**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUIS HILÁRIO TOBLER GARCIA

**Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas
através da tecnologia de Manufatura Aditiva.**

**São Carlos
2016**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G216d Garcia, Luis Hilário Tobler
Desenvolvimento de processo de fabricação de
compósitos de fibras longas através da tecnologia de
manufatura aditiva / Luis Hilário Tobler Garcia;
orientador Jonas de Carvalho. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto
Mecânico -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. manufatura aditiva. 2. compósitos. 3. polimeros
reforçados. 4. impressão 3d. I. Título.

LUIS HILÁRIO TOBLER GARCIA

**Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas
através da tecnologia de Manufatura Aditiva.**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Jonas de Carvalho

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE
DA VERSÃO CORRIGIDA. A
VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECANICA
DA EESC-USP.

**São Carlos
2016**

À Deus por me permitir andar por este caminho.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **LUIS HILÁRIO TOBLER GARCIA**.

Título da tese: " Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de manufatura aditiva".

Data da defesa: 08/12/2016.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Jonas de Carvalho**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado.

Prof. Associado **Jaime Gilberto Duduch**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Marcelo Aparecido Chinelatto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Gustavo Franco Barbosa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **Mariano Eduardo Moreno**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a quem me rendo todos os dias;

Agradeço ao meu pai, meu herói, de quem tenho orgulho por me assemelhar;

Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho, meu orientador, cujos ensinamentos e orientações permitiram a elaboração deste trabalho;

À minha esposa, Marilena, minha filha Maria Eduarda e minha filha Maria Fernanda, por quem eu luto todos os dias;

Agradeço a toda a minha família por estarem ao meu lado me apoiando e me orientando;

Ao grande amigo Ildeberto de Genova Bugatti e toda a sua família, sempre presentes em minha vida;

Aos amigos Wanderlei de Souza Marques, Tsen Chung Kang e Hannes Fisher cujos aconselhamentos e ensinamentos ultrapassam a minha vida acadêmica;

Ao amigo Carlos Eduardo de Mendonça Otoboni pelos conselhos e compreensão;

Aos amigos Walter Sgrignoli Júnior, José Carlos Risardi e Nelson Candido Azevedo Filho pela contribuição técnica na fabricação das partes mecânicas e eletrônicas;

À FATEC Shunji Nishimura e ao departamento de Engenharia do grupo Jacto pelo auxílio no ferramental;

À Capes pelos recursos financeiros oferecidos;

À EESC / USP e toda sua equipe de funcionários pela oportunidade e assistência em especial às secretárias da pós-graduação, Ana Paula e Iara, por me auxiliarem em todas as questões burocráticas.

RESUMO

GARCIA, L. H. T. (2016). **Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de Manufatura Aditiva.** Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O trabalho trata do desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de manufatura aditiva, possibilitando a criação de peças com maior resistência mecânica através da combinação adequada de materiais com diferentes propriedades mecânicas. Os processos de manufatura aditiva consistem na obtenção de um objeto sólido a partir de um modelo digital de três dimensões, através do fatiamento deste modelo e da adição sequencial de material com o objetivo de criar suas respectivas camadas, permitindo a reprodução real do modelo digital escolhido. Um compósito é a combinação de materiais com diferentes propriedades para a obtenção de um novo material com características específicas, permitindo a criação de melhores arranjos de propriedades através da escolha adequada dos materiais a serem combinados. Os materiais que formam um compósito podem ser divididos em matriz e reforço, entre os quais, os materiais de reforço são responsáveis por suportar os carregamentos transmitidos pela matriz. O uso de materiais poliméricos reforçados resulta em um material com baixo peso e elevada resistência mecânica. A adição de fibras longas nos processos de manufatura aditiva é foco do estudo, no qual foi utilizada a tecnologia *Fused Deposition Modeling* devido à sua simplicidade e facilidade de acesso a equipamentos de baixo custo para fins de validação de conceito. Foi desenvolvido e construído um cabeçote de deposição contínua de fibras longas, adequado ao uso no processo de deposição por camadas, através do qual foram manufaturados corpos de prova, que foram ensaiados mecanicamente conduzindo a resultados satisfatórios, validando a técnica e indicando que a fabricação de polímeros reforçados através da tecnologia de manufatura aditiva é um processo promissor.

Palavras-chave: manufatura aditiva, compósitos, polímeros reforçados, impressão 3D.

ABSTRACT

GARCIA, L. H. T. (2016). ***Development of composites manufacturing process through Additive Manufacturing process technology***. Thesis Doctorate – School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2016.

The work deals with the development of long fiber composite manufacturing process through additive manufacturing technology, enabling the creation of parts with higher mechanical strength through proper combination of materials with different mechanical properties. Additive manufacturing processes consist in obtaining a solid object from a three dimension digital model through the slicing of the model and the sequential addition of material layer by layer allowing the real reproduction of the digital model. A composite is a combination of materials with different properties to obtain a new material having specific characteristics, allowing the creation of the best arrangement of properties through the choice of materials to be combined. The materials that form a composite can be divided into matrix and reinforcement, where the reinforcing materials are responsible for supporting the loads transmitted by the matrix. The use of reinforced polymeric materials results in a material with low weight and high mechanical strength. The addition of long fibers in the additive manufacturing process is the focus of this study, where the Fused Deposition Modeling process was used due to its simplicity and facility to access low-cost equipment in order to validate the concept. The system developed was used to manufacture specimens which have been mechanically tested leading to satisfactory results, indicating a very promising process for the production of reinforced polymers by additive manufacturing technology.

Keywords: additive manufacturing, composites, reinforced polymers, 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vida de um produto (PAHL, 2005).	34
Figura 2 – Fases do projeto de um produto (BACK, 1985).	36
Figura 3 – Atividades de projeto – fases primárias (BACK, 1985).....	36
Figura 4 – Atividades de projeto nas diferentes etapas de desenvolvimento de um produto (BAXTER, 1998).	37
Figura 5 – Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto (PAHL, 2005)....	39
Figura 6 – Funil de decisões (BAXTER, 1998).....	41
Figura 7 – Correlação entre atividades de projeto e possíveis ferramentas a serem utilizadas (BAXTER, 1998).....	42
Figura 8 – Quadro morfológico (PAHL, 2005).	44
Figura 9 – Tecnologias associadas à prototipagem rápida (PHAM, 1998).....	45
Figura 10 – Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada (CARVALHO, 2007).....	46
Figura 11 – Modelo sólido em CAD 3D.....	48
Figura 12 – Modelo sólido em CAD 3D convertido para representação STL.	49
Figura 13 – Princípio do processo LOM. Adaptado de HOPKINSON et al. (2006). ..	51
Figura 14 – Princípio do processo FDM (VOLPATO, 2007).....	52
Figura 15 – Princípio do processo SLS. Adaptado de SELLS (2009).	54
Figura 16 – Princípio do processo 3DP. Adaptado de SELLS (2009).	55
Figura 17 – Princípio do processo SLA. Adaptado de SELLS (2009)	56
Figura 18 – Princípio do processo DLP. Adaptado de HOPKINSON et al. (2006). ...	57
Figura 19 – Princípio do processo SGC. Adaptado de WIKIPEDIA (2013).	58
Figura 20 – Princípio do processo LENS (VOLPATO, 2007).	59
Figura 21 – Gráfico de participação das áreas que utilizam a manufatura aditiva (WOHLERS, 2008).....	61
Figura 22 – Comparação entre tempo de comunicação na fase de projeto utilizando desenhos 2D, modelos CAD 3D e protótipos físicos (VOLPATO, 2007).....	62
Figura 23 – Organograma de classificação dos materiais compósitos. (MATTHEWS & RAWLINGS, 1994).....	64
Figura 24 – Exemplos de compósitos reforçados: (a) por partículas aleatórias; (b) por fibras descontínuas unidirecionais; (c) por fibras descontínuas aleatórias; (d) por fibras contínuas unidirecionais (MATTHEWS & RAWLINGS, 1994).	65

Figura 25 – Representação do processo de moldagem manual (NETO, 2006).	71
Figura 26 – Representação do processo de Moldagem por transferência de resina (WIKIMEDIA COMMONS, 2013).	71
Figura 27 – Representação do processo de Moldagem por mistura e injeção (NETO, 2006).	72
Figura 28 – Foto do processo de moldagem por pulverização (NETO, 2006).	73
Figura 29 – Representação do processo de injeção (NETO, 2006).	73
Figura 30 – Representação do processo de compressão (NETO, 2006).	74
Figura 31 – Representação do processo de centrifugação (NETO, 2006).	75
Figura 32 – Representação do processo de laminação (NETO, 2006).	75
Figura 33 – Representação do processo de enrolamento filamental (CARVALHO,1996).	76
Figura 34 – Representação das principais estratégias de enrolamento filamental (CARVALHO,1996).	77
Figura 35 – Imagem MEV de amostra de bronze (Cu e 10% de Sn) infiltrada por WC-12Co (KUMAR, 2009).	82
Figura 36 – Fluxograma da estratégia proposta.	89
Figura 37 – Procedimento de tomada de decisão resumido.	90
Figura 38 – Impressora 3D FDM modelo Mendel Prusa.	93
Figura 39 – Propriedades físicas e químicas da amostra de fibra de vidro.	94
Figura 40 – FDM Proposta 01: (a) fabricação da camada base; (b) criação das paredes de suporte; (c) preenchimento manual das lacunas com material de reforço; (d) criação da camada superior.	97
Figura 41 – FDM Proposta 02: Filamento de termoplástico com núcleo de fibra de carbono. Adaptado de Volpato (2007).	98
Figura 42 – LOM: Troca de sistema de alimentação e troca de sistema de corte. Adaptado de Volpato (2007).	99
Figura 43 – LOM: (a) fabricação da camada base; (b) criação das paredes de suporte; (c) preenchimento manual das lacunas com material de reforço; (d) criação da camada superior.	100
Figura 44 – Critérios geométricos do corpo de prova do ensaio de tração. Adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995).	101
Figura 45 – Medidas de corpos de prova em compósitos para ensaio de tração. Adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995).	101

Figura 46 – Corpo de prova de controle maciço feito em ABS (Stratasys).	103
Figura 47 – Camadas usadas na montagem de corpo de prova ABS + FIBRA + EPOXI.	104
Figura 48 – Corpo de prova feito em ABS + FIBRA + EPOXI.	105
Figura 49 – Camadas usadas na montagem de corpo de prova ABS + FIBRA + MEK.	105
Figura 50 – Corpo de prova feito em ABS + FIBRA + MEK.	106
Figura 51 – Corpo de prova 100% fabricado em ABS montado no equipamento de ensaio.	107
Figura 52 – Corpo de prova de controle maciço feito em ABS rompido.	107
Figura 53 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço fabricado em ABS nº 01.	108
Figura 54 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço fabricado em ABS nº 02.	109
Figura 55 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço fabricado em ABS nº 03.	110
Figura 56 – Corpo de prova ABS + FIBRA + EPOXI montado no equipamento de ensaio.	111
Figura 57 – Corpo de prova de controle fabricado em ABS + FIBRA + EPOXI rompido.	111
Figura 58 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + EPOXI.	112
Figura 59 – Ensaio do corpo de prova ABS + FIBRA + MEK.	113
Figura 60 – Corpo de prova de controle fabricado em ABS + FIBRA + MEK rompido.	113
Figura 61 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + MEK nº 01.	114
Figura 62 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + MEK nº 02.	115
Figura 63 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + MEK nº 03.	116
Figura 64 – Efeito de delaminação no ensaio do corpo de prova ABS + Fibra + Epoxi.	117
Figura 65 – Gráfico comparativo dos ensaios de tração preliminares.	117

Figura 66 – Impressão de um urso de pelúcia 3D. Modelo tridimensional (esquerda), Impressão em progresso (direita) (HUDSON, 2014).	119
Figura 67 – Impressão de um urso de pelúcia 3D. Resultado final. (HUDSON, 2014).	120
Figura 68 – Dispositivo de deposição de lã Adaptado de HUDSON (2014).	120
Figura 69 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 1 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	121
Figura 70 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 2 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	122
Figura 71 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 3 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	123
Figura 72 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 4 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	124
Figura 73 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 5 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	125
Figura 74 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 6 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	126
Figura 75 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 7 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.	127
Figura 76 – Peças fabricadas para a montagem do cabeçote.	128
Figura 77 – Montagem do bloco de aquecimento (visão geral).	129
Figura 78 – Montagem do bloco de aquecimento (detalhe).	129
Figura 79 – Montagem do conjunto principal – 1ª etapa.	130
Figura 80 – Montagem do conjunto principal – 2ª etapa.	130
Figura 81 – Montagem do conjunto principal – 3ª etapa.	130
Figura 82 – Montagem do conjunto principal – 4ª etapa.	130
Figura 83 – Montagem do conjunto principal – 5ª etapa.	131
Figura 84 – Montagem do conjunto principal na impressora RepRap.	131
Figura 85 – Arduino Duemilanove.	132
Figura 86 – Placa de controle de movimentação e temperatura.	133
Figura 87 – Diagrama do programa utilizado no microcontrolador Atmel Atmega328.	134
Figura 88 – Corpo de prova de controle maciço feito em ABS (RepRap).	136
Figura 89 – Primeira camada de ABS do corpo de prova nº 01 (RepRap).	137

Figura 90 – Primeira camada de fibra de vidro do corpo de prova nº 01 (RepRap).	138
Figura 91 – Segunda camada de ABS do corpo de prova nº 01 (RepRap).	138
Figura 92 – Segunda camada de fibra de vidro do corpo de prova nº 01 (RepRap).	139
Figura 93 – Terceira camada de ABS do corpo de prova nº 01 (RepRap).	140
Figura 94 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 01 (RepRap).	140
Figura 95 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02 (RepRap).	142
Figura 96 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 (RepRap).	143
Figura 97 – Compactação no corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 (RepRap).	144
Figura 98 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 (RepRap).	145
Figura 99 – Corpo de prova maciço em ABS montado no equipamento de ensaio.	146
Figura 100 – Corpo de prova maciço em ABS rompido.	146
Figura 101 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço em ABS.	147
Figura 102 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto montado no equipamento de ensaio.	148
Figura 103 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto.	149
Figura 104 – Relatório do segundo ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto.	150
Figura 105 – Corpo de prova final rompido.	151
Figura 106 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02 montado no equipamento de ensaio.	151
Figura 107 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02.	152
Figura 108 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 montado no equipamento de ensaio.	153
Figura 109 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 rompido.	153
Figura 110 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03.	154
Figura 111 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 montado no equipamento de ensaio.	155
Figura 112 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 rompido.	155
Figura 113 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04.	156
Figura 114 – Gráfico comparativo dos ensaios de tração finais.	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para confecção do corpo de prova piloto.	140
Tabela 2 – Parâmetros para confecção do corpo de prova nº 02.	141
Tabela 3 – Parâmetros para confecção do corpo de prova nº 03.	143
Tabela 4 – Parâmetros para confecção do corpo de prova nº 04.	144
Tabela 5 – Comparativo percentual dos resultados finais.	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
3DP	<i>Three Dimensional Printing</i>
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ARP	<i>Additive Rapid Prototyping</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
BMC	<i>Bulk molding compound</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CMB	<i>Controlled Metal Buildup</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FW	<i>Filament Winding</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GMF	Gradientes de Materiais Funcionais
HA	Hidroxiapatita
HL	<i>Hand Lay up</i>
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
LPS	<i>Liquid Phase Sintering</i>
MA	Manufatura Aditiva
MCRF	Materiais Compósitos Reforçados por Fibras
MEK	Metil Etil Cetona
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PAN	Poliacrilonitrila
PEEK	Poli (éter-éter-cetona)
PC	Polycarbonato
RP	<i>Rapid prototyping</i>
RRIM	<i>Reinforced reaction injection Molding</i>
RTM	<i>Resin transfer molding</i>

SL	<i>Stereolithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SMC	<i>Sheet molding compound</i>
SRP	<i>Subtractive Rapid Prototyping</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
TLCP	Polímero Líquido-Cristalino Termotrópico
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultra violeta
X	Eixo cartesiano X
Y	Eixo cartesiano Y
Z	Eixo cartesiano Z

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	27
1.1.	Motivação.....	29
1.2.	Objetivos do trabalho	30
1.3.	Descrição do trabalho	31
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1.	Metodologia de projeto.....	33
2.2.	Manufatura aditiva.....	44
2.2.1.	Modelos tridimensionais CAD	47
2.2.2.	Representação de modelos tridimensionais em STL	48
2.3.	Principais métodos de manufatura aditiva	50
2.3.1.	Manufatura de objetos em lâminas (LOM)	50
2.3.2.	Modelagem por deposição de material fundido (FDM)	52
2.3.3.	Sinterização seletiva a laser (SLS)	53
2.3.4.	Impressão 3D por jato de tinta	54
2.3.5.	Estereolitografia (SLA)	55
2.3.6.	Digital Light Projection (DLP)	56
2.3.7.	Cura de base sólida (SGC)	58
2.3.8.	Conformação próxima ao formato final via laser (LENS)	59
2.4.	A manufatura aditiva na indústria.....	60
2.5.	Materiais compósitos	63
2.5.1.	Materiais de reforço	63
2.5.1.1.	Partículas	65
2.5.1.2.	Fibras	65
2.5.2.	Matriz	67
2.5.3.	Interface entre o material de reforço e o material matriz	68
2.5.4.	Processos de fabricação em Compósitos	70
2.5.4.1.	Moldagem Manual.....	70
2.5.4.2.	Moldagem por transferência de resina	71
2.5.4.3.	Moldagem por mistura e injeção	72
2.5.4.4.	Moldagem por pulverização	72
2.5.4.5.	Injeção.....	73
2.5.4.6.	Compressão.....	74

