no acabamento superficial do protótipo; gases tóxicos são emitidos durante o processo de fusão e devem ser manipulados com cuidado; a rugosidade da superfície do protótipo deriva das propriedades mecânicas dos materiais (COREMANS, 1999) ; o processo de solidificação do pó pela intensa radiação reduz a precisão pela formação de pele (superfície áspera); a superfície de construção depende da granulação do pó; a superfície de aderência é desigual devido ao pó ou influência do *laser*; a limpeza é difícil nos locais vazados por partículas aderidas, como na *stereolithography* ou Tecnologia *Modelmaker*; a temperatura na câmara do processo é alta; o tempo de aquecimento e resfriamento envolvidos no processo consomem muita potência; e geração de gás inerte na atmosfera da câmara do processo com nitrogênio leva a custos adicionais; gás venenoso e gerado no processo de fusão (principalmente com matéria prima PVC).

D4) - PR via Layer *Laminate Manufacturing* (LLM)

Nesse caso, o *laser* incide sobre a superfície de uma folha de papel impregnada com material colante e recortada de acordo com o perfil da fatia do protótipo atravessando-a com profundidade pré-determinada. As regiões fora do contorno do papel são recortadas pelo *laser* para posterior remoção. Para a geração da segunda camada, a mesa desloca-se na direção Z e um sistema de alimentação por rolo posiciona o papel na região onde será gerada a fatia seguinte. O processo se repete até a construção da última camada.

Na tabela 24, relacionam-se alguns dos fabricantes de sistema LLM.

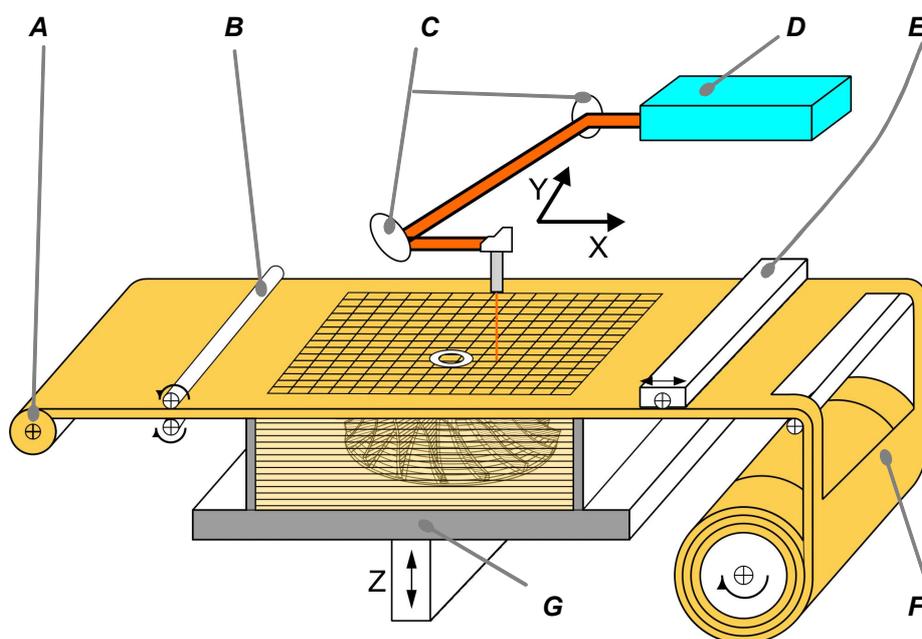
Tabela 24 – Fabricantes e sistemas de PR via *Layer Lamine Manufacturing*

Fabricante	Sistema	Sigla
<i>Helisys</i>	<i>Laminated Object Manufacturing</i> (Figura 37)	LOM
<i>Kinergy</i>	<i>Rapid Prototyping System</i>	-
<i>Kyra</i>	<i>Selective Adhesive and Hot Press Process</i>	SAHP
<i>Schorff Development Corp</i>	<i>JP Systems 5</i>	-
<i>Zimmermann</i>	<i>Layer Milling Process</i>	LMP
<i>Charlyrobot</i>	<i>Stratoconception</i>	-
<i>ERATZ</i>	<i>Stratified Object Manufacturing</i>	SOM

D4.1) - Laminated Object Manufacturing (Helisys)

Neste caso, o *laser* possui um sistema de deslocamento bidimensional e recorta a secção do papel que está impregnado com material colante (figura 35). A altura de cada fatia do protótipo é igual à espessura do material usado no processo. A segunda camada de papel é colada na primeira e a secção transversal seguinte é cortada. O protótipo sai da máquina em um bloco retangular (figura 36). O material sobressalente tem a forma de cubos, devido ao corte transversal do *laser*, o que facilita sua remoção.

Os protótipos obtidos pelo presente processo possuem textura semelhante à da madeira. Frequentemente um revestimento adicional é aplicado para proteger os protótipos da umidade.



- A – Alimentador de papel
- B – Rolo aquecido
- C – Espelhos
- D – Laser
- E – Faca de corte
- F – Recolhedor de papel
- G – Plataforma

Figura 35 – Esquema do processo LOM

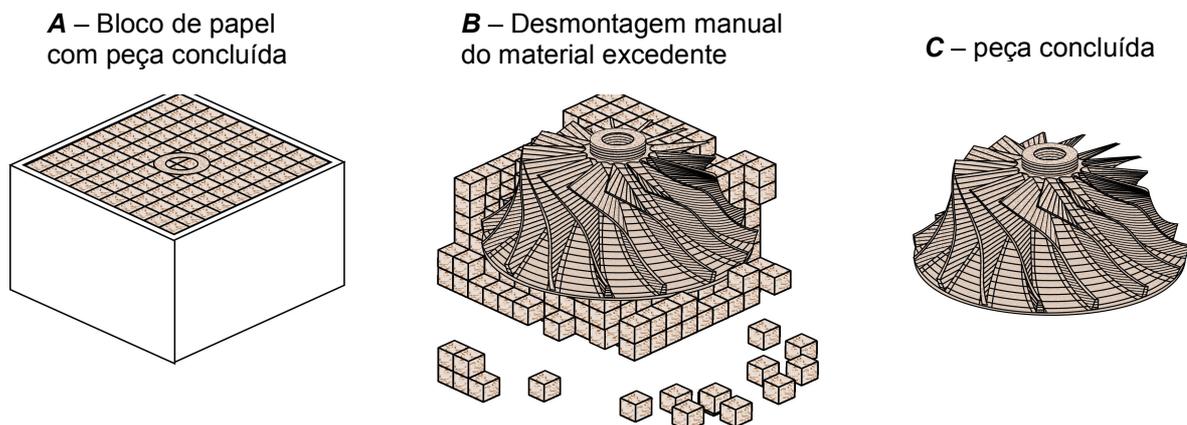


Figura 36 – Desmontagem dos blocos de material excedente



Figura 37 – Máquina de LOM, Modelo: HELISYS 2030 – Empresa: HELISYS

Segundo Gebhardt (2000), Ebenhoch (2001), Rettenmaier (2002) e Birke (2002) as características do processo *layer laminate manufacturing*, da máquina LOM, são as seguintes:

Abreviação: LOM;

Princípio: o *laser* recorta as folhas de papel que estão impregnadas com material colante, e o recorte é efetuado de acordo com as fatias do protótipo;

Precisão do protótipo gerado: $\pm 0,1$ mm;

Altura da fatia: 0,076 – 0,203 mm;

Material: folhas de papel revestidas com cola;