2.5.4.7.	Centrifugação.....	74
2.5.4.8.	Laminação.....	75
2.5.4.9.	Enrolamento Filamentar	76
2.5.4.10.	Pré-formados	77
2.5.4.11.	Pré-impregnados.....	78
2.5.4.12.	Composto de Moldagem em Massa.....	78
2.5.4.13.	Composto Reforçado com Fibra	78
2.5.4.14.	Pultrusão	78
2.5.5.	Projeto em Compósitos	79
2.6.	Materiais compósitos e manufatura aditiva	79
2.6.1.	Sinterização/Fusão Seletiva a Laser – SLS/SLM.....	80
2.6.1.1.	Fabricação de compósitos utilizando vários tipos de pós	81
2.6.1.2.	Fabricação de compósitos que utilizam reações In situ	82
2.6.1.3.	Fabricação de compósitos utilizando o tratamento em forno	83
2.6.2.	Impressão 3D por Jato de Tinta – 3DP	84
2.6.3.	Conformação Próxima ao Formato Final via Laser – LENS.....	85
2.6.4.	Manufatura de Objetos em Lâminas – LOM.....	85
2.6.4.1.	Compósitos reforçados com fibra em LOM	86
2.6.5.	Estereolitografia – SLA	86
2.6.5.1.	Compósitos reforçados com fibra em SLA	87
2.6.6.	Modelagem por Deposição de Material Fundido – FDM	87
2.6.6.1.	Compósitos reforçados com fibra em FDM	88
2.6.7.	Consolidação Ultrassônica – UC.....	88
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	89
3.1.	Etapas de projeto	90
3.2.	Identificação da demanda	90
3.3.	Análise de viabilidade técnica	92
3.3.1.	Equipamentos	93
3.3.2.	Insumos.....	94
3.4.	Análise conceitual do projeto	95
3.4.1.	Avaliação dos métodos	95
3.5.	Planejamento para a criação dos corpos de prova preliminares.....	96
3.5.1.	FDM	97
3.5.1.1.	Adição de material de reforço entre camadas em FDM	97

3.5.1.2.	Uso de filamento de termoplástico com núcleo fibroso como material de extrusão em FDM	98
3.5.2.	LOM	98
3.5.3.	SLA	99
3.6.	Métodos de ensaio dos corpos de prova	100
3.6.1.	Ensaio de Tração	100
3.7.	Escolha do método de Manufatura Aditiva.....	102
3.8.	Criação dos Corpos de Prova por Montagem Manual	102
3.8.1.	Corpos de prova maciços em ABS	103
3.8.2.	Corpo de prova em ABS + FIBRAS + EPOXI	103
3.8.3.	Corpos de prova em ABS + FIBRAS + MEK.....	105
3.9.	Execução dos ensaios dos corpos de prova preliminares	106
3.9.1.	Corpos de prova maciços fabricados em ABS	106
3.9.2.	Corpo de prova em ABS + FIBRAS + EPOXI	111
3.9.3.	Corpos de prova em ABS + FIBRAS + MEK.....	113
3.10.	Análise dos testes preliminares	117
4.	PROJETO DE UM CABEÇOTE DE DEPOSIÇÃO CONTÍNUA DE FIBRAS LONGAS	119
4.1.	Projeto Conceitual.....	119
4.1.1.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 1	121
4.1.2.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 2	122
4.1.3.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 3	122
4.1.4.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 4	123
4.1.5.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 5	124
4.1.6.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 6	125
4.1.7.	Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 7	126
4.2.	Fabricação e Montagem do Cabeçote de Deposição Contínua de Fibras Longas.....	127
4.2.1.	Fabricação e aquisição das partes mecânicas.....	128
4.2.2.	Montagem do Sistema de Aquecimento	128
4.2.3.	Montagem do Conjunto Principal	130
4.2.4.	Montagem do Conjunto Principal na Impressora RepRap	131
4.2.5.	Eletrônica	132
4.2.6.	Software de Controle	133

5.	RESULTADOS	135
5.1.	Criação dos Corpos de Prova por Montagem Automática	135
5.1.1.	Corpo de prova maciço em ABS	135
5.1.2.	Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK piloto	136
5.1.2.1.	Criação da primeira camada de ABS	137
5.1.2.2.	Criação da primeira camada de fibra de vidro.....	137
5.1.2.3.	Criação da segunda camada de ABS	138
5.1.2.4.	Criação da segunda camada de fibra de vidro.....	139
5.1.2.5.	Criação da terceira camada de ABS	139
5.1.3.	Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK nº 02	141
5.1.4.	Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK nº 03	142
5.1.5.	Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK nº 04	143
5.2.	Execução dos Ensaios dos Corpos de Prova por Montagem Automática	145
5.2.1.	Corpo de prova maciço em ABS	145
5.2.2.	Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto	148
5.2.3.	Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02.....	151
5.2.4.	Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03.....	153
5.2.5.	Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04.....	155
5.3.	Análise dos resultados finais.....	157
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	159
6.1.	Conclusões	159
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros	161
7.	REFERÊNCIAS	163

1. INTRODUÇÃO

O termo Manufatura Aditiva, também conhecido como prototipagem rápida, segundo Gibson (2014), é usado para descrever processos de fabricação que possibilitem a rápida criação de um modelo básico ou de um protótipo a partir do qual novos modelos e o próprio produto final serão derivados. Em outras palavras o processo de manufatura consiste em projetar e manufaturar o modelo de um produto ou peça a ser construído, podendo-se criar formas geométricas complexas em curto tempo de manufatura.

A fabricação de modelos, moldes e peças através dos processos convencionais de fabricação possui um alto custo, justificado pelo grande número de horas de usinagem, alta probabilidade de retrabalho e perda de materiais, assim como passos lentos que aumentam em demasia o tempo gasto para tais fabricações, as quais são realizadas em um único passo e em tempo reduzido através de máquinas de manufatura aditiva. A redução de tempo e de custo proporcionadas pelos métodos de prototipagem rápida revolucionou tanto a prototipagem quanto a manufatura (HEINZL; HERTZ, 1985).

Dessa forma a manufatura aditiva, define um método inovador de fabricação que reduz consideravelmente o tempo de manufatura de modelos e de partes de protótipos e a taxa de erro no processo produtivo.

Segundo Gorni (2001), os processos de manufatura aditiva englobam o preparo de um modelo digital tridimensional em CAD da peça a ser fabricada, a ação de um algoritmo de fatiamento na divisão deste modelo em camadas com aproximadamente 100µm de espessura com informações detalhadas sobre cada corte transversal e a criação de objetos através da adição e superposição de camadas de material, até que seja criado por completo.

Este processo de fabricação oferece a possibilidade do uso de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (BARNATT, 2013). Quando necessário, após o término do processo, o objeto pode ser sinterizado e/ou reforçado com a infiltração de outros materiais para a obtenção de maior resistência mecânica.

Atualmente a indústria busca processos de fabricação que possibilitem a produção contínua e automatizada de peças e produtos com qualidade, baixo custo e rapidez, mas que permitam a rápida alteração das configurações geométricas e de materiais das peças e produtos produzidos, fazendo com que os processos de

manufatura aditiva, inicialmente desenvolvidos para a criação de protótipos, sejam aplicados diretamente no processo produtivo industrial.

Mesmo havendo citado algumas das vantagens relacionadas aos processos de manufatura aditiva, é importante salientar que em sua grande maioria tais processos não permitem a criação de peças com as mesmas propriedades físicas de uma peça produzida através dos processos convencionais de fabricação, tornando importante o estudo e desenvolvimento de processos de fabricação que apresentem versatilidade, rapidez, precisão e qualidade, assim como produtos finais que apresentem propriedades físicas semelhantes às propriedades de peças produzidas pelos processos convencionais de fabricação.

O conceito de materiais compósitos permite romper o paradigma atual destes métodos de fabricação, uma vez que a combinação de um material de reforço ao material utilizado na manufatura aditiva pode tornar o material resultante superior aos materiais inicialmente usados (CALLISTER, 2014).

Os diversos métodos de manufatura aditiva têm sido investigados intensivamente nos últimos anos e, apesar de se tratarem de técnicas modernas e em fase inicial de desenvolvimento, entre os métodos que fazem uso de materiais poliméricos, a baixa resistência mecânica e a baixa densificação são os maiores obstáculos relativos a fabricação de peças a serem superados no momento.

São diversos os métodos de manufatura rápida disponíveis para a criação de protótipos, porém somente alguns permitem a produção de materiais compósitos (LEVY et al., 2003), entre os quais estão:

- **Sinterização/Fusão Seletiva a Laser – SLS/SLM** (*Selective Laser Sintering/Melting*), quando pós cerâmicos (ou ligante entre os pós cerâmicos) são pré-sinterizados por incidência de laser;
- **Conformação Próxima ao Formato Final via Laser – LENS** (*Laser Engineered Net Shaping*), permite a construção de protótipos densos em metal, garantindo boas propriedades metalúrgicas com um tempo de produção razoável. Este processo conta com um pó metálico fornecido coaxialmente por um cabeçote a uma pequena área onde um feixe de raio laser de alta potência promove a fundição deste material;
- **Manufatura de Objetos em Lâminas – LOM** (*Laminated Object Manufacturing*), onde camadas de material em forma de bobinas de papel

laminado com cola ativada por calor são moldadas através de uma sequência de cortes e unidas para formar o objeto desejado;

- **Estereolitografia – SLA** (*Stereolithography*), onde uma plataforma móvel situada imediatamente abaixo da superfície em um reservatório contendo resina foto sensível permite a criação, por camadas, de um protótipo por uma fonte de raio laser ultravioleta, com alta precisão de foco, responsável por solidificar cada seção transversal do modelo, deixando as demais áreas líquidas;
- **Modelagem por Deposição de Material Fundido – FDM** (*Fused Deposition Modeling*), quando ocorre a extrusão em camadas de uma massa cerâmica que contém fase líquida solúvel, que se volatiliza parcialmente entre as deposições, conferindo estabilidade dimensional e adesão com a camada subsequente;
- **Impressão 3D por Jato de Tinta – 3DP** (*Three Dimensional Printing*), que emprega o *spray* de ligante sobre pós-cerâmicos; posteriormente a peça pode ser sinterizada; o método também se aplica à prensagem isostática para melhorar a densificação. (LAOUI et al., 2005);
- **Consolidação Ultrassônica – UC** (*Ultrasonic Consolidation*), que permite a construção de protótipos através da combinação da solda de metais por ultrassom e o fresamento CNC dos materiais indesejados.

Entre os métodos de manufatura aditiva através dos quais a produção de materiais compósitos é viável, é possível citar, como foco deste estudo, o método *Fused Deposition Modeling* (FDM) onde a combinação de vários polímeros com funções distintas pode ser adotada, sendo usados como agentes de adesão, plastificantes e surfactantes, etc.

1.1. Motivação

A busca por métodos de fabricação que permitam a criação de peças em curto espaço de tempo, com baixa incidência de erro e com o menor custo possível é um dos principais objetivos de qualquer indústria e, segundo HEINZL et al. (1985), tais características estão presentes nos métodos de manufatura aditiva, porém o

uso destas tecnologias na produção industrial tem sido pouco frequente devido as propriedades físicas dos objetos produzidos.

O mercado da manufatura aditiva tem crescido assustadoramente, motivado pelo aparecimento de novas aplicações e a popularização das aplicações já existentes (WOHLERS, 2012).

Certamente, o estudo da viabilidade do uso de fibras longas em processos de manufatura aditiva é uma enorme contribuição para a comunidade acadêmica, empresarial e industrial de todo o mundo, permitindo o uso de métodos de manufatura aditiva na produção industrial de peças e produtos, com vantagens financeiras e competitivas.

1.2. Objetivos do trabalho

Este item descreve o objetivo principal e os objetivos específicos deste estudo.

Objetivo principal

- Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de manufatura aditiva.

Objetivos específicos

- Estudo da viabilidade técnica e financeira do desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através dos métodos FDM, SLA, LOM, etc.
- Estudo do desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através do método FDM;
- Validação do novo método de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da criação e avaliação de corpos de prova;
- Adaptação e modificação de uma máquina de manufatura aditiva para automatizar a fabricação de corpos de prova de material compósito.

1.3. Descrição do trabalho

O trabalho inicia-se com uma revisão da literatura realizada no Capítulo 2, abordando o conceito de metodologia de projeto, seguido do conceito de manufatura aditiva, modelos tridimensionais e arquivos STL, uma revisão dos principais métodos de manufatura aditiva, o uso da manufatura aditiva na indústria, o estudo do tema materiais compósitos, assim como o conceito de aditivos e solventes e uma revisão sobre a fabricação de materiais compósitos através dos métodos de manufatura aditiva.

No capítulo 3, Materiais e Métodos, são descritas as etapas do projeto, partindo da identificação da demanda e do estudo da viabilidade técnica do uso de fibras longas em métodos de manufatura aditiva, passando pela descrição da metodologia de criação de corpos de prova através do método escolhido, a execução dos ensaios de tração nos corpos de prova confeccionados, bem como as análises dos resultados relacionados aos corpos de prova produzidos manualmente.

No capítulo 4 são descritas as etapas para a criação de um cabeçote de deposição contínua de fibras longas, desde o projeto conceitual até a obtenção de um equipamento funcional através da fabricação e montagem de cada um dos elementos necessários para o seu funcionamento.

No capítulo 5 são abordadas as etapas necessárias para a criação de corpos de prova através do uso do cabeçote de deposição contínua de fibras longas, a execução do ensaio destes corpos de prova e a análise dos resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são abordados o conceito de metodologia de projeto no item 2.1, o conceito de manufatura aditiva, apresentado no item 2.2, uma revisão dos principais métodos de manufatura aditiva, apresentados no item 2.3, o uso da manufatura aditiva na indústria, apresentado no item 2.4, um estudo do tema materiais compósitos, apresentado no item 2.5 e a finalização do capítulo no item 2.6 com o tema “materiais compósitos e manufatura aditiva”.

2.1. Metodologia de projeto

O processo de criação, adaptação ou alteração de um produto ou serviço, envolve uma necessidade, que é definida como a origem da atividade de projeto (PAHL et al., 2005).

Segundo Lövgren (2002), a metodologia de projeto foi oficializada como campo de estudo e pesquisa a partir da primeira conferência sobre o assunto, ocorrida na cidade de Londres, Inglaterra, em 1962. Porém, a aplicação de seus conceitos na solução de problemas é bem mais antiga e remonta aos tempos de Leonardo da Vinci e aos períodos da segunda guerra mundial.

Também definida como as ações que orientadas convergem para o atendimento das necessidades humanas (BACK, 1985), a atividade de projeto diferencia o projeto de engenharia de outros projetos pelo grau de complexidade com que é aplicada, envolvendo o uso de procedimentos de otimização, decisão e prognósticos.

Com grande significado, a atividade de desenvolvimento de projeto está presente em todas as etapas do ciclo de vida de um produto (Figura 1) (PAHL et al., 2005).

Entre os diversos modelos morfológicos de projeto, a literatura oferece o modelo descrito por Back (1985), o qual sugere a divisão das atividades em: etapas primárias do projeto e etapas relacionadas ao ciclo produção-consumo. As etapas primárias do projeto têm relação com as atividades de viabilidade técnica do produto, concepção, identificação do mercado consumidor, chegando ao detalhamento do projeto. Já as etapas relacionadas ao ciclo produção-consumo

envolvem as atividades relacionadas ao processo de fabricação, os serviços de apoio e o descarte ou reciclagem do produto (Figura 2).

Cada etapa possui sua sequência de desenvolvimento, a qual inclui técnicas e ferramentas. As etapas iniciais dependem da equipe de projeto e marketing, enquanto as etapas seguintes exigem a inclusão de outras equipes, tais como, produção, manufatura, vendas, fornecedores e outros (BACK, 1985).

Figura 1 – Vida de um produto (PAHL, 2005).