Utilização: protótipos com grande volume; moldes para fundição em areia; moldes para fundição de precisão em areia; moldes para injetar silicone; moldes de injeção para fabricação de ferramentas; protótipo tipo mostruário para avaliação; protótipo para montagem e para averiguação funcional; protótipo de ferramentas; protótipos para fundição; protótipos em geral: molde para laminados, molde para vácuo, molde para fundição de poliestireno (PS) expandido;

Vantagens: possui o maior envelope de trabalho disponível hoje no mercado; baixo custo do material; técnica mais rápida entre os processos de PR; o produto não sofre

tensões internas e deformações indesejáveis durante o processo de sua construção; podem-se construir protótipos complexos com custo baixo; o processo de limpeza não envolve produtos químicos; o processo não envolve ressolidificação; o processo é estável; fabricação simultânea de vários protótipos em blocos; construção rápida das fatias por meio da colagem das fatias no depósito; processo rápido em comparação com outros processos PR (o *laser* deve percorrer somente o contorno); a rápida alimentação da matéria prima e a cola da superfície de uma fatia inteira em construção elevam a velocidade em comparação com outros processos; escolha apropriada quanto as seguintes exigências: margem de preço, compatibilidade com o meio ambiente, características químicas e mecânicas, cor e superfície;

Desvantagens: limitada estabilidade dos protótipos devido à deficiência da cola (impregnada no papel) entre as fatias do protótipo com paredes finas na direção Z; protótipos com cavidades devem ser fabricados em duas partes; os protótipos não se dilatam tanto quanto um molde obtido pelo processo SL, mas são sensíveis à umidade e se dilatarão quando expostos ao vapor; o protótipo fabricado por esse processo deve ser aquecido antes da fundição de peças em casca (“*Cast Shell*”); os protótipos apresentam boa superfície de acabamento nas superfícies paralelas ao plano de construção, mas as linhas perpendiculares a essa superfície resultam no efeito “escada”, que afetará às peças fundidas em casca; pouco apropriado em paredes finas na direção “Z”; formação indesejável de contração do protótipo quando este for manipulado; a utilização depende da complexidade de construção da peça; processos subseqüentes devem preservar a peça de infiltração de umidade e de dilatação (para evitar tal problema deve-se usar revestimento); aumento ou contração da superfície do protótipo na manipulação no ambiente de operação (nos protótipos não isoladas em ambientes apropriados); sem emprego do material restante diferentemente do que ocorre no *laser sinter*.

D5) - PR via *Fused Layer Modeling* (FLM)

Nesse caso, o material é confinado em um dispositivo que, ao ser aquecido, fluidifica o material, que é expulso de uma câmara por um bico injetor sobre a superfície de uma mesa móvel (direção Z). O material depositado construirá o perfil da fatia do protótipo. Na seqüência, a mesa move-se na direção Z e o processo se repete até a conclusão da peça. A tabela 25 apresenta alguns dos fabricantes de sistema FLM.

Tabela 25 – fabricantes e sistemas de PR Fused Layer Modeling

Fabricante	Sistema	Sigla
<i>Stratasys</i>	<i>Fused Deposition Modeling</i> (figura 39)	FDM
<i>ITP</i>	<i>Multiphase Jet Solidification</i>	MJS
<i>Stratasys</i>	<i>3D-Plotter</i>	-
<i>Sanders Prototype Inc.</i>	<i>ModelMaker</i>	-
<i>3D Systems</i>	<i>Multi Jet Modelling</i> (figura 41)	MJM
<i>Mühlacker</i>	Extrusora Prototipadora (figura 43)	EP

D5.1) - *Fused Deposition Modeling* (*Stratasys*)

Nesse caso, os modelos são construídos por deposição de camadas, uma sobre a outra, por meio da extrusão de material termoplástico fluidificado por aquecimento, para a construção das camadas da fatia do protótipo. O plástico ABS, devido às suas características, é um dos materiais preferidos para os protótipos funcionais, pois oferece alta resistência à tração, tenacidade e durabilidade. Esse processo pode utilizar também *nylon* (protótipos para verificação de medidas e controle de projeto), elastômeros, ou cera. Podem ser construídas peças sólidas, alveoladas ou vazadas. Por isso, também é comumente utilizado para a confecção de gabaritos para a fundição.

Para a máquina a seguir (figura 38), o material termoplástico usado (ABS por exemplo) apresenta-se inicialmente em forma de fio e é injetado por meio de um bico

injetor com diâmetro 0,178 mm. Esse material é depositado por um cabeçote extrusor a uma temperatura controlada para aquecê-lo, até chegar ao estado pastoso. O cabeçote extruda e deposita o material em camadas sobre uma base de baixa aderência, ou seja, material para suporte. O material é posicionado precisamente sobre as camadas já extrudadas e então é solidificado.

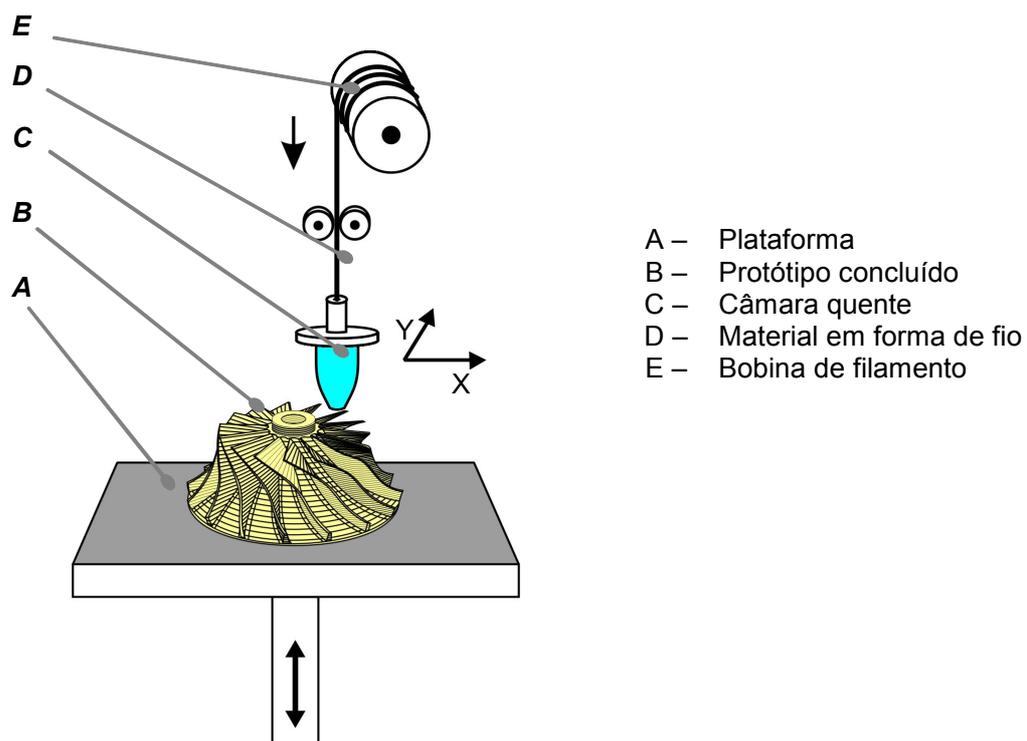


Figura 38 – Esquema do processo FDM- Stratasys



Figura 39 – Máquina FDM, da empresa *Stratasys*

Segundo Gebhardt (2000), Ebenhoch (2001) e Birke (2002), as características do processo *Fused Layer Modeling* da máquina FDM, são as seguintes:

Abreviação: FDM;

Princípio: o termoplástico é depositado com um bico de extrusão;