Fases do desenvolvimento do produto

- Fase 1 – Inicia com a identificação da necessidade, a qual nasce nas inovações tecnológicas, nos avanços científicos, nos fatores econômicos ou nas oportunidades de mercado, o *estudo de viabilidade*, tem como objetivo visualizar os problemas e limitações do projeto. Uma vez que a necessidade, a viabilidade técnica e a viabilidade financeira tenham sido identificadas, inicia-se o projeto conceitual, o qual, por meio de técnicas e ferramentas, indica as soluções mais adequadas e potencialmente viáveis;
- Fase 2 – Envolve o *projeto preliminar*, onde se estuda a configuração, os parâmetros do projeto e a viabilidade física, as simulações computacionais, as faixas operacionais para os parâmetros estudados e se possível a construção de um protótipo para a validação do projeto;
- Fase 3 – Responsável pelo *detalhamento do projeto*, onde ocorre a seleção dos componentes, as descrições das peças, o dimensionamento de todas as partes e a documentação a partir de desenhos técnicos. Esta fase visa a obtenção de todas as informações necessárias para a fabricação do produto;
- Fase 4 – Através de *revisões e testes*, tem como objetivo a análise dos limites de funcionamento e desempenho do produto para o aprimoramento e retrabalho até que um resultado final satisfatório seja obtido;
- Fase 5 – Nesta fase o processo de *planejamento da produção* do produto é estudado e envolve a participação de equipes de produção, manufatura, fornecedores e outros;
- Fase 6 – Aborda o *planejamento de mercado*, onde a viabilidade comercial e a logística de distribuição são de grande importância;
- Fase 7 – O *planejamento do consumo* complementa o estudo da viabilidade com a coleta de informações no campo para o aperfeiçoamento do projeto;
- Fase 8 – Com forte relação com o ciclo de vida do produto e grau de flexibilidade em sua utilização, o *planejamento da obsolescência* vai ao encontro com a necessidade de planejar a retirada de um produto do mercado, nem sempre devido a desgaste técnico, mas muitas vezes por defasagem tecnológica ou mesmo devido às tendências de mercado.

Figura 2 – Fases do projeto de um produto (BACK, 1985).

Tais fases (Figura 2) podem ser observadas de forma resumida e acompanhadas de considerações comentadas através da Figura 3.

Figura 3 – Atividades de projeto – fases primárias (BACK, 1985).

As diversas particularidades de todo produto estão intimamente ligadas ao formato e atividades do projeto, mas pode observar fases comuns no desenvolvimento da grande maioria dos projetos (BACK, 1985).

Descrita como uma ação complexa, a organização das atividades de projeto depende de uma série de particularidades, entre elas, a filosofia da empresa, o produto a ser projetado, o pessoal envolvido, os custos, os riscos e as incertezas (BAXTER, 1998). Outros fatores de grande benefício para a atividade de projeto são as realimentações e as antecipações, fatores que melhoram o produto, devido a um aprofundamento do conhecimento e da detecção de oportunidades e problemas que muitas vezes acabam despercebidos durante as primeiras etapas do desenvolvimento do projeto.

A Figura 4 mostra as atividades de projeto estruturadas nas diferentes fases de desenvolvimento de um produto.

Figura 4 – Atividades de projeto nas diferentes etapas de desenvolvimento de um produto (BAXTER, 1998).

Baxter (1998) afirma que a configuração do projeto é baseada em quatro fases, o desenvolvimento do projeto inicia com a escolha do conceito e finaliza com o protótipo completamente desenvolvido e testado, o qual compreende quatro fases:

- Geração das ideias, explorando todas as possibilidades da fabricação do produto;
- Seleção das ideias, comparando-se as especificações do projeto, com o objetivo de selecionar-se a melhor entre as opções;
- Análise das possibilidades de falha e seus efeitos, para determinar os possíveis pontos de falha do produto;
- Construção e teste do protótipo, para validar ou invalidar o projeto. (BAXTER, 1998, p. 231).

Segundo Pahl (2005), não existe um modelo único para o projeto do produto. Baseado na análise das atividades de projeto e, suas organizações e métodos mais comuns, o autor propõe três conjuntos de procedimentos e métodos mais comuns, como segue.

- Procedimentos e métodos da engenharia de sistemas: engenharia de sistemas define que um produto é um sistema formado por um conjunto de elementos ordenados e interligados segundo suas características e delimitado pelo seu ambiente de aplicação;
- O método da análise de valor, segundo a DIN 69910 (*Deutsche Ingenieurnormen*). O método de análise de valor tem como objetivo a redução de custos de um produto e, consequentemente, do projeto. Esse método possui uma série de ferramentas e procedimentos de análise contábil, tais como, a base de cálculo dos custos, os métodos de identificação dos custos, a fixação das metas de custos, as regras para minimização dos custos, entre outros;
- Métodos de projeto segundo as diretrizes da VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*). O método de projeto, de acordo com as diretrizes da VDI exhibe em diferentes etapas de um projeto de produto a grande quantidade de métodos de análise. Destacam-se a VDI 2222, que define procedimentos e

métodos no desenvolvimento de novos produtos, e a VDI 2221, Figura 5, que define um procedimento geral, atendendo não apenas a novos produtos, mas a um grande número de aplicações. Esse método tem um papel motivador para o desenvolvimento de um projeto.

Figura 5 – Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto (PAHL, 2005).

Pahl (2005) define que o procedimento geral para o desenvolvimento de um projeto pode ser classificado em quatro fases:

- Planejamento e esclarecimento da tarefa (Fase I). Devido a uma necessidade comercial, tecnológica ou de qualquer outra origem, há o surgimento de um elemento motivador ou demanda por assim dizer, a partir desse dá-se início ao projeto. Essa fase tem como característica a qualificação e quantificação

exata da tarefa em uma lista de requisitos, gerando assim informações, as quais devem ser atualizadas durante todo o projeto;

- Concepção (Fase II). Fase responsável por uma geração de possíveis soluções de projeto, soluções que devem preencher a lista de requisitos exigidos na fase anterior. Tendo em vista que pode haver mais de uma solução que satisfaça a lista de requisitos, torna-se necessário, em casos como este, a geração de novos critérios de seleção.
- Anteprojeto (Fase III). Uma vez que uma solução venha a atender a lista de requisitos e alguns critérios de seleção, o anteprojeto avança na especificação técnica e econômica da solução selecionada;
- Detalhamento (Fase IV). Nesta fase, partindo da solução adotada, define-se entre outros, a forma, as dimensões e os componentes que formam o produto, assim como o custo envolvido. O detalhamento deve conter informações suficientes para se construir um protótipo.

Descreve-se cada etapa do trabalho por diferentes métodos, tais como, os métodos para o planejamento, a busca e a avaliação da solução, os métodos para a concepção, os métodos para o anteprojeto, os métodos para o detalhamento, os métodos para o desenvolvimento de produtos em série e modulares e os métodos para o desenvolvimento de produtos com garantia de qualidade, entre outros. Os métodos citados são ferramentas de geração de ideias, conceitos e tomada de decisão (PAHL, 2005).

De suma importância para o sucesso do projeto, as ferramentas de tomada de decisão são cruciais tanto nas fases de planejamento quanto na fase de execução do projeto. Estudos revelam que ao aplicar estudos de viabilidade técnica e econômica antes do desenvolvimento de um produto, as chances de sucesso aumentam até 2,4 vezes, nesta mesma direção, produtos bem dimensionados tem um aumento de 3,3 vezes em suas chances de sucesso (BAXTER, 1998).

Baxter (1998) descreve o funil de decisões como uma das ferramentas usadas durante o desenvolvimento qualitativo do projeto de um produto. Esta ferramenta é uma ordenação do processo de tomada de decisões que visa minimizar as incertezas e os riscos de fracasso durante o desenvolvimento do projeto (Figura 6).

Figura 6 – Funil de decisões (BAXTER, 1998).

Um produto deve satisfazer as exigências do consumidor, assim como se diferenciar dos demais produtos existentes no mercado (BAXTER, 1998).

O projeto conceitual é a etapa responsável por desenvolver as linhas básicas de forma e função do produto, é onde se originam os elementos de diferenciação do produto, onde o uso de técnicas de criatividade é fundamental para o sucesso do projeto e por consequência para o sucesso do produto.

Dentre as ferramentas presentes nas diversas fases do processo criativo estão:

- Análise paramétrica, ferramenta que compara as características de produtos em desenvolvimento com as características de produtos já existentes;
- Análise do problema, ferramenta que organiza os questionamentos sucessivos com o objetivo de explorar o elemento motivador do projeto;

- Anotações coletivas e estímulo grupal, com diferenças operacionais entre si, que podem ser resumidos como procedimentos em que um grupo de pessoas anota suas ideias sobre o tema proposto.

A Figura 7 mostra as relações de algumas ferramentas existentes e suas respectivas atividades de projeto:

Figura 7 – Correlação entre atividades de projeto e possíveis ferramentas a serem utilizadas (BAXTER, 1998).

Entre as técnicas de geração de ideias, cujo objetivo é a redução, a expansão ou a digressão do elemento motivador do projeto, destacam-se as que se seguem.

- Análise das funções, onde as funções principais e secundárias do produto são listadas, interferindo diretamente na sua forma final;
- Análise das características, que recombina as características de produtos já existentes por meio de permutação e da alteração da forma final do produto;
- Sequência de ações, modificar, eliminar, substituir, combinar, rearranjar, adaptar e inverter (MESCRAI) tem o intuito de verificar possíveis alterações e/ou diferenciações de um produto já existente;
- Análise morfológica, que vislumbra as possíveis soluções para a combinação entre as características do produto. Dentre as possíveis soluções podem existir diversas opções para uma mesma característica de projeto. Pahl (2005) sugere que a maior vantagem dessa técnica é a visão geral que se tem das possíveis combinações de soluções (Figura 8). A decisão sobre qual solução deve-se adotar envolve vários fatores, tais como, os fatores econômicos, os fatores técnicos, os fatores ambientais, entre outros. No entanto, existem ferramentas que auxiliam essa tomada de decisão, como o funil de decisões;
- Analogias e metáforas, que correlaciona produtos diferentes, mas com algumas características similares;
- Clichês e provérbios, que usa ditos populares como orientadores na obtenção de soluções.

A FISP (Fases Integradas da Solução de Problemas) é a última ferramenta útil no desenvolvimento de projeto, estudada por Baxter (1998) avalia a eficiência das técnicas aplicadas anteriormente.

Pode-se dizer que a metodologia de projeto é uma sistematização de procedimentos executada durante o desenvolvimento de um projeto. De caráter benéfico, a sistematização não reprime a intuição ou a criatividade, mas organiza grupos de atividades, dentro dos quais, não existem fronteiras para o desenvolvimento. Segundo Pahl (2005) os procedimentos podem ser entendidos

como as ferramentas de tomada de decisão, solução de problemas, documentação, monitoramento, etc.

Segundo Rozenfeld (2008), para que sejam atingidos os objetivos assumidos em um projeto, existe a necessidade de uma visão integrada de todos os fatores envolvidos, visão esta, que o gerenciamento de projetos oferece, juntamente com uma variedade de ferramentas e técnicas, possibilitando assim, atingir-se os objetivos propostos e planejados.

Dentre as ferramentas que o gerenciamento de projeto oferece, devido a sua grande aplicação, pode-se destacar a rede de precedência, na qual, as atividades de projeto são cronologicamente organizadas, de modo eficiente e racional.

Figura 8 – Quadro morfológico (PAHL, 2005).

2.2. Manufatura aditiva

O termo prototipagem rápida (RP) é usado na indústria para descrever processos de fabricação de sistemas ou de representações parciais antes de seu lançamento final ou de sua comercialização, ou seja, processos de fabricação que possibilitem a rápida criação de um modelo básico ou de um protótipo a partir do qual novos modelos e o próprio produto final serão derivados (GIBSON, 2010).

Segundo Ferreira (2001), as tecnologias de prototipagem rápida são divididas em duas grandes categorias, os métodos de remoção de material e os métodos de adição de material das quais são ramificadas todas as outras categorias (Figura 9), a primeira, chamada de prototipagem rápida subtrativa (SRP), consiste no desbaste de blocos de materiais diversos, enquanto a segunda, chamada de prototipagem rápida aditiva (ARP), também conhecida como manufatura aditiva, consiste na obtenção de objetos através da adição e união de diversas camadas de materiais.

A principal diferença entre as duas grandes categorias de prototipagem rápida está no princípio físico de construção do protótipo, sendo ambas semelhantes quanto ao aspecto computacional, o qual é dividido em três fases: pré-processamento, processamento do protótipo e pós-processamento (WOZNY, 1997). Tais fases envolvem o preparo e a criação de modelos tridimensionais digitais, a criação de modelos físicos a partir dos modelos tridimensionais digitais e a finalização, limpeza, acabamento e reforço do objeto físico criado.

Figura 9 – Tecnologias associadas à prototipagem rápida (PHAM, 1998).

A manufatura aditiva, termo que atualmente vem substituindo o termo prototipagem rápida, define métodos inovadores de fabricação que reduzem consideravelmente o tempo de manufatura de modelos e de partes de protótipos e a

taxa de erro no processo produtivo, mas que também oferecem desvantagens, entre as quais estão a limitação do volume do objeto a ser fabricado, o qual depende do volume disponível pelo equipamento, a pouca diversidade de materiais a serem usados e as baixas propriedades físicas obtidas pelos objetos criados pela maioria dos métodos presentes nesta categoria.

Pode-se entender que um método de manufatura aditiva seja o resultado de um processo de fabricação usado para gerar objetos físicos partindo de fontes de dados digitais, onde os objetos desejados são obtidos através da adição e união de diversos materiais em camadas (Figura 10).

O termo manufatura aditiva define então um conjunto de tecnologias usadas para a fabricação de objetos físicos a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador. Tais métodos são bastante peculiares, uma vez que agregam e ligam materiais, camada a camada, de forma a construir tridimensionalmente o objeto desejado. Eles oferecem diversas vantagens em muitas aplicações quando comparados aos processos de fabricação clássicos baseados em remoção de material, tais como o fresamento ou torneamento, permitindo, na grande maioria das vezes, que os objetos desejados sejam feitos com menor custo e em menor tempo. De fato, estima-se que a economia de tempo e de custos proporcionada pela aplicação das técnicas de prototipagem rápida na construção de modelos seja da ordem de 70 a 90% (CARVALHO, 2007).

Figura 10 – Representação das principais etapas do processo de manufatura por camada (CARVALHO, 2007).

Os métodos de manufatura aditiva, em sua grande maioria, são descritos através dos seguintes passos:

- **Passo 1** – Criação de um modelo tridimensional (CAD) do objeto a ser fabricado, projetado através de programas de computador especializados neste tipo de tarefa;
- **Passo 2** – Conversão do arquivo CAD gerado para o formato utilizado por máquinas de manufatura aditiva (STL);
- **Passo 3** – Fatiamento do modelo tridimensional gerado, criando-se a representação das diversas camadas finas em desenhos de duas dimensões (2D), com aproximadamente 0,1 mm de espessura, transversais e que dispostas umas sobre as outras podem recriar o objeto desejado;
- **Passo 4** – Criação do objeto a ser fabricado em material sólido através de um processo chamado “aditivo”, onde se combinam camadas de papel, cera, plástico, cerâmica ou mesmo metal, correspondentes às fatias previamente obtidas pelo fatiamento do modelo tridimensional gerado.
- **Passo 5** – Execução da limpeza e acabamento do objeto criado.

2.2.1. Modelos tridimensionais CAD

A criação de modelos tridimensionais (Figura 11) consiste no preparo de objetos através de programas de computador (CAD) dedicados a assistir a criação de projetos e/ou desenhos com ferramentas direcionadas para este tipo de atividade, entre os quais alguns exemplos são o AutoCad, o SolidEdge, o SolidWorks e o 3D Studio Max.

Segundo YAN et al. (1996), o uso de programas de computador voltados a assistência de criação de projetos e desenhos (CAD) tem aperfeiçoado o projeto e a fabricação tradicional através do desenvolvimento das tecnologias de manufatura aditiva.

Os modelos sólidos gerados pelos atuais métodos computacionais constituem uma excelente ferramenta de auxílio visual de grande importância durante o processo de desenvolvimento de um projeto, além de permitir a elaboração de testes e ensaios prévios.

Na indústria, três tipos de abordagens são muito utilizadas através dos modelos tridimensionais, o Projeto Assistido por Computador ou *Computer Aided Design* (CAD), que é um termo que resume a criação e modificação de tais modelos, a Engenharia Auxiliada por Computador ou *Computer Aided Engineering* (CAE) que permite a análise e otimização dos modelos criados através das ferramentas CAD e a Manufatura Auxiliada por Computador ou *Computer Aided Manufacturing* (CAM), que envolve a utilização de sistemas computacionais nas tarefas de planejamento, gerenciamento e controle da manufatura destes modelos. Como benefícios de seu uso concomitante, podem ser citadas: a boa integração do projeto e sua respectiva fabricação e a redução de tempo entre o projeto e a fabricação de um protótipo.

Figura 11 – Modelo sólido em CAD 3D.

2.2.2. Representação de modelos tridimensionais em STL

Em uma representação de modelos tridimensionais no formato STL tem-se a união de tetraedros que relacionados entre si geram uma aproximação do objeto original. Na representação em STL de sólidos simples todas as superfícies de limite são planas e as facetas triangulares representam exatamente o objeto, já para modelos com superfícies curvas, como superfícies cônicas e linhas irregulares a representação em STL pode apenas gerar uma aproximação do modelo original.

Neste caso, para alcançar um nível maior de precisão, é necessária a aplicação de uma trama mais densa de facetas triangulares (Figura 12).

Figura 12 – Modelo sólido em CAD 3D convertido para representação STL.

A especificação do formato STL recomenda ordenar as facetas triangulares pelo valor de z , do mais baixo para o mais alto, com o objetivo de acelerar o tempo de processamento, mas isto é opcional. Nos modelos STL, embora sejam espacialmente relacionadas, as facetas triangulares são tratadas como independentes umas das outras, o mesmo vértice é repetido tantas vezes quanto o número de facetas que compartilha. Em termos de tamanho de arquivo e velocidade de processamento, o formato STL é ineficiente; a eficiência de análise dos modelos STL pode ser dramaticamente melhorada organizando as facetas para representar explicitamente as relações de topologia entre os vértices, arestas e facetas.

No formato STL, cada faceta triangular é definida pelas coordenadas x , y , z de seus três vértices, somados os três componentes de suas unidades de direção normal. Uma faceta normal ou vértice é usado para distinguir o interior do exterior do objeto, os pontos normais são dispostos a certa distância do objeto e a ordem dos vértices segue a regra de mão direita em relação à normal. Embora a informação da faceta normal seja redundante é conveniente seu uso desde que possa ser processada a partir dos vértices. Outra regra para a criação de arquivos STL é a regra do vértice por vértice, onde cada faceta compartilha dois vértices comuns com

cada uma das facetas adjacentes; em outras palavras, cada faceta triangular tem exatamente três outras facetas triangulares adjacentes que compartilham respectivamente suas três arestas; isto garante uma superfície interligada e de volume fechado.

O formato de um arquivo STL é definido em dois formatos, no formato ASCII e no formato binário. No formato binário, os pontos são representados por números inteiros e flutuantes de quatro em quatro *bytes* de acordo com o padrão IEEE. Apesar de não ser padrão em todas as plataformas de computador, é comum que o *byte* mais significativo esteja posicionado no endereço mais alto do arquivo, porém a ordem do *byte* tem de ser trocada quando necessário (3D SYSTEMS, INC, 1988).

2.3. Principais métodos de manufatura aditiva

Segundo VOLPATO et al. (2007), atualmente existem diversos métodos de prototipagem rápida disponíveis comercialmente, entre os quais os de maior uso são:

- Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM, *Laminated Object Manufacturing*);
- Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM, *Fused Deposition Modeling*);
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS, *Selective Laser Sintering*);
- Impressão 3D por Jato de Tinta (MJT, *Multi Jet Modeling*; BPM, *Ballistic Particle Manufacturing*).
- Estereolitografia (SLA, *Stereolithography*);
- Cura de Base Sólida (SGC, *Solid Ground Curing*);
- Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS, *Laser Engineered Net Shaping*);

2.3.1. Manufatura de objetos em lâminas (LOM)

Segundo Grimm (2005), neste método a fabricação do protótipo é feita através de dois rolos que trabalham em conjunto, um responsável por fornecer material na forma de papel laminado e outro responsável por recolher a sobra de

material não utilizado. O papel possui uma superfície de adesivo ativado pelo calor (Figura 13).

Figura 13 – Princípio do processo LOM. Adaptado de HOPKINSON et al. (2006).

Durante o processo o rolo de fornecimento de material conduz uma porção de papel que se encontra sobre uma base feita de papel e espuma que, se encontra sobre a plataforma do equipamento. Em seguida um rolo aquecido, responsável por garantir a adesão das camadas, pressiona o papel sobre a base. Em um próximo passo o material é cortado respeitando o desenho bidimensional da camada a ser fabricada. Vale ressaltar que essa etapa pode ser promovida por qualquer ferramenta de corte, sendo que atualmente o uso de fontes de laser de alta precisão este bastante difundido. Ainda nessa etapa, toda a área do material que não representa o perfil bidimensional da camada a ser fabricada é retalhado em uma padrão quadriculado para torná-lo em fácil de remover. Uma vez concluída a fabricação da camada, a plataforma é abaixada e uma nova camada é aplicada, dando início a um novo ciclo do processo de fabricação, repetido até que a fabricação do protótipo tenha sido concluída, sendo a textura da superfície semelhante à da madeira. Tendo sido fabricado em papel, o protótipo precisa ainda ser selado e revestido com verniz ou tinta para garantir sua resistência à umidade e conservação.

Estudos atuais demonstram grande interesse no uso de novos tipos de materiais como plásticos, pós de materiais cerâmicos e metálicos, assim como o uso de materiais fibrosos, porém o tratamento aplicado à peça verde envolve passos como a sinterização através do aquecimento em fornos.

2.3.2. Modelagem por deposição de material fundido (FDM)

Como é ilustrado na Figura 14, este método aplica pequenas porções de um termoplástico de forma planejada através de um sistema cartesiano (X e Y) sobre uma plataforma de fabricação que também possui um grau de movimentação (Z). Para isto o termoplástico é aquecido e expelido através de um bico de extrusão (BARNATT, 2013).

Podendo ser comparado ao processo de criação de enfeites para confeitos, onde um saco de confeitaria com furo circular, o bico de extrusão garante a deposição de finos filamentos que são posicionados sobre a plataforma de fabricação ou sobre camadas previamente fabricadas.

Durante o processo, a plataforma é mantida a uma temperatura inferior à temperatura do material, favorecendo assim o resfriamento e endurecimento do material depositado e o material é depositado de forma a reproduzir os desenhos bidimensionais referentes às camadas do objeto desejado até que todo o objeto seja fabricado.

Figura 14 – Princípio do processo FDM (VOLPATO, 2007).

No início da fabricação de um protótipo ou mesmo durante o processo de fabricação, quando necessário, um segundo material, mais fraco, é usado para criar suportes de fácil remoção que impedem que o protótipo fabricado tenha qualquer variação em sua geometria.

Entre as resinas termoplásticas estão o poliéster, o polipropileno, o acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), elastômero e ceras (VOLPATO, 2007).

Ainda entre os materiais usados atualmente neste processo estão o políácido láctico (PLA), o policarbonato (PC), o policarbonato de grau médico (PC-ISO), a polifenilsulfona (PPSF), misturas entre termoplásticos, misturas de termoplásticos com madeira em pó e outras misturas de termoplásticos com materiais fibrosos picados.

Segundo Noorani (2006), entre as principais vantagens deste processo estão a não necessidade de pós-processamento químico, a não necessidade de cura e menor custo dos equipamentos e matéria prima, o que resulta em substancial economia de tempo e recursos.

Porém, entre as desvantagens estão a baixa qualidade superficial e a necessidade de grandes intervalos de tempo para a fabricação de peças grandes.

Para poupar tempo e custo, mas obviamente reduzindo as propriedades mecânicas, podem-se fabricar protótipos com o interior com baixa densidade, através de artifícios geométricos de deposição de material (MORVAN et al. 2005).

2.3.3. Sinterização seletiva a laser (SLS)

Esse método de manufatura aditiva, patenteado em 1989, permite a criação de protótipos sólidos através de sinterização de materiais em pó que possam ser fundidos por calor, entre eles, o nylon, elastômeros e metais.

A SLS depende de duas ou três plataformas móveis dentro de dois ou três recipientes. A primeira, chamada de plataforma de fabricação, inicia o seu trabalho no mesmo nível da mesa principal da máquina e ao se deslocar aproximadamente 150µm para baixo abre espaço para que o material conduzido pelas(s) outra(a) plataforma(s) seja distribuído através de um rolo de deposição de pó. Uma vez que uma camada de pó virgem está sobre a plataforma de fabricação, um sistema de movimentação mecânica com 2 graus de liberdade (X e Y) onde está fixado um laser se desloca sobre ela sinterizando o pó no formato bidimensional representando a

camada a ser fabricada. À partir de então um novo ciclo de trabalho é feito repetindo os passos descritos até que todo o protótipo seja fabricado, como é ilustrado na Figura 15 (SELLS, 2009). Neste processo, a função de suporte é exercida em parte pelo excesso de pó.

Figura 15 – Princípio do processo SLS. Adaptado de SELLS (2009).

2.3.4. Impressão 3D por jato de tinta

A impressão 3D é um processo inovador de manufatura aditiva que tornou consideravelmente menor o tempo de manufatura das partes de um protótipo e da fabricação de ferramentas de máquinas. A fabricação de protótipos, no passado, envolveu excessivas horas de máquinas, tempo despendido com passos lentos e um alto custo de fabricação. Atualmente as impressoras tridimensionais realizam em um único passo, em tempo reduzido e a um custo mais baixo, o que revolucionou a prototipagem e a manufatura (HEINZL; HERTZ, 1985).

Segundo Gorni 2001, o processo de impressão tridimensional engloba a fabricação de uma peça a partir de um modelo digital tridimensional em CAD. Este modelo é então dividido em camadas por um algoritmo de fatiamento, onde cada fatia possui aproximadamente 150µm de espessura, criando assim informações detalhadas sobre cada corte transversal. A máquina de impressão tridimensional inicia o processo de construção de peça depositando uma camada de pó, sobre a

qual o fluido ligante é depositado na forma da seção da peça, representando a fatia inicial do modelo, muito parecido com uma impressora de jato de tinta quando imprime em uma folha de papel. A camada de pó é então baixada, e uma nova camada de pó é depositada sobre a primeira camada e novamente o fluido ligante é depositado, compondo a fatia seguinte do modelo que se consolida com a anterior através do ligante. Esse processo é repetido para todas as camadas da peça até que ela seja impressa por completo. Uma vez a peça impressa totalmente, o pó que não recebeu fluido ligante é removido, a peça é então limpa e o protótipo está pronto. Neste método podem ser usados pós de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos (Figura 16). Havendo a necessidade de agregar maior resistência mecânica à peça, ela pode, após o término do processo, ser sinterizada e/ou reforçada com outros materiais. A impressão tridimensional tem como vantagem adicional sobre a maioria dos processos de prototipagem a não necessidade de imprimir o material suporte, pois o próprio pó sem ligante suporta a peça em impressão. O pó (suporte) é removido, peneirado e seco, e pode então ser reutilizado (SELLS, 2009).

Figura 16 – Princípio do processo 3DP. Adaptado de SELLS (2009).

2.3.5. Estereolitografia (SLA)

Patenteado em 1986, foi considerado pioneiro entre os métodos de manufatura aditiva, tornou-se um padrão de avaliação entre os métodos de

prototipagem rápida que surgiram após o seu desenvolvimento. Segundo Barnatt (2013), a construção dos modelos sólidos por esse método se faz a partir de polímeros no formato líquido, sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta (Figura 17).

Neste método uma plataforma móvel é montada dentro de um reservatório preenchido com resina epóxi ou acrílica e posicionada logo abaixo da superfície permanecendo sobre ela uma camada de aproximadamente 150µm de resina, um raio laser ultravioleta de alta precisão traça o desenho bidimensional relativo à primeira fatia solidificando a seção transversal desta e deixando as demais partes líquidas, a plataforma mergulha no recipiente, expondo uma nova camada de resina e permitindo que o laser solidifique a segunda camada acima da primeira, sendo repetido até que todas as fatias do objeto sejam criadas. Por fim, o modelo sólido é removido e lavado, os suportes são retirados e a peça pronta é colocada em um forno para a cura completa (SELLS, 2009).

Figura 17 – Princípio do processo SLA. Adaptado de SELLS (2009)

2.3.6. Digital Light Projection (DLP)

Processo conhecido como Projeção de Máscara faz uso de padrões bidimensionais, de luz ultravioleta, projetados sob uma plataforma contendo resina fotossensível sobre a sua superfície, a qual se encontra dentro de um recipiente

cheio da mesma resina, muito semelhante ao método Estereolitografia (SLA), normalmente utiliza acrilatos como material para a construção do objeto, promovendo a polimerização e solidificação de cada camada através da luz ultravioleta projetada (Figura 18).

Mesmo possuindo grande semelhança com o método SLA, o método DLP tem como grande diferença a velocidade de fabricação, uma vez que a fonte de luz UV, responsável por polimerizar a resina foto sensível, é projetada sobre a plataforma de fabricação em um único passo através de padrões bidimensionais que representam as camadas do objeto a ser fabricado, enquanto que no método SLA utiliza-se uma fonte de laser, que é projetada sequencialmente até percorrer todo o perfil bidimensional da camada a ser fabricada.

Através desta tecnologia é possível a fabricação de peças com bom acabamento superficial e elevada precisão, o que motivou a atenção da indústria da saúde, permitindo a fabricação de produtos funcionais de pequenas dimensões, como carcaças de aparelhos auditivos e moldes de próteses dentárias. Entre os equipamentos que fazem uso desta tecnologia, o primeiro a ser comercializado foi lançado em 2003 pela empresa Envision Tec, da Alemanha, com o nome comercial de Perfactory (HOPKINSON e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Figura 18 – Princípio do processo DLP. Adaptado de HOPKINSON et al. (2006).

2.3.7. Cura de base sólida (SGC)

Muito semelhante a Estereolitografia (SLA), este processo também faz o uso de radiação ultravioleta para tornar sólidos polímeros sensíveis à luz, porém diferente do método Estereolitografia (SLA), neste processo toda uma camada é curada em um único passo e isto é possível através do uso de foto-máscaras impressas em placas de vidro e colocadas acima da plataforma de construção que permitem a passagem da radiação ultravioleta somente através de regiões previamente estabelecidas, ou seja, somente nas áreas que representam o perfil bidimensional de cada camada a ser fabricada, permitindo o endurecimento destas áreas irradiadas por UV. Uma vez concluída esta etapa, a máquina remove através de vácuo o excesso da resina líquida; cera é borrifada em seu lugar para servir de suporte ao objeto durante sua construção. O processo é repetido até obter-se o objeto desejado, quando então a peça pronta é mergulhada em um banho de solvente, para remover a cera presente. Este método é usado em máquinas de grande porte permitindo a criação de modelos de grandes dimensões (Figura 19).

Figura 19 – Princípio do processo SGC. Adaptado de WIKIPEDIA (2013).

2.3.8. Conformação próxima ao formato final via laser (LENS)

Segundo Volpato (2007), através deste método é possível a fabricação de objetos metálicos com boas propriedades metalúrgicas e com densidade semelhante a densidade de objetos obtidos através dos métodos tradicionais de fabricação. Neste método, um pó metálico usado como material para deposição é fundido através de um laser de alta potência, focado em um pequeno ponto dentro de um cabeçote com um grau de liberdade de movimentação (Z), transformando o pó metálico em um material viscoso que é depositado sobre uma plataforma cartesiana (X e Y), onde o perfil bidimensional da camada é criado. Uma vez que uma camada é concluída, o cabeçote é posicionado a aproximadamente 150 μ m da plataforma e um ciclo se inicia, sendo repetido até que o objeto desejado seja concluído. A distribuição do pó metálico é feita por gravidade através do cabeçote ou a partir de um gás inerte pressurizado que neste caso é fornecido constantemente, com o objetivo de garantir as propriedades metalúrgicas e promover melhor adesão entre as camadas. Pós de diversas ligas metálicas podem ser usados, tais como aço inoxidável, inconel, cobre, alumínio e titânio. A potência do gerador de raio laser varia conforme o material usado. Uma vez concluídos, os protótipos requerem usinagem para acabamento, mas apresentam densidade plena, boa microestrutura e propriedades similares ou melhores ao metal convencional (Figura 20).

Figura 20 – Princípio do processo LENS (VOLPATO, 2007).

2.4. A manufatura aditiva na indústria

Mesmo com todas as vantagens oferecidas pelos novos métodos de fabricação de peças desenvolvidos, as primeiras versões dos equipamentos de manufatura aditiva tiveram pouca aceitação no mercado devido ao alto custo de tais equipamentos, tornando tais tecnologias acessíveis apenas a grandes empresas que possuíam recursos financeiros para investir nesta área.

Com a concorrência entre os fabricantes de equipamentos e a evolução da tecnologia, novas alternativas, mais rápidas, simples, menores e com custos mais acessíveis foram desenvolvidas e possibilitaram a aplicação da manufatura aditiva na indústria, desde as etapas de projeto e desenvolvimento de produto, até as etapas de fabricação.

Tendo em vista que esta tecnologia está entre as 10 melhores tecnologias que irão transformar o mundo na próxima década (HYMAN, 2011) e que atualmente a manufatura aditiva é uma das sete inovações mais importantes na indústria (SUNG-WON, 2013), diversas áreas industriais atualmente empregam sistemas de manufatura aditiva para diversas aplicações. A Figura 21 ilustra a distribuição de cada área no cenário mundial em 2008, entre as diversas áreas que faziam uso de tecnologias de manufatura aditiva estão a indústria de produtos de consumo e eletrônicos, a indústria de ferramentaria e fabricação de peças, a indústria aeroespacial e automotiva, a indústria de construção civil e arquitetura, a indústria militar, instituições acadêmicas, a área médica e odontológica, entre outras (WOHLERS, 2008).

Figura 21 – Gráfico de participação das áreas que utilizam a manufatura aditiva (WOHLERS, 2008).