Precisão do protótipo gerado: $\pm 0,127$ mm;

Altura da camada: 0,125 – 1,27 mm;

Material: acrilonitrila-butadieno-stirol (ABS) entre outros;

Utilização: protótipos para concepção; moldes funcionais para posteriores processos de manufatura, tais como fundição de precisão de cera perdida (*Investment Casting*), molde (*Injection Molding*) para fundição à vácuo (*Vacuum Casting*), molde (*Metal Injection Molding*) para fundição de precisão (*Fine Casting*); protótipos para ajuste ou controle funcional para seqüência de processo;

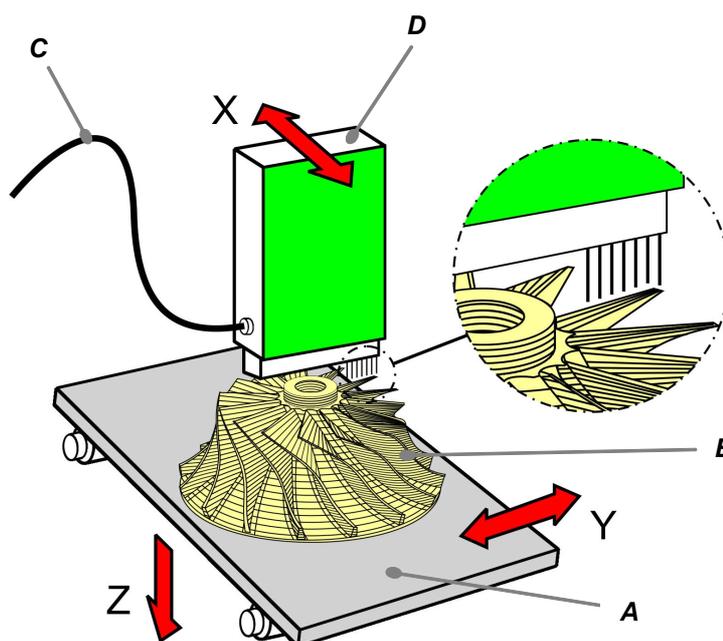
Vantagens: ajuste fácil dos parâmetros de operação; fabricação de protótipos rápida e sem de resíduos; ausência de agente químico tóxico ou polímero em banho líquido, o sistema não requer que o material seja manipulado durante ou após a produção do protótipo; não requer limpeza exceto pela retirada do suporte por meio de solvente; o material pode ser trocado rapidamente; ausência do uso do *laser*; aparelho com dimensões reduzidas, apropriado para uso em escritórios (*desktop*); processo estável e seguro (sem geração de gases nocivos); sem sobra de material; rápida e fácil instalação devido à técnica utilizada; processamento compacto da matéria-prima a ser extrudada;

Desvantagens: protótipos de complexibilidade limitada; precisão restrita devido à forma do material (principalmente de fio com diâmetro de 1,27 mm); estruturas de suportes são necessárias; requer operações de acabamento para remoção do suporte; limitada aplicação devido às características dos materiais; é bem pequeno o

envelope de construção, em comparação com outros processos; a construção de proteção, devido à fusão do material, é necessária, em muitos casos.

D5.2) - Multi-Jet Modeling (3D-Systems)

O protótipo é gerado sobre uma plataforma (figura 40). O material fundido é depositado pelo injetor, que tem 96 pontos de saída para extrusão. A plataforma movimenta-se em X e Y (deslocamento horizontal), de acordo com a geometria da camada. Para se gerar a camada seguinte, a plataforma desloca-se na direção Z (deslocamento vertical), para se depositar as demais camadas até o fim do processo.



- A – Plataforma
- B – Protótipo concluído
- C – Alimentador de material
- D – Cabeçote injetor

Figura 40 – Esquema do processo MJM



Figura 411 – Máquina MJM, – modelo: *ThermoJet printer* – Empresa: 3D SYSTEMS

Segundo Künstner (2002), Gebhardt (2000) e Birke (2002), as características do processo *Fused Layer Modeling* da máquina MJM, são as seguintes:

Abreviação: MJM;

Princípio: a deposição da cera termoplástica é feita por intermédio de um cabeçote de pressão, que contém 96 pontos de saída para extrusão;

Material: cera semelhante ao termoplástico;

Utilização: protótipos, protótipos visuais (mostruário), protótipos para fundição de precisão de cera perdida (*Investment Casting*);

Precisão do protótipo gerado: 0,04 mm para fotopolímero;

Altura da camada: não conhecida;

Vantagens: protótipos com boa superfície final; protótipo com pouca variação dimensional; processo econômico ao gerar protótipos em formas geométricas complexas; equipamento relativamente pequeno que possibilita uso nos departamentos de desenvolvimento de produtos; utilização de material atóxico e com odor mínimo; processo silencioso; fabricação rápida de protótipos, se comparada à

maioria das outras técnicas de PR; produção de protótipos com bom acabamento superficial;

Desvantagens: menor precisão do que a *stereolithography*; material quebradiço; protótipos com dimensões limitadas; o protótipo necessita ser mergulhado em cera derretida ou epóxi para obter-se dureza; protótipos grandes são construídos separadamente e montados posteriormente.

D5.3) - Extrusora prototipadora (*Mühlacker*)

Na máquina EP (figura 42) os modelos são construídos por deposição de camadas, assim como na FDM. O termoplástico é extrudado pelo parafuso de movimento e depositado, camada por camada, através de um bico extrusor com 0,5 mm de diâmetro sobre uma mesa.