Quando os primeiros anos do mercado de manufatura aditiva são comparados com os primeiros anos do mercado de máquinas CNC, nota-se um crescimento muito maior na área de manufatura aditiva. Tendo em vista que os equipamentos CNC inicialmente foram usados em aplicações de prototipagem e evoluíram para aplicações de manufatura especializada, acredita-se que o mesmo ocorrerá com os equipamentos de manufatura aditiva.

Um das áreas onde o uso da manufatura aditiva dentro da indústria vem se consolidando é a área de projeto e desenvolvimento de produtos e o tempo gasto na tomada de decisões em projetos pode ter diferenças enormes quanto à escolha dos recursos a serem utilizados ao longo do desenvolvimento deste, a aplicação de modelos bidimensionais (2D), tridimensionais (3D) e modelos criados por métodos de manufatura aditiva oferecem tempos de resposta bem distintos e demonstra claramente a necessidade da aplicação desta tecnologia dentre das indústrias (Figura 22).

Figura 22 – Comparação entre tempo de comunicação na fase de projeto utilizando desenhos 2D, modelos CAD 3D e protótipos físicos (VOLPATO, 2007).

Entre os recursos da manufatura aditiva empregados na indústria estão equipamentos capazes de fabricar objetos com funcionalidade limitada ou objetos usados em processos secundários, como a criação de moldes para a elaboração de um produto final, porém a aquisição de um equipamento deste tipo envolve, como fatores limitantes, o preço e a variedade de materiais e a necessidade de capacitação de operadores, porém são diversos os benefícios em relação às técnicas tradicionais, entre os quais está a capacidade de criação de diversos objetos, com diferentes geometrias, sem a necessidade da troca de ferramentas ou da execução de etapas adicionais em outras máquinas, permitindo a produção em lote e encaixando-se perfeitamente em produções de baixo volume e de peças especializadas, prometendo ser uma área que crescerá rapidamente nos próximos anos com o desenvolvimento de novos materiais.

O uso de tecnologias de manufatura aditiva na indústria encontra-se em uma fase de grandes mudanças, embora em todo o mundo tais tecnologias tenham sido adotadas nas etapas de desenvolvimento do produto, ainda há muito a melhorar para chegar a sua plena maturidade, o desenvolvimento de novos processos e de novos materiais possibilitará a adoção destas tecnologias diretamente no processo produtivo industrial.

2.5. Materiais compósitos

Segundo Callister (2014), materiais compósitos também conhecidos como materiais compostos ou materiais conjugados são materiais multifase em que a combinação das propriedades físicas de cada uma das fases torna o material resultante superior a cada uma das fases iniciais.

Reinhart & Clements (1987) definem que a combinação de dois ou mais materiais deve ocorrer em escala macroscópica e deve haver uma interface reconhecível entre eles.

Tais materiais são obtidos pela combinação de dois ou mais materiais com o objetivo de obter as melhores propriedades de cada material envolvido, resultando em materiais conhecidos pela alta rigidez estrutural e o baixo peso (CARVALHO, 1996).

O material obtido a partir da combinação de dois ou mais materiais passa a possuir características e propriedades particulares e isto pode ser observado através de materiais compósitos reforçados por fibras ou MCRF.

As fibras, sozinhas, apresentam uma baixa resistência mecânica no sentido transversal e unidas a uma matriz adicionam alta resistência à tração ao produto final, enquanto a matriz sozinha, constituída de material polimérico resinoso, oferece baixa resistência mecânica, mas unido às fibras preenchem todo espaço vazio entre as mesmas, permitindo uma fácil moldagem e apresenta alta resistência a oxidação.

Entre os constituintes de um material compósito estão o reforço, a matriz e a interface entre ambos os materiais, onde o reforço é responsável por suportar os carregamentos transmitidos pelo material matriz devido a interação proporcionada pela interface entre os dois elementos.

2.5.1. Materiais de reforço

Os materiais de reforço, também conhecidos como componentes estruturais de um material compósito, podem ser classificados quanto à natureza, em materiais orgânicos ou inorgânicos (metálico ou cerâmico), quanto à forma, em regulares e irregulares, quanto à densidade de fibra, em fibrosos (tecido ou não tecido) e pulverulentos (esférico ou cristalino), quanto à dimensão de fibra, em fragmentos achatados (como flocos) e em fibras muito curtas e ainda quanto às dimensões em

uma escala molecular em quase moleculares e de material monocristalino (*whiskers*).

Segundo Matthews & Raulings (1994), os compósitos podem ser classificados conforme a geometria dos seus componentes estruturais, sendo separados em compósitos reforçados por partículas e compósitos reforçados por fibras (Figura 23).

Figura 23 – Organograma de classificação dos materiais compósitos. (MATTHEWS & RAWLINGS, 1994).

Entre as características que influenciam fortemente as propriedades físicas de um material compósito estão a distribuição, a orientação, a proporção, a interação e as propriedades físicas dos seus constituintes. Em especial a forma de distribuição do material de reforço pode apresentar diversas configurações, conforme é apresentado na Figura 24 (AGARWAL & BROUTMAN, 1990).

Figura 24 – Exemplos de compósitos reforçados: (a) por partículas aleatórias; (b) por fibras descontínuas unidirecionais; (c) por fibras descontínuas aleatórias; (d) por fibras contínuas unidirecionais (MATTHEWS & RAWLINGS, 1994).

2.5.1.1. Partículas

As partículas, usadas como reforços no projeto de materiais compósitos, apresentam-se como partículas descontínuas, as quais possuem dimensões aproximadamente iguais em todas as direções e seu arranjo pode ser orientado ou aleatório.

Visto que as propriedades mecânicas pouco variam nas diferentes escolhas de tipo de arranjo, a orientação das partículas na maioria dos compósitos reforçados por partículas é aleatória.

2.5.1.2. Fibras

Segundo Callister (2014), as fibras são obtidas a partir da conformação de materiais brutos através do processo de estiramento, resultando em um material com uma melhor resistência mecânica.

Entre as diversas fibras utilizadas para a elaboração de materiais compósitos estão a fibra de vidro, a fibra de aramida e a fibra de carbono, sendo cada uma delas dotada de características próprias de resistência à tração, densidade, condutividade térmica, entre outras, podendo ainda ocorrer derivações, como a fibra de carbono que pode ser obtida por diversos processos, como derivados de piche, rayon e poliacrilonitrila (PAN).

Os reforços de fibra de camada única, usados no projeto de materiais compósitos, apresentam-se em duas formas distintas, fibras descontínuadas e fibras contínuas. As duas formas possuem a mesma função no projeto de materiais compósitos, suportar os esforços provenientes da matriz, mas cada uma das duas formas influencia de forma distinta no desempenho mecânico do material obtido (MATTHEWS & RAWLINGS, 1994).

Em compósitos de camada única, reforçados por fibras contínuas, as quais podem ser unidirecionais ou bidirecionais, o uso de um ou de outro tipo de orientação pode influenciar nas propriedades mecânicas do material obtido.

A resistência obtida em compósitos reforçados por fibras contínuas alinhadas é máxima na direção do alinhamento e mínima na direção perpendicular ao alinhamento, enquanto compósitos reforçados por laminas de fibras descontínuas com arranjo orientado ou aleatório podem apresentar resistência significativa e semelhante em ambas às direções.

Entre os fatores importantes no projeto de compósitos estão o comprimento, a orientação e a fração volumétrica das fibras, sendo os dois últimos capazes de influenciar de forma significativa as propriedades dos MCRF, porém é possível citar ainda o módulo de elasticidade, decisivo na escolha do tipo de fibra adequado.

Entre as fibras adotadas com mais frequência no desenvolvimento de produtos baseados em materiais compósitos estão a fibra de vidro, que constitui um dos principais materiais de reforço para matrizes poliméricas e a fibra de carbono, com uma maior custo agregado, mas com propriedades mecânicas excelentes.

- **Fibras de vidro:** considerado um dos principais materiais de reforço para matrizes poliméricas, por possuir boa resistência química, baixo custo e por permitir o aumento da resistência mecânica através da manipulação dos seus constituintes, é usada em vários segmentos da indústria, desde a indústria civil, indústria automobilística, aeronáutica, naval, até a indústria de embalagens. Na composição deste tipo de fibra estão a base de silicato, os silanos ou agentes de acoplamento, que compatibilizam a fibra com diversos tipos de matrizes, e os agentes de modificação, usados para a redução da temperatura do ponto de viscosidade ideal. Entre as vantagens do uso da fibra de vidro estão o baixo custo em comparação com as demais fibras

disponíveis no mercado, a alta resistência mecânica e química e a nacionalização do produto.

- **Fibras de carbono:** Devido às altas propriedades mecânicas de rigidez e resistência, baixo peso e boa compatibilidade com outros materiais vêm sendo cada vez mais utilizadas, na indústria aeroespacial e automotiva ou mesmo na fabricação de materiais esportivos. De cor preta, são produzidas preferencialmente a partir de um produto chamado Poliacrilonitrila (PAN) e durante a sua fabricação são submetidas a um tratamento responsável por definir as características específicas de resistência mecânica e de módulo de elasticidade, entre os tratamentos disponíveis estão a carbonização, a oxidação ou a grafitização. Sendo uma etapa de grande importância na fabricação deste tipo de fibra, a escolha do tratamento permite a produção de fibras até mais resistente que o aço.

2.5.2. Matriz

Segundo Hyer (1998), as matrizes tem o objetivo de transferir o carregamento para as fibras, proteger as fibras da abrasão e corrosão, alinhar as fibras e dar formato final ao material compósito. Podem ser constituídas de materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos, porém as matrizes poliméricas são as mais utilizadas e são popularmente chamados de resinas, podendo ser de dois tipos, termofixas e termoplásticas e em geral representar de 30 à 40% do volume final de um material compósito

Devido a sua boa impregnação, relacionada a sua baixa viscosidade e a baixa temperatura de cura as matrizes termofixas são mais comuns na elaboração de materiais compósitos, entre as quais a resina epóxi predomina devido as suas propriedades de boa adesão às variedades de fibras, boa resistência a ambientes quentes e úmidos, boa resistência química e boa estabilidade dimensional (HYER, 1998).

No segundo tipo de matrizes, as matrizes termoplásticas, são divididas em dois subtipos, as matrizes amorfas e as matrizes cristalinas. As matrizes amorfas com cadeias poliméricas com um arranjo complexo, quando aquecidas suas cadeias

adquirem mobilidade e o material se torna um fluido viscoso, não havendo o fenômeno de fusão do material. Já as matrizes cristalinas apresentam um alto grau de alinhamento e organização molecular e quando aquecidas também se tornam um líquido viscoso, mas este processo ocorre devido à fusão do material (HYER, 1998).

Em geral, um material possui maior resistência mecânica na direção em que o alinhamento ocorre e não havendo alinhamento, então a resistência é igual em todas as direções.

2.5.3. Interface entre o material de reforço e o material matriz

Carvalho (1996), assim como outros autores, define que os materiais compósitos são obtidos pela combinação de dois ou mais materiais, portanto a interface, ou região onde ocorre o contato entre os materiais de um compósito, é o principal responsável pela transferência da solicitação mecânica entre a matriz e o reforço e um dos principais parâmetros no desenvolvimento de um material compósito.

A adesão entre o material matriz e o material de reforço tem grande importância podendo, caso ocorra de forma inadequada, comprometer o desempenho de um material compósito ou provocar o início de uma falha.

Como citado anteriormente, Reinhart & Clements (1987) definem que a interface entre os materiais de um compósito deve ser reconhecível e deve ocorrer em escala macroscópica.

A interação entre os diversos tipos de matrizes e de materiais de reforço tem relação com dois fatores, a área de contato entre as superfícies na interface e as forças de coesão nesta região. Ambos os fatores interferem no desempenho de um material compósito e estão intimamente relacionados, pois a redução da área de contato reduz a capacidade de coesão entre as fases, sendo a combinação das diferentes características químicas das fases o maior desafio para garantir a compatibilidade entre elas.

A coesão ou adesividade na interface é um dos parâmetros de maior complexidade no desenvolvimento de um compósito, devido os diferentes tipos de ligações químicas envolvidas e da diferença entre os coeficientes de expansão térmica.

Segundo Fouche (1995) os principais tipos de adesão entre superfícies são:

- **Adesão por interdifusão:** Ocorre quando átomos ou moléculas dos componentes se interfundem na interface e promovem a adesão. Ocorre apenas em condições favoráveis de adesividade e de contato entre as superfícies e se aplica a materiais cujas moléculas possuem afinidade e um alto grau de mobilidade.
- **Adesão eletrostática:** Ocorre quando as superfícies são carregadas com cargas opostas, promovendo a atração eletrostática entre as fases relativa a carga das duas superfícies, mas não contribui de forma efetiva com a interação entre o material matriz e o material de reforço.
- **Adesão química:** Ocorre quando o material matriz e o material de reforço possuem compatibilidade de ligação química na interface entre as superfícies, podendo ocorrer ligações metálicas, covalentes e iônicas nesta região. Pode-se citar como exemplo o uso de fibra de vidro como material de reforço e silanos como agentes de acoplamento, os quais são capazes de formar o acoplamento de óxidos (silanol) entre a superfície do vidro e as moléculas do material matriz.
- **Adesão mecânica:** Eficaz quando a força aplicada é paralela à interface, ocorre quando existe a adesão por intertravamento ou chaveamento mecânico de ambas as superfícies, elevando assim a força de cisalhamento. Sendo, em muitos casos, necessário a adição de outro mecanismo de adesão.

2.5.4. Processos de fabricação em Compósitos

Atualmente existem diversos métodos de fabricação para criação de materiais compósitos, com vantagens e desvantagens específicas e com aplicações distintas, entre os quais os de maior utilização comercial estão:

- Moldagem Manual (*HL, Hand Lay up*);
- Moldagem por transferência de resina (*RTM, Resin transfer molding*);
- Moldagem por mistura e injeção (*RRIM, Reinforced reaction injection Molding*);
- Moldagem por pulverização (*Spray up*).
- Injeção (*Injection*);
- Compressão (*Compression*);
- Centrifugação (*Centrifugation*);
- Laminação (*Lamination*);
- Enrolamento Filamentar (*FW, Filament Winding*);

Existem ainda processos intermediários tais como:

- Pré-formados (*Preforms*);
- Pré-impregnados (*Prepregs*);
- Composto de Moldagem em Massa (*BMC, Bulk molding compound*);
- Composto Reforçado com Fibra (*SMC, Sheet molding compound*);
- Pultrusão (*Pultrusion*).

2.5.4.1. Moldagem Manual

Usado na produção de peças grandes, de alta resistência e com baixo número de unidades produzidas, envolve a aplicação de fibras em vários formatos, picadas, em mantas ou tecidos, as quais são aplicadas manualmente sobre um molde aberto, anteriormente encerado e pintado com desmoldante, e a impregnação manual com matriz polimérica como é ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Representação do processo de moldagem manual (NETO, 2006).

2.5.4.2. Moldagem por transferência de resina

Também muito parecido com o processo de injeção descrito acima, entre as diferenças esta a aplicação de uma camada prévia de resina no molde com o objetivo de melhorar o acabamento superficial do objeto fabricado (Figura 26).

Existem duas formas de aplicação deste processo, na primeira a fibra ou reforço é posicionado no molde e uma matriz polimérica de baixa viscosidade é injetada, sob pressão, dentro do molde sem o auxílio de uma bomba de vácuo, já na segunda forma de aplicação a matriz polimérica de baixa viscosidade é injetada sob pressão dentro do molde com o auxílio de uma bomba de vácuo, facilitando a impregnação de toda a peça e auxiliando a remoção do ar de dentro do objeto fabricado.

Figura 26 – Representação do processo de Moldagem por transferência de resina (WIKIMEDIA COMMONS, 2013).

2.5.4.3. Moldagem por mistura e injeção

Muito parecido com o processo de injeção descrito acima, tem como diferença o fornecimento de fibras picadas e de um ou mais tipos de matriz polimérica em separado e a inclusão de uma câmara de mistura ao processo antes do momento da injeção de material no molde (Figura 27).

Figura 27 – Representação do processo de Moldagem por mistura e injeção (NETO, 2006).

2.5.4.4. Moldagem por pulverização

Neste processo um filamento de fibra contínua é fornecido a uma pistola com um sistema de corte, o qual corta o filamento com o tamanho escolhido e lança a fibra cortada em direção a um jato de resina catalisada que por sua vez está sendo lançado contra um molde (Figura 28). Este processo tem grande similaridade com o processo de moldagem manual e em alguns casos ambos são combinados para a fabricação de objetos.

Figura 28 – Foto do processo de moldagem por pulverização (NETO, 2006).

2.5.4.5. Injeção

Neste processo são usadas fibras picadas, as quais são adicionadas a matriz polimérica formando uma mistura que é injetada sob pressão em um molde dividido em duas metades, as quais são mantidas sob pressão até que a matriz polimérica cure, quando então o molde é aberto permitindo a remoção da peça pronta (Figura 29).

Figura 29 – Representação do processo de injeção (NETO, 2006).

2.5.4.6. Compressão

Processo onde a fibra pré-impregnada com a matriz polimérica é comprimida entre dois moldes do tipo macho e fêmea, onde também é feita a cura e secagem (Figura 30). As peças produzidas através deste processo possuem bom acabamento superficial e dimensional.

Figura 30 – Representação do processo de compressão (NETO, 2006).

2.5.4.7. Centrifugação

Processo usado na fabricação de peças por revolução com espaço interno vazio, como tubos, tanques, etc. Neste processo a matriz polimérica em forma de resina é depositada pela força centrífuga, através de um dosador, sobre a fibra dentro de um molde cilíndrico em movimento de rotação em torno do seu próprio eixo, permitindo que a resina penetre na fibra preenchendo o espaço antes ocupado por moléculas de ar (Figura 31). As peças produzidas através deste processo possuem uma camada contínua e uniforme.

Figura 31 – Representação do processo de centrifugação (NETO, 2006).

2.5.4.8. Laminação

Processo que consiste na fabricação de materiais compósitos em formatos de placas, lâminas e chapas através do fornecimento uma manta de fibras por um cilindro alimentador, a qual é colocada entre dois filmes também fornecidos através de dois outros cilindros de alimentação. Este conjunto de fibra e filme é impregnado com a matriz polimérica através do mergulho em um recipiente e pressionado por rolos que tem a função de dar forma e eliminar o excesso de matriz polimérica, passando por fim através de uma fonte de calor com o objetivo de endurecer e dar a forma final ao objeto fabricado (Figura 32).

Figura 32 – Representação do processo de laminação (NETO, 2006).

2.5.4.9. Enrolamento Filamentar

Como é ilustrado na Figura 33, este processo tem como objetivo a aplicação de fibras, no formato de filamento, umedecidas com matriz polimérica através da revolução de um molde do objeto a ser fabricado, também conhecido como mandril, ou através da revolução do cabeçote de aplicação de fibras. Neste processo de fabricação o formato do objeto a ser fabricado é definido pelo formato do molde ou mandril.

Entre os elementos que costumam compor as máquinas de enrolamento filamentar estão o cabeçote motor, o contra ponto, o olhal, o tensionador para as fibras e o molhador. Onde o olhal é responsável por orientar a posição de aplicação do filamento de fibra e o molhador é responsável por umedecer as fibras com resina. Em algumas versões de máquinas são aplicados vários filamentos em paralelo para a fabricação de objetos.

Figura 33 – Representação do processo de enrolamento filamentar (CARVALHO,1996).

Uma das decisões de maior relevância quanto às propriedades físicas dos objetos criados através deste processo de fabricação de materiais compósitos é a escolha da estratégia de enrolamento, ou seja, a forma como o filamento será distribuído na extensão de todo o objeto. Ilustradas na Figura 34, as estratégias mais conhecidas são:

- Revestimento Polar (Polar Winding) – Onde a trajetória do filamento de fibra é tangencial a ambos os pontos do mandril. É simples e permite a uso de velocidade de revestimento regular.
- Revestimento Helicoidal (*Helical Winding*) – Onde o ângulo e hélice desejados são obtidos através da sincronia da rotação do mandril e da velocidade de carregamento do filamento de fibra, formando uma trajetória de filamento de fibra em hélice helicoidal.
- Revestimento Circular (*Hoop Winding*) – Onde a trajetória do filamento de fibra é perpendicular ao eixo do mandril, efetuando o revestimento em forma de aro. Esta trajetória de filamento de fibra é normalmente usada em combinação com as trajetórias helicoidal e polar.

Figura 34 – Representação das principais estratégias de enrolamento filamentar (CARVALHO,1996).

2.5.4.10. Pré-formados

São peças pré-fabricadas compostas de uma manta de fibras unidas por um ligante a base de água, que depois de prensadas em um molde adquirem o formato próximo da peça a ser fabricada. Estes materiais destinam-se em sua grande maioria ao processo de fabricação de moldagem por transferência de resina.

2.5.4.11. Pré-impregnados

São materiais compósitos previamente preparados onde o reforço é impregnado com a matriz polimérica crua e ambos são mantidos sob refrigeração e envoltos em um filme plástico para manter a matriz polimérica crua pelo maior intervalo de tempo possível.

O processo de fabricação com este tipo de material envolve a moldagem do mesmo até a obtenção da forma final e então o fornecimento de calor para atuar como catalisador e acelerar a cura da matriz polimérica.

2.5.4.12. Composto de Moldagem em Massa

É um material pré-misturado com consistência de argila, composto por uma mistura de fibras, resinas, catalisadores, cargas, pigmentos e aditivos, que pode ser colocado em moldes por injeção ou por prensagem para a obtenção da forma final do objeto a ser fabricado.

2.5.4.13. Composto Reforçado com Fibra

É um material pré-preparado que envolve uma camada de material pré-misturado, composto por resinas, catalisadores, cargas e aditivos, uma camada de fibras ou reforço e outra camada de material pré-misturado, formando uma espécie de sanduíche que é prensado entre duas camadas de um filme plástico para armazenagem, pré-cura e posterior uso através do processo de compressão.

2.5.4.14. Pultrusão

Neste processo perfis reforçados ocos ou maciços de diferentes formatos são produzidos através da aplicação de fibras contínuas dispostas com o objetivo de reforçar longitudinalmente a peça fabricada, aumentando assim a resistência a tensões de tração e flexão. O perfil criado também recebe uma manta de filamento contínuo aumentando assim a resistência aos esforços transversais.

2.5.5. Projeto em Compósitos

Ao projetar utilizando um material compósito é necessário observar todas as considerações relacionadas aos materiais de engenharia convencionais e considerar também a seleção dos materiais usados na elaboração deste compósito. Entre as informações relevantes para a seleção dos materiais usados estão a proporção dos materiais, o tipo de materiais, a distribuição e orientação dos mesmos, a seleção do processo de fabricação, a geometria do objeto a ser fabricado e os requisitos de produção (EDWARDS, 1998).

2.6. Materiais compósitos e manufatura aditiva

No passado, o foco da prototipagem rápida (RP) ou manufatura aditiva (MA) foram os materiais poliméricos, que mais tarde foram substituídos por materiais cerâmicos, metais e materiais compósitos. Os compósitos já são usados em manufatura aditiva, como o exemplo do uso de uma mistura de diferentes polímeros no método de Deposição de Material Fundido (FDM), os quais podem desempenhar o papel de adesivo, plastificante ou surfactante.

Diversos são os métodos de manufatura aditiva em foco atualmente, mas apenas alguns têm sido utilizados para a produção de materiais compósitos, entre os quais estão:

- **Sinterização/Fusão Seletiva a Laser – SLS/SLM** (*Selective Laser Sintering/Melting*);
- **Conformação Próxima ao Formato Final via Laser – LENS** (*Laser Engineered Net Shaping*);
- **Manufatura de Objetos em Lâminas – LOM** (*Laminated Object Manufacturing*);
- **Estereolitografia – SLA** (*Stereolithography*);
- **Modelagem por Deposição de Material Fundido – FDM** (*Fused Deposition Modeling*);
- **Impressão 3D por Jato de Tinta – 3DP** (*Three Dimensional Printing*);
- **Consolidação Ultrassônica – UC** (*Ultrasonic Consolidation*).

Entre os métodos de manufatura aditiva citados, os principais a utilizar materiais compósitos à base de fibras são SLA, FDM e LOM. Nos métodos de manufatura aditiva à base de pó, tais como SLS e LENS, a dificuldade está em se obter camadas lisas de mistura pó e fibra. O uso de fibras longas em vez de fibras curtas torna difícil a sua incorporação no processo, tornando o seu uso limitado aos métodos LOM E SLA. Nos métodos FDM e LOM é necessário o projeto e fabricação de materiais específicos antes da fabricação dos protótipos, entre os quais estão os filamentos, fitas e laminados reforçados com fibras a serem usados na aplicação das técnicas de manufatura aditiva.

2.6.1. Sinterização/Fusão Seletiva a Laser – SLS/SLM

Existem duas razões principais para usar técnicas de fabricação de compósitos pelos métodos SLS e SLM:

- Facilitar o processo de fabricação através do uso do mecanismo da *Sinterização via Fase Líquida* (LPS), a exemplo da obtenção do material multifase Fe-Cu, com o Cobre sendo transformado em um líquido fundido durante o processo e se ligando ao pó de Ferro formando o compósito Fe-Cu, onde o Cobre não é adicionado para melhorar as propriedades mecânicas ou quaisquer outras propriedades do Ferro, mas apenas para ajudar a consolidar, sem maiores dificuldades, o pó de Ferro.
- Combinar vários materiais com o objetivo da obtenção de propriedades que não seriam obtidas através de um único material, a exemplo da criação de um material compósito tradicional usando os processos SLS ou SLM, através da adição da hidroxiapatita (HA) ao pó de policaprolactona (PCL) para aumentar assim a sua resistência e biocompatibilidade.

Segundo o autor, a criação de materiais compósitos através dos métodos SLS e SLM pode acontecer pela “fabricação de compósitos utilizando vários tipos de pós”, pela “fabricação de materiais compósitos que utilizam nas reações *In situ*” e pela “fabricação de compósitos utilizando o tratamento em forno”.

2.6.1.1. Fabricação de compósitos utilizando vários tipos de pós

Este é o método mais utilizado para a criação de um compósito através dos métodos SLS ou SLM e entre as aplicações mais comuns estão a formação de Compósitos de Matriz Polimérica (CMP) e a adesão dos pós de materiais metálicos através do mecanismo de Sinterização via Fase Líquida (SFL).

Na formação de Compósitos de Matriz de Polimérica, pós de materiais poliméricos e de materiais cerâmicos podem ser misturados e sinterizados a laser para formar novos materiais compósitos, como por exemplo, os materiais obtidos através da adição da hidroxiapatita (HA) ao pó de policaprolactona (PCL) (WIRIA et al., 2007) ou através da adição da hidroxiapatita (HA) ao poli(éter-éter-cetona) (PEEK) (TAN et al., 2003).

É importante citar que as partículas em pó são usadas como reforço tendo em vista que o uso de fibras como reforço não permitem a formação de uma cama de pó suave e livre de obstáculos. Também vale ressaltar que neste método as fibras também não oferecem um aumento da densidade final e de resistência mecânica ao objeto manufaturado.

Outra forma de criar compósitos, que se diferencia da adição de um reforço ao pó principal, é através do preparo de um único pó composto a ser usado no processo de manufatura, por exemplo, o pó de fibra de vidro e poliamida (PA) ou o pó de alumínio e poliamida (PA) (MAZZOLI, MORICONI e PAURI, 2007).

Nestes casos um tipo de pó pode ajudar a superar as dificuldades associadas a mistura dos pós e produz uma dispersão uniforme de componentes em um compósito, no entanto, se um dos componentes do pó é uma fibra, podem ocorrer problemas durante todo o processo de fabricação.

Este método também tem sido usado para criação de materiais compósitos com matriz metálica, como Fe e grafite (SIMCHI e POHL, 2004), WC-Co (LAOUI, FROYEN e KRUTH, 2000), WC-Co e Cu (GU e SHEN, 2006), Fe, Ni e TiC (GAARD, KRAKHMALEV e BERGSTROM, 2006), assim como a criação de materiais compósitos com matriz cerâmica, como SISIC (EXNER et al., 2007).

O uso de materiais cerâmicos e metálicos através do método SLS, em geral, não permite a criação de objetos densos e com o objetivo de torna-los densos outros materiais são adicionados à mistura em pó ou um produto é infiltrado na porosidade (MAEDA e CHILDS, 2004). Como exemplo pode-se citar a adição de La_2O_3 à

mistura de WC-Co e Cu, usado para diminuir a tensão superficial da massa fundida e, por consequência facilitar a sinterização (GU et al., 2007) ou o aumento da resistência mecânica de um produto verde WC e Co feito através da infiltração com bronze (KUMAR et al., 2008).

A Figura 35 mostra uma imagem obtida em um microscópio eletrônico de varredura de um bronze (Cu e 10% de Sn) infiltrada por WC-12Co (KUMAR, 2009).

Figura 35 – Imagem MEV de amostra de bronze (Cu e 10% de Sn) infiltrada por WC-12Co (KUMAR, 2009).

2.6.1.2. Fabricação de compósitos que utilizam reações In situ

In situ é uma expressão latina que significa no lugar ou no local, essas reações são estabelecidas durante o processamento do material através dos diversos elementos envolvidos com um determinado método de fabricação.

As reações químicas induzidas pela fonte de laser durante o processo de sinterização são utilizadas para criar reações in-situ nas partículas do material utilizado.

A energia do feixe de laser pode ser usada de duas maneiras:

- Ultrapassar a energia de ativação dos reagentes e formar os compostos químicos;

- Provocar uma reação química que não só irá formar um composto, mas gerar energia térmica suficiente para propagar as reações químicas.

Ambos os tipos de formação in-situ são melhores do que a prévia adição de compostos, devido às seguintes razões:

- Distribuição fina e uniforme dos compostos;
- Melhor deslocamento das partículas;
- Liberação de energia exotérmica úteis para ligação.

Entre os exemplos estão a criação de compósitos de matriz metálica com base de Cu reforçado com TiB_2 e TiC a partir de uma mistura de pó de Cu, Ti e B_4C (LEONG et al., 2002); a síntese de auto propagação em alta temperatura, usada para a formação do compósito $TiC-Al_2O_3$ a partir de TiO_2 , Al e C (SLOCOMBE e LI, 2001), do compósito Al_2O_3-Cu a partir de CuO e Al (KAMITANI, YAMADA e MARUTANI, 2000) e do compósito $NiTi-HA$ a partir de Ni, Ti e HA (SHISHKOVSKY, TARASOVA e PETROV, 2001; SHISHKOVSKY et al., 2001)

No caso de processamento a laser do SiC , as reações químicas também podem ajudar a criar um material de aglutinante. A desintegração de SiC e a reação subsequente com o gás O_2 , formam o composto SiO_2 , o qual se liga ao pó de SiC restante (KLOCKE e WIRTZ, 1997).

2.6.1.3. Fabricação de compósitos utilizando o tratamento em forno

O pós-processamento de materiais sinterizados a laser em um forno é outra maneira para a fabricação de um compósito que pode ser realizado de dois modos principais:

- Através da utilização do forno para a infiltração com ou sem a remoção do ligante.
- Através da utilização do forno para a reação química e infiltração.

No primeiro tipo de fabricação de compósitos citado acima, é possível citar o tratamento do produto acrílico/vidro sinterizado à laser em um forno, onde o ligante

de acrílico permanece na mistura e o vidro $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-CaF}_2$ muda parcialmente para cerâmica criando um compósito vidro cerâmico (DALGARNO et al, 2005;GOODRIDGE et al, 2007).

No segundo tipo de fabricação de compósitos citado acima, é possível citar a formação de compósitos Si/SiC, onde o SiC processado pelo laser tratado com uma resina fenólica, após a cura em um forno a resina dá origem ao Carbono que reage com um pouco do infiltrante Si para formar SiC e finalmente produzir o compósito Si-SiC. A quantidade de SiC no compósito pode ser controlada pelo grau de tratamento do produto com resina fenólica verde (LENK, NAGY e TECHEL, 2003; EVANS et al, 2005; STEVINSON et al, 2008).

2.6.2. Impressão 3D por Jato de Tinta – 3DP

Compósitos podem ser feitos através deste método alterando um componente da mistura de pó, desde que seja compatível com o ligante a ser depositado, que significa que o pó final não pode ser dissolvido ou reagir quimicamente na presença do ligante.

A Impressão 3D oferece uma oportunidade única para controlar a composição do material (JACKSON et al., 1999; CHO et al., 2003) pela aplicação de diferentes materiais através de diferentes cabeçotes de deposição de ligante. Estes materiais depositados podem ser utilizados na forma fundida ou na forma de pasta, o que pode ajudar a manipular várias propriedades, tais como condutividade elétrica, condutividade térmica, refletividade, propriedades magnéticas e dureza em vários lugares do protótipo e criar Gradientes de Materiais Funcionais (GMF) (DIMITROV, SCHREVE e DE BEER, 2006; KERNAN e SACHS, 2003).

A infiltração de formas cerâmicas porosas obtidas por 3DP com metal ou liga é uma opção comum para todas as técnicas de RP para fabricação de compósitos (RAMBO et al., 2005).

A criação de compósito reforçado com fibras por 3DP tem alguns desafios a serem vencidos e a infiltração com fibra pode ser a solução. Há evidências de que as fibras de carbono em escala nano métrica podem ser infiltradas juntamente com o polímero, melhorando assim a condutibilidade elétrica (CZYZEWSKI et al., 2009).

2.6.3. Conformação Próxima ao Formato Final via Laser – LENS

Semelhante ao SLS, este método é baseado no uso de materiais em pó e uma fonte de laser, sendo a diferença principal entre os dois processos, a forma como o pó é depositado.