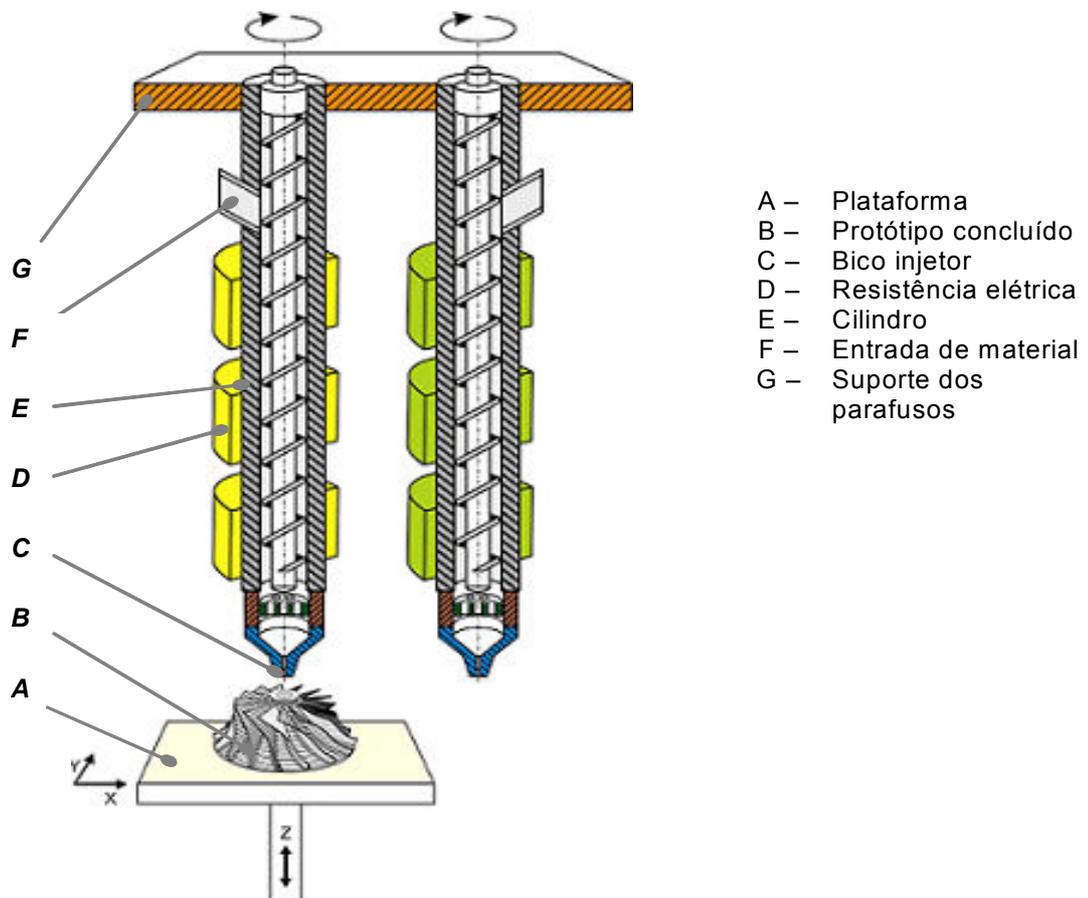


Figura 42 – Esquema do processo EP

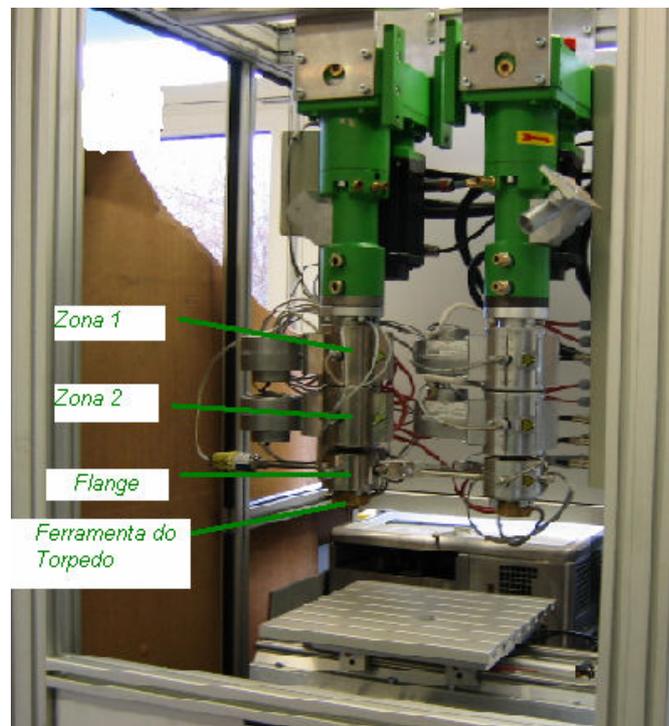


Figura 43 – Máquina EP – modelo: 16D75417 Mühlacker – Empresa: EXTRUDEX KUNSTSTOFFMASCHINEN

As características do processo *Fused Layer Modeling* da máquina EP, são as seguintes:

Abreviação: EP (nossa denominação);

Princípio: o material termoplástico é extrudado pelo parafuso de movimento e depositado, camada por camada, através de um bico injetor;

Precisão do protótipo gerado: $\pm 0,15$ mm;

Altura da camada: 0,2 mm – 0,5 mm;

Materiais: basicamente materiais termoplásticos, tais como: ABS, PP, PA, PVC, PC, entre outros;

Utilização: protótipos fabricados com até dois materiais, protótipos usados como ferramentas rápidas; protótipos para área médica; moldes e protótipos funcionais;

Vantagens: fabricação de protótipos rápida e sem resíduos; não requer manipulação do protótipo durante ou após o processo de produção, não requer limpeza exceto pela retirada do suporte quando gerado, ausência do uso do laser;

Desvantagens: dificuldade de ajuste do avanço da mesa e da rotação do parafuso durante a extrusão; a máquina é de 2 ½ eixos, de modo que os eixos x e y param ao se descer a mesa e nesse processo o material continua a ser depositado, o que ocasiona um depósito de material excedente, gerando assim emenda (figura 44); ocorre mudança das características físicas do material ainda no parafuso devido a contato com outro material; a pressão não é constante durante a fluidez do material; há ainda a necessidade de otimização da trajetória do bico injetor durante a deposição do material devido à dificuldade para controlar o acionamento e a interrupção do depósito de material. Isso ocorrer também na FDM, embora a interrupção e acionamento do depósito do material seja rápida, pois a forma de avanço do material usa estratégias diferentes (FDM – rolo, EP – parafuso). Na EP o

volume de material a ser aquecido, dentro da câmara quente, e extrudado é maior que no FDM; protótipos de complexidade limitada; construções de suportes são necessários, assim como operações posteriores para remoção do suporte.

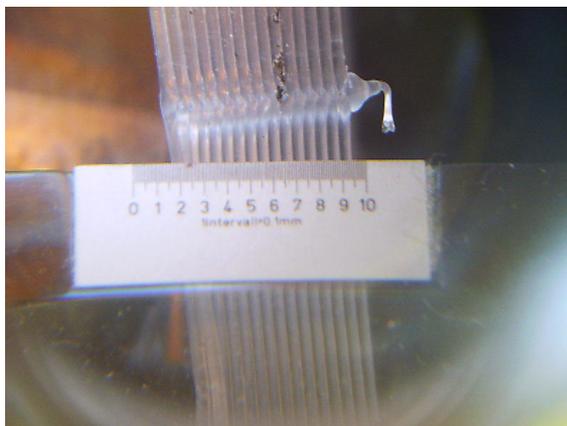


Figura 44 – Detalhe da emenda da peça

APÊNDICE E – Estratégia da trajetória e programa em código “G”

Na figura 45, observa-se a estratégia da trajetória para deposição material e, abaixo, encontra-se a programação da trajetória do bico injetor durante a geração do protótipo.

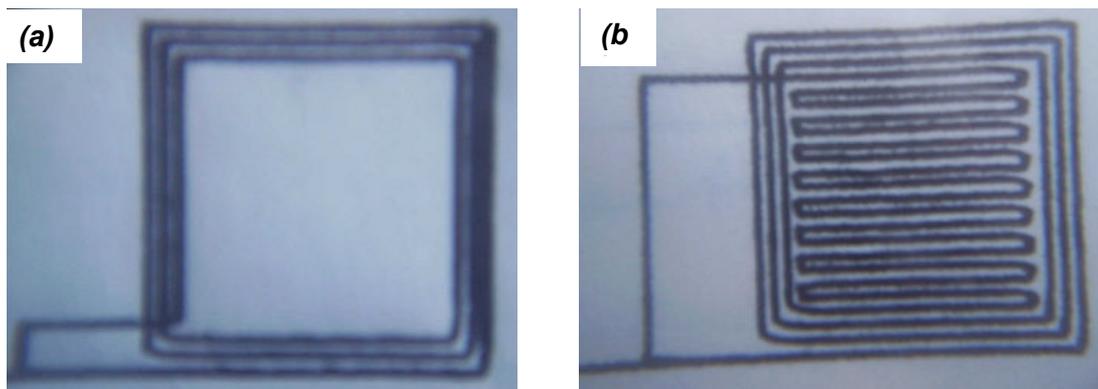


Figura 45 – Estratégias de trajetória do bico extrusor para protótipo vazado (a) e maciço (b)

Dados para programação de protótipo maciço:

Diâmetro do bico 0,64 mm

Espaçamento 0,55 mm

Altura inicial z 0,55 mm

Altura entre camadas (eixo Z) 0,52 mm

material utilizado compósito à base de complexo de carboidrato

Maquina fresadora cnc

Marca EMCO

Modelo F1

Programa:

N1	G90				
N2	G92	X0	Y0	Z30	
N3	G0	X-20		Z0,55	
N4	G1	X0			F400

N5	G25			L31
N6	G25			L31
N7	G25			L31
N8	G25			L31
N9	G25			L31
N10	G25			L31
N11	GG5			L31
N12	G25			L31
N13	G25			L31
N14	G25			L31
N15	G25			L31
N16	G25			L31
N17	G25			L31
N18	GG5			L31
N19	G25			L31
N20	G25			L31
N21	G25			L31
N22	G25			L31
N23	G25			L31
N24	GG5			L31
N25	G25			L31
N26	G25			L31
N27	G25			L31
N28	G25			L31
N29	G25			L31
N30	G25			L31
N31	G91			
N32	G00	X-20	Z20	
N33	M30			
N34	G91			
N35	G1	X20		F400
N36			Y15	
N37		X-15		

N38	Y-14,45
N39	X14,45
N40	Y13,90
N41	X-13,90
N42	Y-13,35
N43	X13,35
N44	Y12,80
N45	X-12,80
N46	Y-12,25
N47	X12,25
N48	Y0,55
N49	X-11,70
N50	Y0,55
N51	X11,70
N52	Y0,55
N53	X-11,70
N54	Y0,55
N55	X11,70
N56	Y0,55
N57	X-11,70
N58	Y0,60
N59	X11,70
N60	Y0,55
N61	X-11,70
N62	Y0,55
N63	X11,70
N64	Y0,55
N65	X-11,70
N66	Y0,55
N67	X11,70
N68	Y0,55
N69	X-11,70
N70	Y0,55

N71	X11,70
N72	Y0,60
N73	X-11,70
N74	Y0,55
N75	X11,70
N76	Y0,55
N77	X-11,70
N78	Y0,55
N79	X11,70
N80	Y0,55
N81	X-11,70
N82	Y0,55
N83	X11,70
N84	Y0,55
N85	X-11,70
N86	Y0,60
N87	X11,70
N88	Y0,55
N89	X-18,35
N90	Y-13,35 Z0,52
N91	M17

Programa para a execução de uma peça circular com quatro círculos inscritos

Espaçamento entre fieiras: 0.55mm

Altura na 1ª camada: 0.70mm

Altura entre camadas: 0.60mm

N00	G90			
N01	G92	X0	Y0	Z20
N02	G25			L20

N03	G00	X0	Y0	Z0.7	
N04	G01	X20	Y0	Z0.7	F
N05	G25				L20
N06	G25				L20
N07	G25				L20
N08	G25				L20
N09	G25				L20
N10	G25				L20
N11	G25				L20
N12	G25				L20
N13	G25				L20
N14	G25				L20
N15	G25				L20
N16	G25				L20
N17	G91				
N18	G00	X-20	Y0	Z20	
N19	M30				
N20	G91				
N21	G03	X15	Y-15	Z0	F
N22	G03	X15	Y15	Z0	F
N23	G03	X-15	Y15	Z0	F
N24	G03	X-15	Y-15	Z0	F
N25	G01	X0.55	Y0	Z0	F
N26	G03	X14.45	Y-14.45	Z0	F
N27	G03	X14.45	Y14.45	Z0	F
N28	G03	X-14.45	Y14.45	Z0	F
N29	G03	X-14.45	Y-14.45	Z0	F
N30	G01	X0.55	Y0	Z0	F
N31	G03	X13.90	Y-13.90	Z0	F
N32	G03	X13.90	Y13.90	Z0	F
N32	G03	X-13.90	Y13.90	Z0	F
N33	G03	X-13.90	Y-13.90	Z0	F
N34	G01	X.55	Y0	Z0	F

N35	G03	X13.35	Y-13.35	Z0	F
N36	G03	X13.35	Y13.35	Z0	F
N37	G03	X-13.35	Y13.35	Z0	F
N38	G03	X-13.35	Y-13.35	Z0	F
N39	G01	X-1.65	Y0	Z0.6	F
N40	M17				

APÊNDICE F – Análise comparativa

Nesse apêndice realizaram-se experimentos com uma máquina do processo via FDM e EP, pois tais processos se assemelham ao processo proposto. Objetiva-se, portanto, obter grandezas qualitativas e quantitativas desses processos para, posterior, comparação com o processo proposto.

Os processos FDM e EP, durante a fabricação de um protótipo, processam o material via extrusão semelhante à MDTA. Assim podem ser verificadas, as variáveis de preparação e de operação, também os aspectos de utilização, entre outros aspectos qualitativos e quantitativos na PR.

Nos experimentos, trabalharam-se aproximadamente 300 horas nos testes com a FDM e a EP, de modo que a comparação é realizada entre as informações colhidas, capítulo 7, das variáveis e dos aspectos de operação, preparação e características entre outros aspectos da MDTA.

F1) – Materiais e métodos

Os materiais e métodos usados nas máquinas dos processos FDM e EP, para a obtenção das características são descritos a seguir.

F1.1) – Materiais

Com o uso da máquina de EP, modelo: 16D75417 *Mühlacker*, foram feitos experimentos com o ABS²⁵, o qual é um dos termoplásticos muito usado na PR e no

²⁵ O A.B.S. (*Acrylonitrile-Butadiene-Styrene*) é um plástico, cujo desenvolvimento tem estado tradicionalmente vinculado a aplicações na indústria. Caracteriza-se por suportar golpes sem sofrer fissuras nem roturas, facilmente limpo com um pano, reciclável, dificulta o desenvolvimento de germes.

Rapid Tooling, conforme estudo de Dusel (2000). Essa máquina extruda o termoplástico através de um bico injetor com 0,5 mm de diâmetro.

No processo FDM usou-se a máquina modelo: Prodigy – Plus, a qual processa somente ABS. O diâmetro de saída do bico injetor é de 0,30 mm, o que fornece uma camada do protótipo com largura de 0,3 mm e com altura de 0,25 mm.

F1.2) – Métodos

Nos experimentos, construiu-se um protótipo com a forma de um cilindro²⁶ (figura 46) com as seguintes dimensões: $L = 0,5$ mm; $e = 0,5$ mm; $h = 7,5$ mm (corresponde a 15 camadas); $d = (30$ mm). Os eixos X e Y nas máquinas da FDM e EP trabalharam simultaneamente, de modo a descreverem um círculo.

A programação dos eixos X, Y e Z, na máquina EP, foi elaborada em código “G” para se depositar os filamentos, e fabricar a peça conforme a geometria cilíndrica vazada apresentada na figura 46.

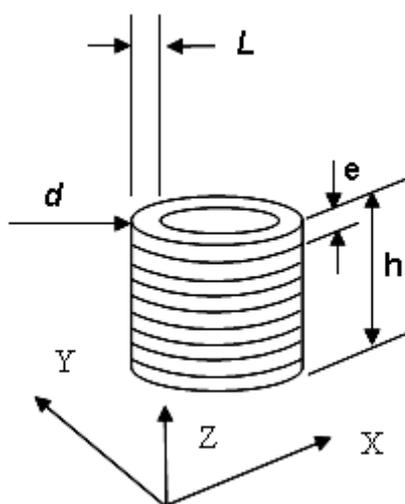


Figura 46 – Grandezas dimensionais do protótipo fabricado nos experimentos com a FDM e EP.

²⁶ Objetivou-se obter parâmetros operacionais quantitativos.