Em relação à interação do pó e do laser, a fabricação de compósitos em LENS é semelhante ao SLS (LIU e DUPONT, 2003; BANERJEE et al, 2003; LI, STAMPFL e PRINZ, 2000), porém em uma variante do método LENS chamado CMB (KLOCKE e FREYER, 2004), existe a opção de utilizar um fio, em vez do pó, como material de construção (BEAMAN et al, 2004), permitindo a criação de materiais compósitos pelo método LENS sem o uso de materiais em pó.

O método LENS também permite a fabricação de compósitos com diferentes graus de composição de reforço, criando-se Gradientes de Materiais Funcionais (GMF) pelo transporte de materiais em pó, usando gases não reativos de diferentes bicos.

2.6.4. Manufatura de Objetos em Lâminas – LOM

A fabricação de compósitos por este método depende diretamente do desenvolvimento dos materiais compósitos em lâminas finas, a serem usados no processo de fabricação. A fabricação de laminados com reforços em partículas ou em fibras é uma opção para a fabricação de um protótipo em compósito através deste método.

A fabricação também pode ser executada através da infiltração em molde após o ciclo de queima do ligante, onde a pressão é aplicada durante o ciclo de queima do ligante para evitar qualquer possibilidade de delaminação. Isto pode ser feito pela aplicação de uma pressão uniaxial na câmara fechada onde as partes cobertas com pó de sílica estão acomodadas, sendo o pó responsável pela distribuição uniforme da pressão e pela liberação do ligante degradado (KLOSTERMAN et al., 1999).

O método LOM oferece vantagens únicas, uma vez que é possível a adição de camadas de laminados constituídos de diferentes materiais e assim criar compósitos variados, tendo como única limitação a automatização, devido os diferentes conjuntos de laminados que precisam ser integrados ao processo.

ZHAN et al. (2001), cita ainda que este método tem aplicações para o desenvolvimento de compósito de TiC/Ni com a ajuda da sinterização por queima como pós-processamento.

2.6.4.1. Compósitos reforçados com fibra em LOM

Ainda neste método existe a possibilidade do uso de fitas pré-impregnadas com cerâmica e fibra, as quais são unidas respeitando o planejamento seletivo gerado pelo modelo tridimensional do protótipo a ser fabricado. As fitas pré-impregnadas de fibra são fabricadas juntando-se fibras contínuas unidirecionais com uma resina termoendurecível (WEISENSEL, 2004). Durante o processo de fabricação, o corte das fibras cerâmicas contínuas pode ocorrer através de um laser de CO₂, que produz calor e danos ao polímero adjacente, criando problema para a fabricação do protótipo, que pode ser evitado pelo uso de lasers de vapor de cobre, uma vez que este reduz a fibra pelo mecanismo de fotoablação (KLOSTERMAN et al., 1999).

2.6.5. Estereolitografia – SLA

Para a fabricação de compósitos pela Estereolitografia (SLA), uma resina fotopolimerizável é misturada com partículas ou fibras para melhorar suas propriedades. As partículas de reforço quando adicionadas dão origem a um aumento na viscosidade da resina foto sensível dificultando o processo de revestimento e também da criação de novas camadas.

Outros problemas associados com uma mistura líquida são:

- Partículas que ficam paradas em um ponto da solução viscosa ao invés de ficarem suspensas na resina líquida, resultando em uma distribuição não uniforme das partículas de reforço;
- A formação de bolhas no líquido dando origem a poros após a cura que se tornam fontes em potencial para a propagação de trincas;
- A exigência de maior duração da cura devido à menor absorção de energia do laser pelo líquido, decorrente de reflexão parcial de raios laser pelas partículas sólidas presentes no líquido (KARALEKAS e ANTONIOU, 2004; CHEAH et al., 1999).

Alguns dos problemas acima mencionados podem ser evitados pelo uso de uma variante do método SLA, o processo Optoform, no qual uma pasta contendo vários materiais, que substitui o fotopolímero (VANEETVELD et al., 2008).

O uso da cura térmica em adição à foto-cura também favorece a melhoria dos compósitos obtidos através da mistura de reforços aos polímeros (GUPTA e OGALÉ, 2004).

2.6.5.1. Compósitos reforçados com fibra em SLA

De todos os métodos descritos até o momento, a SLA é aquela que tem sido foco de maior atenção nas investigações sobre a aplicação das técnicas de fabricação de materiais compósitos reforçados com fibras, utilizando métodos de manufatura aditiva com o uso de fibras curtas (ZAK et al., 2000), fibras contínuas (GREER et al., 1996) e esteiras de fibras. A seleção de uma fibra de vidro em vez de uma cerâmica ou carbono diminui a sua opacidade à luz UV (LU, FUH e WONG, 2001), que faz com que a fibra de vidro ofereça maior desvantagem na aplicação deste conceito.

Embora a fibra longa seja ideal quando o assunto é tornar melhores as propriedades mecânicas, a adição de fibras curtas em proporções elevadas mostra um aumento das propriedades mecânicas próximo ao atingido com as fibras longas (LU, FUH e WONG, 2001).

2.6.6. Modelagem por Deposição de Material Fundido – FDM

O método de Modelagem por deposição de Material Fundido (FDM) é capaz de produzir peças fortes de materiais compósitos como formas de ligação entre os sucessivos trajetos e camadas devido a fusão parcial ou total dos filamentos de matéria prima de compósito. No caso de uma seção saliente ser produzida, uma estrutura removível de suporte de cera é criada usando um outro bico de extrusão.

O desenvolvimento de filamentos especiais contendo outros materiais além do material principal é essencial para a fabricação de um protótipo em material compósito por FDM. Os filamentos de matéria prima de compósito devem ter a combinação de materiais e a força certa e devem fornecer um material de baixa

viscosidade, capaz de ser aplicado através de um bico de extrusão. Estes são constituídos por um polímero de base, um agente colante, um plastificante e um agente tensoativo, além de outros metais, polímeros e/ou cerâmicas. O polímero de base dá a força de modo a que o filamento atue como um êmbolo, durante o processamento. O promotor de adesividade é usado para aderência e flexibilidade, o plastificante para melhorar o fluxo e o agente tensoativo para uma melhor e homogênea dispersão de metal ou cerâmica (ONAGORUWA et al., 2001; MASOOD e SONG, 2004).

2.6.6.1. Compósitos reforçados com fibra em FDM

A adição de fibras em filamentos para uso em FDM aumenta a rigidez do termoplástico e diminui a dilatação do filamento na cabeça da matriz de extrusão durante a sua produção (SHOFNER et al., 2001). Também ocorre um aumento de sua fragilidade, tornando difícil a manutenção do filamento em suportes cilíndricos de fornecimento de material.

A ductilidade e flexibilidade dos materiais desenvolvidos podem ser melhoradas pela adição de um polímero linear à mistura, aumentando a temperatura de fusão e a temperatura de distorção de calor do material final. (ZHONG et al., 2001).

A introdução de gotículas de polímero líquido-cristalino termotrópico (TLCP) na mistura pode ajudar a superar os problemas de extrusão de fibras através da cabeça de extrusão cujo orifício de pequeno diâmetro tornam as fibras suscetíveis a fratura durante a sua extrusão (GRAY et al., 1998).

2.6.7. Consolidação Ultrassônica – UC

O método de Consolidação Ultrassônica (UC) é baseado principalmente em materiais metálicos na forma de laminas finas como folhas de papel e é adequado para a formação de estruturas de compósitos de metal. As laminas são unidas por meio de solda ultrassônica e os parâmetros de ligação são limitados por alguns tipos de máquinas existentes. As laminas utilizadas são principalmente, Al, Cu, Fe, Ni, etc (KONG et al., 2003; KONG et al., 2004; KONG et al., 2005; JANAKI et al., 2006).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de identificar, entre os métodos de manufatura aditiva, quais possibilitam a inclusão de fibras longas na fabricação de peças e desta forma concentrar os esforços no foco principal deste estudo, propõe-se uma estratégia que permita identificar quais as características de maior valor para análise mais profunda das opções de acesso para esta pesquisa, bem como as análises dos resultados relacionados aos corpos de prova produzidos manualmente.

Nesta etapa são aplicadas, em cada parte do estudo, técnicas para a identificação das possíveis configurações dos vários métodos de manufatura aditiva, tornando consistente a tomada de decisões, para tanto é proposto um fluxograma, baseado em modelos citados no capítulo de revisão bibliográfica, conforme é apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Fluxograma da estratégia proposta.

3.1. Etapas de projeto

O projeto envolve etapas propostas no modelo, nas quais são constantes as interações, iterações e a retroalimentação.

Em grande parte do projeto, conforme a proposta de Pahl (2005) e Baxter (1998) adotaram-se procedimentos de tomada de decisão resumidos (Figura 37), onde, dado o fator motivador, é feito um levantamento das opções e, segundo um critério que envolve os recursos, a demanda ou qualquer fator relevante, faz-se a seleção da melhor opção.

Figura 37 – Procedimento de tomada de decisão resumido.

3.2. Identificação da demanda

A tecnologia de Manufatura Aditiva tem sido amplamente aplicada nos mais diversos tipos de segmentos do comércio e da indústria e isto se deve em parte ao avanço da tecnologia, acessibilidade de equipamentos voltados a esta área e redução dos custos envolvidos com a aquisição e manutenção destas máquinas.

Observa-se que um dos paradigmas a serem quebrados é o uso das tecnologias de manufatura aditiva para a criação de protótipos e/ou peças com propriedades comparáveis às propriedades das peças criadas pelos métodos de

fabricação tradicionais. Nota-se também que o uso de fibras longas em adição aos materiais empregados nestes processos de fabricação é um campo novo a ser explorado. Estes fatores unidos à necessidade de desenvolvimento tecnológico e ao interesse por gerar riquezas, assim como o aumento de vantagem competitiva no cenário mundial pelo emprego de tal tecnologia na produção industrial no nível de produção em larga escala, demonstra uma demanda crescente para o desenvolvimento de um processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de Manufatura Aditiva. Torna-se assim importante investir na pesquisa deste tema e viabilização deste processo.

A Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), parte da Universidade de São Paulo (USP), campus de São Carlos, têm investigado há anos a aplicação da manufatura aditiva nos mais diversos segmentos profissionais, em aplicações médicas e também no projeto e fabricação de máquinas, processos e produtos cerâmicos. É reconhecido como notório que, para a comunidade acadêmica, é extremamente relevante o desenvolvimento de um processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de Manufatura Aditiva.

Portanto, criando com este contexto a possibilidade de não somente os Laboratórios de Pesquisa e Desenvolvimento, mas também do segmento da indústria de produzirem peças em larga escala usando as tecnologias de manufatura aditiva, conservando as propriedades mecânicas desejadas e mantendo baixos os custos tornando assim competitivo financeiramente o produto final obtido.

Com o objetivo de identificar os processos de manufatura aditiva que possibilitem a inclusão de fibras longas na fabricação de peças e objetos, tornando o produto final dotado das mesmas vantagens presentes nos materiais compósitos, o projeto está dividido em:

- Uma profunda avaliação dos métodos observados na Revisão Bibliográfica e a verificação das limitações e possibilidades relacionadas ao uso de materiais compósitos nestes métodos;
- A criação de corpos de prova de geometria simples e seção constante;
- A análise dos corpos de prova criados manualmente em relação à resistência mecânica por tração;
- A criação e ou adaptação de um equipamento, tornando possível a execução sem interferência humana, ou com a menor interferência

humana possível, de todos os passos necessários para a obtenção de uma peça fabricada através de um dos métodos de manufatura aditiva aplicando-se as técnicas de fabricação de materiais compósitos;

- A criação de novos corpos de prova de geometria simples e seção constante através do uso do novo equipamento;
- A análise dos novos corpos de prova em relação à resistência mecânica por tração.

3.3. Análise de viabilidade técnica

Nesta etapa definiram-se, através do estudo de viabilidade técnica, as necessidades e limitações para a realização dos passos definidos anteriormente e assim vislumbrar um equipamento capaz de produzir corpos de prova combinando as técnicas de manufatura aditiva com o processo de fabricação de materiais compósitos.

Entre as necessidades técnicas e econômicas do projeto estão:

- Equipamentos de manufatura aditiva para estudo, pesquisa e análise com o objetivo de determinar os pontos fortes e as limitações de cada método para a definição do método mais adequado para o prosseguimento avançado do estudo;
- Fibra de vidro para a execução dos testes;
- Equipamento de ensaio mecânico para a avaliação dos resultados obtidos através da fabricação dos corpos de prova citados acima;
- Insumos químicos para a infiltração e ou adição das fibras no processo de manufatura aditiva;
- Ferramental para o ajuste e a manutenção destes equipamentos e para a execução das experimentações.

3.3.1. Equipamentos

Foram disponibilizados os equipamentos de manufatura aditiva presentes no Laboratório de Manufatura Avançada do **Parque Tecnológico de São Carlos**, bem como dos materiais para a fabricação dos corpos de prova, entre eles, um equipamento de manufatura aditiva ULTRA 3SP 3D Printer do fabricante Envisiontec baseado no método DLP, um equipamento de manufatura aditiva ZPrinter 350 do fabricante ZCorp. baseado no método de Impressão 3D por jato de tinta, um equipamento de manufatura aditiva FDM 360MC do fabricante STRATASYS baseado no método FDM e um equipamento de manufatura aditiva FDM 8000 do fabricante STRATASYS, também baseado no método FDM.

Também foi possível a aquisição, através de recursos pessoais do autor, de uma impressora 3D do tipo FDM, baseada no conceito RepRap, modelo Mendel Prusa (Figura 38) a qual veio acompanhada de 3 rolos de material (ABS).

Figura 38 – Impressora 3D FDM modelo Mendel Prusa.

Ainda entre os equipamentos necessários para a execução dos ensaios dos corpos de prova produzidos, foi fornecido gentilmente o acesso ao equipamento de ensaio mecânico da marca KRATOS, modelo KE10000MP com célula de carga de 98,1 kN, pelo laboratório de Tecnologia mecânica da FATEC Shunji Nishimura de Pompéia.

3.3.2. Insumos

Amostras de fibra de vidro foram fornecidas pela empresa Fibertex, a qual foi contatada no dia 08 de Setembro de 2015 através de contato pelo email fibertex@fibertex.com.br, email este que foi gentilmente respondido, sendo fornecidos posteriormente os materiais solicitados. Entre os materiais fornecidos pela empresa Fibertex estão, um rolo contendo aproximadamente 2 metros de fibra de vidro modelo “2400 Tex”, com aproximadamente 200 fios de fibra por feixe de material, cujas propriedades físicas e químicas são descritas na Figura 39.

Propriedades Físicas e Químicas			
Resistência	-	pH	<i>Neutro</i>
Composição	<i>Sólido</i>	Corrosividade	<i>Não Corrosivo</i>
Estado Físico	<i>Sólido</i>	Reatividade	<i>Não Reativo</i>
Ponto de Ebulição	<i>> 870 °C</i>	SiO ₂	<i>55%</i>
Ponto de Amolecimento	<i>840 °C</i>	Al ₂ O ₃	<i>14%</i>
Temperatura de Uso	<i>500°C</i>	CaO	<i>23%</i>
Temperatura de Pico	<i>600°C</i>	Outros	<i>8%</i>
% Volátil por Volume	<i>Não Volátil</i>	Substâncias Incompatíveis	<i>Ácido fluorídrico</i>
% Solubilidade (em água)	<i>Pequena</i>		

Figura 39 – Propriedades físicas e químicas da amostra de fibra de vidro.

Foram adquiridos com recursos do próprio autor uma embalagem de 39,5g de resina epóxi marca “Araldite” para aplicações profissionais com secagem de 24 horas (Figura 45), bem como um frasco de 1 litro de Metil Etil Cetona P.A. (CH₃COCH₂CH₃).

3.4. Análise conceitual do projeto

Durante essa etapa, diversos métodos de manufatura aditiva foram avaliados como candidatos em potencial para a criação do processo proposto pelo estudo.

3.4.1. Avaliação dos métodos

- **Sinterização/Fusão Seletiva a Laser – SLS/SLM** (*Selective Laser Sintering/Melting*): Segundo a literatura disponível este método pode ser explorado na área de compósitos de uma forma mais bem sucedida quando vislumbrados os compósitos baseados em materiais na forma de pó, oferecendo dificuldade na adição de fibras e fugindo do foco do trabalho.
- **Conformação Próxima ao Formato Final via Laser – LENS** (*Laser Engineered Net Shaping*): Semelhante ao anterior, também tem como foco principal os diversos materiais em pó, oferecendo as mesmas dificuldades *na adição de fibras* e também fugindo do foco do trabalho.
- **Manufatura de Objetos em Lâminas – LOM** (*Laminated Object Manufacturing*): Um dos métodos em potencial para este trabalho, ele oferece possibilidades fantásticas quanto à diversidade de materiais a serem usados no processo de fabricação, mas exige o preparo prévio das laminas a serem usadas durante o processo de fabricação, tornando assim o desenvolvimento do material como o foco principal do estudo e fugindo da área de concentração adotada.
- **Estereolitografia – SLA** (*Stereolithography*): Também visto como forte candidato a ser explorado como coadjuvante do novo processo a ser desenvolvido, tem grande chance do estabelecimento de uma boa camada de interface entre as fibras e a resina foto polimérica, mas oferece preocupação quanto a deposição de fibras longas sobre a cama de resina crua.