No processo FDM, a peça foi desenhada no software (*INSIGHT*²⁷) e utiliza o formato SLC para fazer o fatiamento do desenho do protótipo e também elaborar a estratégia da trajetória do bico extrusor durante o depósito das camadas do termoplástico. Esse software dispõe de recursos básicos para a realização de desenhos, mas para produção de peças complexas, ou seja, peça com formas geométricas não elementares há necessidade de se utilizar software CAD.

F2) – Análise Comparativo

Nos itens que se seguem, entre os processos FDM, EP e MDTA, são avaliados os seguintes aspectos: operação e preparação; análise dimensional; análise de forma dos protótipos gerados; comparativo dos custos com material; comparativo de utilização e, finalmente, comparativo de processamento e pós processamento.

F2.1) - Comparativo operacional e de preparação

Na MDTA, o compósito à base de carboidrato é extrudado sob temperatura ambiente, enquanto nas máquinas FDM e EP o material ABS é fundido e extrudado para posterior modelagem.

A transformação do material na EP é semelhante do processo da máquina de FDM. Nos dois casos, o material é aquecido até a temperatura de extrusão e a diferença básica é o estado da matéria prima, ou seja, material granulado (EP) e material em forma de fio (FDM).

Na máquina EP, uma porção de material ABS é aquecida e liquefeita em diferentes zonas do dispositivo extrusor. Essa porção de material liquefeita alojada nas paredes

²⁷ Software desenvolvido pela empresa *Stratasys*

internas do cilindro e nos filetes externos do parafuso de movimento, é deslocada via movimento rotativo do parafuso, de modo a ocorrer a extrusão. No processo FDM, a matéria-prima, que encontra-se em forma de fio é movida para dentro do dispositivo pela ação de dois roletes e passa pela região aquecida do mesmo onde, à temperatura de 280° C, é liquefeita para ser extrudada.

F2.2) - Estado físico da matéria prima: o compósito de carboidrato encontra-se, inicialmente no estado pastoso homogêneo, o que facilita o escoamento ao ser injetado. Esse estado pastoso não requer aquecimento, tanto para o ambiente no qual será depositado quanto para a operação de deposição do material e construção do protótipo camada por camada;

Tabela 26 – Comparativo de dados de preparação e operação entre sistema EP, FDM e MDTA.

Material		ABS		Compósito
Variáveis de preparação e operação		FDM	EP	MDTA
Tempo de aquecimento (min)		20	90	—
Temperatura de trabalho (° C)	Zona 1 =	180	189	—
	Zona 2 =		214	
	Flange =		214	
	Bico injetor =		216	
Temperatura “Stand by” (° C)	Cabeçote extrusor	102	Idem à temperatura de trabalho	—
	Envelope	60		
Período de tempo do “stand by” para a operação (minutos)		1,5	Idem ao tempo de trabalho	—
Tempo de operação (min)		10	⊗	13, 75
Vazão (cm ³ /hora)		8,5	27,5	9,78
Preparação da máquina com relação ao tempo de aquecimento (min)		5	40	—
Rotação (RPM) (velocidade de extrusão)		⊗	0,5	0,5

— : não requer uso, ⊗ : não medido,

F2.3) - Elementos constituintes do compósito: dentre os elementos do compósito de carboidrato, têm-se elementos que, além de facilitar a fluidez e diminuir a resistência nas paredes internas do cilindro, possibilitam mais flexibilidade e maleabilidade para se moldar um protótipo durante o processo de extrusão;

F2.4) - Volume do material: o volume de material deslocado é menor no dispositivo da MDTA quando comparado à EP (aproximadamente 3300 cm³);

F2.5) - Comparativo dimensional

Os dados dimensionais dos processos (tabela 27) possibilitam verificar que a MDTA pode trabalhar tanto proporcionalmente ao campo de precisão dimensional do FDM quanto ao da EP, como descrito a seguir:

Na MDTA, usou-se bico injetor com diâmetro de saída de 0,64 mm, de modo que, tanto a largura quanto a altura das camadas são maiores do que no processo FDM (usou-se bico com 0,3 mm), mas, por outro lado, proporcionais ao da EP (usou-se bico com 0,5 mm);

Em termos de variação dimensional, a MDTA é equivalente aos processos comparados, isso porque a precisão varia na casa de décimos de milímetro. O valor obtido corresponde à média aritmética da soma das rugosidades obtidas das velocidades de deslocamento da superfície de deposição, conforme dados dimensionais obtidos e descrito no item 8.4. Isso indica que a MDTA pode proporcionar igual ou menor precisão do que o FDM utilizando bico injetor de mesma dimensão.

Tabela 27 – Comparativo dos dados dimensionais entre os sistemas EP, FDM e MDTA.

	Material		
	ABS		Compósito
Tipo de processo	FDM	EP	MDTA
Diâmetro do bico extrusor (mm)	0,30	0,5	0,64
Largura da camada (mm)	0,40	0,6	0,64
Altura da camada	0,25	0,45	0,64
Precisão ²⁸ (mm)	± 0,127 (valor indicado pelo fabricante)	± 0,15 (valor indicado pelo fabricante)	± 0,168

F2.6) - Comparativo dos custos com material

Na tabela 28, compara-se os custos dos materiais nos processos estudados (FDM, EP e MDTA), como segue:

No FDM o custo da matéria prima é composto por dois materiais, como segue: matéria prima para construir o protótipo (R\$936,00/Kg – ABS)²⁹ e matéria-prima para construir a estrutura do suporte (R\$750,00/Kg – *WaterWorks*) de regiões delgadas e ou ocas do protótipo;

O custo na EP é de R\$ 20,00/Kg. Entretanto são necessários cerca de 2 Kg para o preenchimento do canhão e inicio do trabalho de extrusão. Ainda nesse processo, durante a troca de materiais, ocorre uma reação química dentro do canhão devido à mistura ser feita acima da temperatura de um dos dois materiais, resultando em degradação e perda de tempo na eliminação do material a ser descartado, assim como um volume de material que será inutilizado. Logo, os custos com o consumo de matéria prima é maior;

²⁸ Relativa ao erro nas dimensões geométricos do protótipo advindo da espessura da camada

²⁹ O valor refere-se ao equipamento utilizado (modelo Prodidy)

Na MDTA o custo do compósito à base de complexo de carboidrato é de R\$ 17,00/Kg. Além dos custos serem relativamente menores, ressalta-se que esse material está disponível em cores variadas, o que possibilita a construção de protótipos com diferenciação de cores.

Tabela 28 – Comparativo dos custos do material entre os sistemas EP, FDM e MDTA.

	Material		
	ABS		Compósito
Tipo de processo	FDM	EP	MDTA
Custo do material (R\$/Kg)	R\$936,00 (cartucho de material da peça) e R\$750,00 (cartucho de material do suporte)	R\$20,00	R\$17,00

F2.7) - Comparativo da utilização

Na tabela 29, compara-se a utilização dos protótipos gerados nos processo FDM e EP com aqueles fabricados na MDTA.

Do item 1 ao item 5, relativos aos tipos de processo, verifica-se que os protótipos podem ser utilizados de forma apropriada para modelagem concepcional, moldes funcionais, moldes para formar objetos sob temperatura ambiente, assim como no uso do *Rapid Tooling*, no qual especificamente a MDTA foi usada para construir protótipos de compósito à base de complexo de carboidrato para moldar o gesso de fundição e posterior fundição, conforme experimentos descritos no apêndice G.

No item 6, verifica-se que os processos FDM e EP não são apropriados em termos de custo, diferentemente do que ocorre com a MDTA, pois o custo do material é relativamente menor, havendo ainda a possibilidade de se fabricar brinquedos multicores. E essa característica é importante para diferenciar, observar ou visualizar formas. O compósito é material atóxico, por isso, durante a sua manipulação manual ou na extrusão, não é necessário haver proteção pessoal ou mesmo tratamento posterior de gases, como nos processos que utilizam o *laser*. O compósito também não exige controle de temperatura, como no FDM ou EP em que as temperaturas de trabalho estão acima da ambiente, como no processamento do ABS, que é de 280°C, e devem ser controladas para que o material permaneça no estado pastoso.

No item 7 e 8, verifica-se os processos FDM e MDTA se aplicam a quaisquer ambientes, tais como os de desenvolvimento de produtos, o de produção, instituições de ensino para a prática do aprendizado da PR. Somente o sistema de extrusão do processo da MDTA, entretanto, pode ser concebido como um equipamento de pequenas dimensões. Essa redução de dimensão é possível devido às características do material a ser extrudado sob temperatura ambiente e isso assegura que o processo ofereça menor risco ao operador.

Por outro lado, o protótipo gerado com o carboidrato deve ser manipulado em ambiente seco, pois, caso contrário, o protótipo poderá perder a sua forma original, assim como ocorre nos processos de PR via *Layer Laminate Manufacturing* (LLM), em que os protótipos são propensos a perder a forma em ambientes úmidos, pois as camadas de são fabricadas por folha de papel impregnada com cola.

Tabela 29 – Comparativo da utilização entre os sistemas EP, FDM e MDTA.

		Material		
		ABS		Compósito
Tipo de processo		FDM	EP	MDTA
1	Rapid Tooling: Moldes para fundição em areia, etc.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2	Modelagem concepcional	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3	Moldes para formar objetos de materiais a serem transformados sob temperatura ambiente.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4	Modelos funcionais	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/> - Quando usados para a modelagem de cavidades para fundição
5	Protótipos de mostruário	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6	Protótipos de brinquedos	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> - Alto custo	<input type="radio"/>
7	Ambientes de desenvolvimento de produtos ou de produção	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> Só oficina	<input type="radio"/>
8	Cursos e treinamentos em instituições de ensino	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> - Alto custo	<input type="radio"/> - Pelo baixo custo e não oferecer perigo ao aluno durante a manipulação.

: apropriado para utilização, : não apropriado para utilização.

F2.8) - Comparativo do processamento e pós processamento

A seguir, o processo MDTA é avaliado em termos de características durante o processamento e pós processamento e comparado com os processos FDM e EP, por meio dos itens que se seguem:

F2.9) - Complexibilidade geométrica do protótipo

Nos processos FDM e EP, o material ABS é extrudado em estado pastoso e adquire rigidez em um curto espaço de tempo, portanto é possível fabricar protótipos com relativo grau de complexibilidade com um número menor de estruturas de sustentação de regiões delgadas ou ocas, em relação ao material usado no processo MDTA, no qual o material do protótipo obtém consistência apenas depois de 15 minutos depois de sua extrusão.

F2.10) - Reservatório de material

Na EP o material para a construção do protótipo localiza-se no funil de alimentação e internamente ao cilindro. Isso requer um procedimento especial, quando da substituição de um material por outro de características físicas e químicas diferentes. Na FDM há dois reservatórios, sendo um para o material do protótipo e outro para o material de estruturas de apoio. Já o dispositivo extrusor desenvolvido para a MDTA utiliza reservatório removível para posterior reabastecimento.

F2.11) - Consumo de energia

A energia requerida na MDTA, para extrudar material através de um bico injetor de diâmetro de 0,64 mm, é relativamente baixa, pois o motor usado para realizar o trabalho de extrusão requer 3 Watts, já nos processos FDM (1650 Watts – 110-220 VAC, 60Hz, 15 A máx. – modelo Prodigy) e EP (90.000 Watts – modelo 16D75417 EXTRUDEX), além da energia para se extrudar o material, necessita-se manter o sistema de extrusão aquecido durante todo o processo de construção do protótipo. Especificamente na FDM, o fabricante orienta que o sistema de aquecimento do equipamento deve permanecer acionado ininterruptamente, gerando ou não um

protótipo, pois do contrário o material adquire umidade, e isso poderá danificar o dispositivo de alimentação e aquecimento da máquina. Sob esse aspecto o sistema de extrusão do processo MDTA é vantajoso, pois os motores só são acionados durante o processo de geração do protótipo. O baixo consumo de energia é um item importante nos processos de PR, pois em muitos casos os protótipos necessitam de muitas horas ou mesmo dias para que sejam construídos.

F2.12) - Supervisão e manutenção

Ao se transformar o estado físico do material ABS de sólido para fluidificado, partes do dispositivo de extrusão da EP sofrem desgaste devido ao contato direto com o material aquecido, isso ocorre com o cilindro e o canhão, que irão requerer constante supervisão e manutenção, assim como com o dispositivo de extrusão da FDM. Outro complicador nos processos de extrusão é a troca de material que se encontra dentro do dispositivo de extrusão. E essa dificuldade ocorre porque as características químicas dos materiais podem ser diferentes, isto é a temperatura de operação e a de transformação podem ser diferentes. Além disso, existe a possibilidade de reação química e de degradação dos materiais. Na MDTA esses complicadores não existem, pois todo o processo ocorre sob temperatura ambiente.

F2.13) - Sistema de deslocamento dos eixos:

Nos processos FDM e EP, o *timer* de pausa deve ser curto para se deslocar o eixo na direção vertical (Z), para a construção de uma nova camada do protótipo, pois, do contrário, ocorre acúmulo de material. Esse problema também deve ser considerado na MDTA.

F2.14) - Operação posterior:

Entre os processos por deposição, os protótipos fabricados por FDM e EP, descritos no apêndice D, geralmente apresentam rugosidade superficial maior, pois nesses processos usa-se bico extrusor com 0,3 mm de diâmetro e nos processos a *laser* o diâmetro do foco do *laser* é de centésimos de milímetros. Assim nestes processos por deposição de material, são necessárias operações de acabamento e também de retirada de estruturas de apoio, ou seja, de suportes para sustentação de partes delgadas do protótipo, as quais são fabricadas concomitantemente ao protótipo. No FDM e na EP essas estruturas são fabricadas com material diferente do protótipo. Na MDTA, o acabamento também se faz necessário, pois são requeridas estruturas de apoio.

APÊNDICE G – Fundição de protótipos fabricados via processo da MDTA

No experimento de fundição usou-se um forno elétrico (marca: Quimis, modelo - 318D24, 220 volts, 60 Hz, 4000 W, temperatura de 0° - 1200°C, variação de temperatura de 0 até 10%) (figura 47).



Figura 47 – Forno elétrico utilizado nos experimentos

Os moldes com cavidades em forma de quadrado e círculo (figura 48) foram feitos via moldagem com protótipos obtidos pela MDTA. Para emular a areia de fundição, usou-se gesso para fundição de peças feitas por ourives.

Abaixo, tem-se as etapas do processo de fundição. Inicialmente, o cadinho com estanho (50 x 50) (figura 48 A) e os moldes são introduzidos no forno (figura 48 B). Ajustou-se a temperatura do forno em 340° para a fundição do estanho. Na etapa seguinte, o estanho liquefeito é despejado sobre o molde (figura 48 C). O excesso de estanho fundido e liquefeito é retirado (figura 48 D).

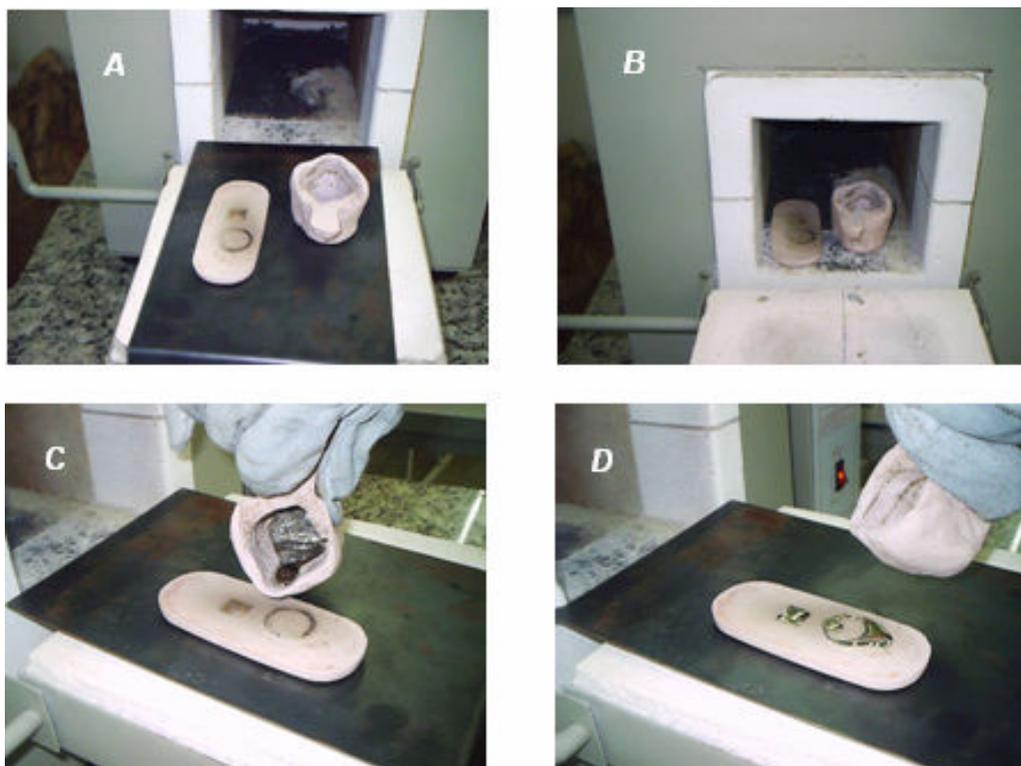


Figura 48 – Etapas de trabalho durante o processo de fundição no forno elétrico

O processo é finalizado retirando-se as peças do molde e fazendo-se a operação de rebarbamento das peças em esmeril. O resultado final são peças (figura 49) com formas iguais aos protótipos, validando assim a utilização de protótipos fabricados pelo processo de moldagem a frio quando do uso em fundição.

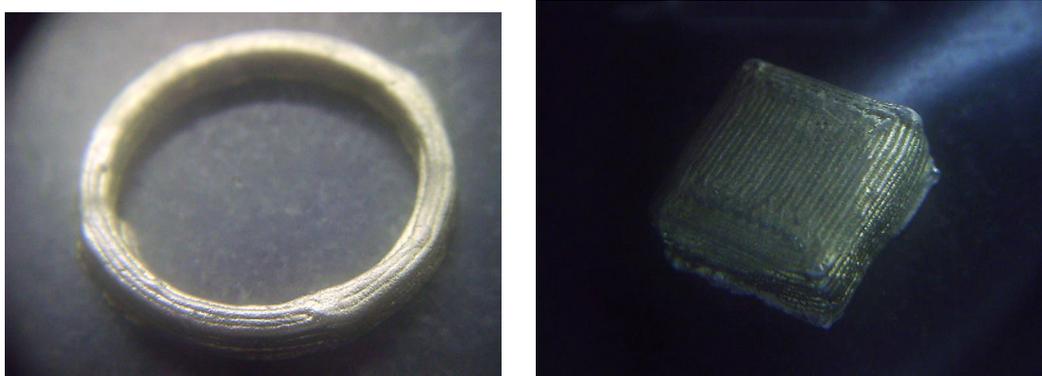


Figura 49 – Peças fundidas

APÊNDICE H – Sobre o autor

VALDEMIR MARTINS LIRA, brasileiro, 45 anos, casado, 2 filhos, endereço eletrônico: valdemirlira@globo.com, telefones: (011) 91770891



Iniciou as atividades na indústria em 1978, como ajudante de produção e em 1995, na última empresa, atuou como encarregado de processos. Durante esse período, trabalhou em diversos setores da Engenharia industrial e de produção, tais como: usinagem em CNC, células de produção e montagem de máquinas e equipamentos. Ainda na área industrial participou de treinamentos, em cursos e palestras referentes à manufatura automatizada de produtos, desenvolvimento de Dispositivos para Usinagem, Programação em Máquinas a Controle Numérico Computadorizado.

Na área de projetos, desenvolveu várias máquinas e equipamentos, tais como: extrusoras e injetoras, equipamentos para a transformação de termoplástico, equipamentos para soldagem, projetos de válvulas, dimensionamento de chassi de caminhão, dispositivos para usinagem.

Em 1993 iniciou as atividades como professor, tendo lecionado várias disciplinas, tais como: Automação Industrial, Processos de Fabricação, Manufatura Auxiliada por Computador (CAM), Pneumática e Hidráulica básica, CNC, CAD, Mecânica Técnica, Elementos de Máquinas, Desenho e Projetos de Máquinas, Controle de Medidas, Eletrônica.

Em 1991 graduou-se em Tecnologia Mecânica (Modalidade Projetos), e em 1994 obteve Licenciatura Plena para Processos de Produção, ambas pela FATEC-SP (UNESP - CEETPS). Dando prosseguimento aos estudos, obteve, em 2000, o título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de Materiais e Processos de Fabricação, pela UNICAMP e, a partir de 2001, iniciou o doutorado em Engenharia Mecânica, concluído com essa pesquisa.

Na área de ensino, trabalhou nos seguintes projetos: construção de um redutor de velocidade por meio de engrenagens cilíndricas de dentes retos, construção de um guincho elétrico com capacidade de içamento de 200 Kg, montagem de um sistema de furação automatizado via eletropneumática, construção de um robô (braço mecânico), montagem de uma balança eletrônica via célula de carga, projeto, fabricação e montagem de sistema de deslocamentos em 3 eixos (X, Y e Z), projetos e construção de dispositivo extrusor para materiais pastosos sob temperatura ambiente.

Publicou 6 artigos, cujos títulos são:

⇒ **Usinagem de roscas em tornos a CNC** – Revista Máquinas e Metais (Julho/2000);

⇒ **Um algoritmo para usinagem de roscas em tornos à CNC** – Revista Máquinas e Metais (Maio/2001);

⇒ **Proposta de um Processo de prototipagem rápida via modelagem por deposição sob temperatura ambiente.** Esse artigo foi apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF 2007);

⇒ **Influence of operational parameters on the filament width in deposition modeling process at room temperature.** Esse artigo foi submetido, aceito e publicado no *The 17th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (2007 FAIM)* Philadelphia, USA;

⇒ **An experimental approach for the deposition control of an room temperature filament deposition rapid prototyping process.** Esse artigo foi apresentado no COBEM07 - the 19th Congress of Mechanical Engineering.

⇒ **Modelagem de sistema de extrusão de material em forma de filamentos sob temperatura ambiente para prototipagem rápida.** Esse artigo foi apresentado no Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2008);

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](#)