- **Modelagem por Deposição de Material Fundido – FDM** (*Fused Deposition Modeling*): Outro forte candidato ao método escolhido para os estudos mais profundos tem como vantagem a disponibilidade de um equipamento que pode ser modificado e a boa união entre os termoplásticos e as fibras, criando camadas de interface que sustentem as solicitações de carga sobre o material matriz.
- **Impressão 3D por Jato de Tinta – 3DP** (*Three Dimensional Printing*): *Descartado por não ser possível a criação de uma cama suave ao inserir a fibra longa no processo de fabricação.*
- **Consolidação Ultrassônica – UC** (*Ultrasonic Consolidation*): Outro método que não oferece grandes vantagens quanto ao objetivo de inserção de fibras longas ao seu processo de fabricação.

Foi possível observar que entre os métodos citados, os métodos FDM, LOM e SLA são os mais apropriados para aplicação de fibras longas na produção de peças e protótipos em materiais compósitos, entretanto outros métodos podem ser usados para esta mesma finalidade, mas apresentam limitações e dificuldades a serem transpostas.

É possível citar os métodos a base de pó, onde a remoção das fibras longas presentes em áreas onde os grãos do pó não foram unidos se torna difícil, oferecendo limitações e dificuldades no uso de fibras longas ou contínuas, sendo necessária a substituição por fibras curtas.

Sendo assim, em alguns métodos de manufatura aditiva deve-se transpor obstáculos através do desenvolvimento de complementos e alternativas para as várias etapas de fabricação, como o preparo e o processamento dos filamentos e laminados a serem usados ou através da formulação e do desenvolvimento de novos materiais de fabricação.

3.5. Planejamento para a criação dos corpos de prova preliminares

O projeto inicial prevê etapas de experimentação envolvendo os métodos FDM, LOM e SLA de manufatura aditiva, através dos quais serão criados corpos de

prova para posteriores ensaios e análises, feitos com valores próximos aos dados pelas normas da American Society for Testing and Materials, ASTM.

3.5.1. FDM

São propostos dois tipos de modificações, a adição de material de reforço entre as camadas do objeto criado e a o uso de um filamento de termoplástico com um núcleo de fibra como material de extrusão. Ambas as propostas dependem de alterações em equipamentos comerciais para serem colocadas em prática de forma totalmente autônoma, mas para a prova do conceito, os processos de fabricação serão assistidos manualmente.

3.5.1.1. Adição de material de reforço entre camadas em FDM

Com objetivo de permitir a inclusão de material de reforço entre as camadas do objeto manufaturado é previsto a criação de um modelo digital com espaços vagos em sua estrutura, onde serão adicionados manualmente os elementos de reforço fibroso (Figura 40).

Figura 40 – FDM Proposta 01: (a) fabricação da camada base; (b) criação das paredes de suporte; (c) preenchimento manual das lacunas com material de reforço; (d) criação da camada superior.

Nesta proposta será testado o uso de reforços de fibras entre as camadas de termoplásticos na criação de corpos de prova com a adição de fibra de vidro em diferentes orientações.

3.5.1.2. Uso de filamento de termoplástico com núcleo fibroso como material de extrusão em FDM

Nesta proposta um fio de fibra de carbono contínuo será colocado no centro do fio de termoplástico usado como material de fabricação e ao ser aquecido e extrudado a partir de uma matriz de extrusão será depositado juntamente com o termoplástico até que o corpo de prova seja criado, permitindo que o termoplástico exerça o papel de matriz para o fio de fibra de carbono.

Neste caso serão testadas as direcionalidades do fio de fibra de carbono através da criação de corpos de prova com a distribuição de filamentos unidirecionais e bidirecionais (Figura 41).

Figura 41 – FDM Proposta 02: Filamento de termoplástico com núcleo de fibra de carbono.
Adaptado de Volpato (2007)

3.5.2. LOM

Nesta proposta o rolo de fornecimento de material, tradicionalmente usado neste processo, será substituído por rolos de materiais fibrosos, na forma de fitas de pré-impregnados, entre os quais estão a fibra de vidro e a fibra de carbono.

Esta proposta exige o preparo do material de confecção com antecedência e a elaboração de um método de corte que permita efetuar o corte no material adotado (Figura 42).

Figura 42 – LOM: Troca de sistema de alimentação e troca de sistema de corte. Adaptado de Volpato (2007)

Para a prova do conceito é proposta a elaboração de corpos de prova através do corte e montagem manual, usando-se como material fita de pré-impregnado (prepreg).

3.5.3. SLA

Assim como na proposta 01 do método FDM, o material de reforço será adicionado entre as camadas do objeto criado. Com objetivo de permitir a inclusão deste material de reforço serão feitas alterações nos modelos digitais, criando-se espaços vagos em sua estrutura onde serão adicionados manualmente os elementos de reforço fibroso através de pausas no processo de manufatura (Figura 43).

Figura 43 – LOM: (a) fabricação da camada base; (b) criação das paredes de suporte; (c) preenchimento manual das lacunas com material de reforço; (d) criação da camada superior.

Nesta proposta será testado o uso de reforços de fibras multicamadas através da criação de corpos de prova com a adição de fibra de vidro em diferentes orientações.

3.6. Métodos de ensaio dos corpos de prova

A avaliação das propriedades físicas dos corpos de prova construídos a partir das propostas citadas acima será feita através de um ou mais métodos de ensaio normalizados pela ASTM, ISO e DIN, entre os quais é possível citar o ensaio de flexão, tração, compressão, fadiga, cisalhamento, dureza, rigidez e fragilidade,

Os corpos de prova produzidos neste trabalho foram avaliados através da execução e interpretação de ensaios mecânicos do tipo “Ensaio de Tração”.

3.6.1. Ensaio de Tração

Os corpos de prova a serem ensaiados seguem as normas de ensaio ASTM D3039_3039M, com título “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” ou em português, “Método de Teste Padrão para Propriedades de Tração de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica”.

Foram respeitados os critérios para a elaboração de corpos de prova de geometria planejada (Figura 44).

Figura 44 – Critérios geométricos do corpo de prova do ensaio de tração. Adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995)

Também foram respeitadas as medidas sugeridas em cada uma das suas dimensões (Figura 45).

Orientação da Fibra	Largura (mm)	Comprimento Total (mm)	Espesura (mm)	Comprimento da Aba (mm)	Espessura da Aba (mm)	Chanfro da Aba (ângulo em graus)
0° unidirecional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 ou 90
90° unidirecional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanceada e simétrica	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	-	-	-
aleatória-descontínua	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	-	-	-

^AAs Dimensões e tolerâncias descritas nesta tabela são apenas recomendações e podem variar caso diferentes condições sejam atendidas.

Figura 45 – Medidas de corpos de prova em compósitos para ensaio de tração. Adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995)

3.7. Escolha do método de Manufatura Aditiva

Após os diversos estudos e discussões, optou-se por seguir a pesquisa focando a atenção no método de Modelagem por Deposição de Material Fundido utilizando-se do termoplástico Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) como material para a fabricação dos corpos de prova preliminares.

Observou-se que tal método permite a exploração científica através de equipamentos de baixo custo, com tecnologia flexível e que permite as interações e adaptações necessárias para a análise profunda.

Entre os motivos para esta escolha também estão a simplicidade de funcionamento, o fácil acesso ao material utilizado como matéria prima e o fácil acesso a peças de reposição, permitindo assim que todos os testes necessários fossem executados e todos os protocolos de funcionamento do equipamento fossem contornados.

Notou-se também que este método possui características de grande interesse para a indústria atual, e que o aumento de resistência mecânica aos produtos e peças produzidas, através da combinação de termoplásticos e reforços fibrosos, oferece vantagens significativas para este segmento, permitindo a fabricação de produtos funcionais em um curto espaço de tempo e possibilitando que estes produtos atendam as necessidades de solicitação mecânica de diversas áreas antes não exploradas pelos métodos de manufatura aditiva.

3.8. Criação dos Corpos de Prova por Montagem Manual

Esta etapa do estudo foi dividida em 3 passos, (1) a criação de corpos de prova maciços em ABS para servir como corpo de controle, (2) a criação de um corpo de prova em ABS, montado manualmente, unindo-se em camadas o ABS e a fibra de vidro utilizando-se da resina epóxi como agente de adesão das partes e (3) a criação de corpos de prova em ABS, montados manualmente, unindo-se em camadas o ABS e a fibra de vidro utilizando-se de um solvente de ABS (MEK) como agente de adesão das partes.

Vale ressaltar que a amostra de Fibra de Vidro utilizada se apresenta na forma de um feixe fibra (*rouving*) contendo aproximadamente 200 fios. Para a

confeção dos corpos de prova descritos abaixo usou-se o feixe completo, preenchendo toda a área de cada camada com fibra de vidro.

3.8.1. Corpos de prova maciços em ABS

Os corpos de prova maciços (Figura 46) foram criados em equipamento da marca Stratasys, modelo Fortus 360MC, á partir de um modelo tridimensional com as seguintes dimensões:

- Largura: 12,70 mm
- Comprimento: 247,20 mm
- Espessura: 1,72 mm

Figura 46 – Corpo de prova de controle maciço feito em ABS (Stratasys).

3.8.2. Corpo de prova em ABS + FIBRAS + EPOXI

O corpo de prova montado manualmente foi fabricado em etapas separadas, em uma primeira etapa, as camadas (Figura 47) foram criadas em equipamento da

marca Stratasys, modelo Fortus 360MC, a partir de modelos tridimensionais com as seguintes dimensões:

- Largura: 12,70 mm
- Comprimento: 247,20 mm
- Espessura: 0,43 mm (4 camadas)
- Espessura total: 1,72 mm

Figura 47 – Camadas usadas na montagem de corpo de prova ABS + FIBRA + EPOXI.

Em uma segunda etapa, as camadas foram unidas manualmente utilizando resina epóxi como adesivo e fibra de vidro distribuída de maneira uniforme, ocupando toda a área entre camadas (Figura 48).

Figura 48 – Corpo de prova feito em ABS + FIBRA + EPOXI.

3.8.3. Corpos de prova em ABS + FIBRAS + MEK

Os corpos de prova montados manualmente foram fabricados em etapas separadas.

Em uma primeira etapa, as camadas (Figura 49) foram criadas em equipamento da marca Stratasys, modelo Fortus 360MC, a partir de modelos tridimensionais com as seguintes dimensões:

- Largura: 12,70 mm
- Comprimento: 247,20 mm
- Espessura: 0,43 mm (4 camadas)
- Espessura total: 1,72 mm

Figura 49 – Camadas usadas na montagem de corpo de prova ABS + FIBRA + MEK.

Em uma segunda etapa, as camadas foram unidas manualmente utilizando Metil Etil Cetona como agente de adesão entre a fibra de vidro, distribuída de maneira uniforme entre as camadas de ABS (Figura 50).

Figura 50 – Corpo de prova feito em ABS + FIBRA + MEK.

3.9. Execução dos ensaios dos corpos de prova preliminares

Esta etapa do estudo foi dividida em 3 passos, (1) ensaio dos corpos de prova maciços em ABS, (2) ensaio do corpo de prova em ABS, montado manualmente unindo-se em camadas o ABS e a fibra de vidro utilizando-se da resina epóxi como agente de adesão das partes e (3) ensaio dos corpos de prova em ABS, montados manualmente, unindo-se em camadas o ABS e a fibra de vidro utilizando-se de um solvente de ABS (MEK) como agente de adesão das partes.

3.9.1. Corpos de prova maciços fabricados em ABS

São descritas as etapas de execução, os resultados e a média dos dados quantitativos dos ensaios de 3 corpos de prova maciços criados em equipamento da marca Stratasys, conforme visto acima.

A Figura 51 ilustra a montagem dos corpos no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante.

O breve ciclo de execução do primeiro ensaio mostrou que o corpo de prova maciço fabricado em ABS de nº 01 rompeu (Figura 52) após resistir a uma força máxima de tração de 686,48 N conforme resultado ilustrado na Figura 53.

O segundo ensaio permitiu observar, através de seu ciclo de execução, que o corpo de prova maciço fabricado em ABS de nº 02 rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 702,41 N conforme resultado ilustrado na Figura 54.

O terceiro ensaio, através de seu ciclo de execução, mostrou que o corpo de prova maciço fabricado em ABS de nº 03 rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 696,28 N conforme resultado ilustrado na Figura 55.

Figura 51 – Corpo de prova 100% fabricado em ABS montado no equipamento de ensaio.

Figura 52 – Corpo de prova de controle maciço feito em ABS rompido.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002140
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 11/03/2015
 HORA: 15:32:38
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 300,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Cliente:

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	686,48	21,12	14,62	475,00	2700,64	32,500	13,000	2,5000

Informações do Ensaio:

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 53 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço fabricado em ABS nº 01.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002176
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 11/09/2015
 HORA: 16:16:36
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 50,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESURA mm
■ 1	702,41	26,23	23,81	637,50	3663,70	26,775	12,750	2,1000

Informações do Ensaio:
 CORPO DE PROVA 100% ABS
 FABRICADO EM IMPRESSORA 3D MARCA STRATASYS

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 54 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço fabricado em ABS nº 02.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002177
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 16/10/2015
 HORA: 17:28:12
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
 EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	696,28	16,61	16,11	675,00	383,39	41,910	12,700	3,3000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA 100% ABS

FABRICADO EM IMPRESSORA 3D MARCA STRATASYS

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 55 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço fabricado em ABS nº 03.

Através do cálculo da média dos três valores obtidos através dos ensaios descritos acima foi obtido o valor de 695,05 N de resistência a tração, adotado como referência para as avaliações posteriores.

3.9.2. Corpo de prova em ABS + FIBRAS + EPOXI

Conforme mostra a Figura 56, o corpo foi montado no equipamento de ensaio de tração respeitando as recomendações do fabricante.

Figura 56 – Corpo de prova ABS + FIBRA + EPOXI montado no equipamento de ensaio.

O ciclo de execução deste ensaio mostrou que o corpo de prova confeccionado em ABS, fibra de vidro e resina epóxi rompeu (Figura 57) após resistir a uma força máxima de tração de 3432,38 N conforme resultado ilustrado na Figura 58.

Figura 57 – Corpo de prova de controle fabricado em ABS + FIBRA + EPOXI rompido.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002141
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 11/03/2015
 HORA: 15:39:27
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 300,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Cliente:

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	3432,38	92,64	87,04	3225,00	2978,96	37,050	13,000	2,8500

Informações do Ensaio:

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 58 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + EPOXI.

3.9.3. Corpos de prova em ABS + FIBRAS + MEK

São descritas as etapas de execução, os resultados e a média dos dados quantitativos dos ensaios de 3 corpos de prova confeccionados manualmente através da sobreposição de camadas de ABS e feixes de fibra de vidro, utilizando-se de um solvente de ABS (MEK) como agente de adesão entre as diferentes camadas, conforme visto anteriormente.

A Figura 59 ilustra a montagem dos corpos no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante.

O ciclo de execução do primeiro ensaio mostrou que o corpo de prova fabricado em ABS, fibra de vidro Metil Etil Cetona de nº 01 rompeu (Figura 60) após resistir a uma força máxima de tração de 3115,62 N conforme ilustrado na Figura 61.

O segundo ensaio permitiu observar, através de seu ciclo de execução, que o corpo de prova fabricado em ABS, fibra de vidro Metil Etil Cetona de nº 02 rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 3177,41 N conforme resultado na Figura 62.

O terceiro ensaio, através de seu ciclo de execução, mostrou que o corpo de prova fabricado em ABS, fibra de vidro Metil Etil Cetona de nº 03 rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 3530,45 N conforme resultado ilustrado na Figura 63.

**Figura 59 – Ensaio do corpo de prova
ABS + FIBRA + MEK.**

**Figura 60 – Corpo de prova de controle
fabricado em ABS + FIBRA + MEK
rompido.**

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002174
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 11/09/2015
 HORA: 16:06:49
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 5,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
 EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm²	LARGURA mm	ESPESURA mm
1	3115,62	116,36	105,51	2825,00	2695,53	26,775	12,750	2,1000

Informações do Ensaio:

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 61 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + MEK nº 01.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002175
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 11/09/2015
 HORA: 16:13:16
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 5,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	3177,41	118,67	106,44	2850,00	2692,09	26,775	12,750	2,1000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA ABS+MEK+FIBRA

FABRICAÇÃO MANUAL ATRAVÉS DE CAMADAS PRODUZIDAS EM

IMPRESSORA 3D COMERCIAL MARCA STRATASYS

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 62 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + MEK nº 02.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002178
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 16/10/2015
 HORA: 17:31:49
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 100.00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
 EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	3530,45	84,24	76,95	3225,00	1419,76	41,910	12,700	3,3000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA ABS+MEK+FIBRA
 FABRICAÇÃO MANUAL ATRAVÉS DE CAMADAS PRODUZIDAS EM
 IMPRESSORA 3D COMERCIAL MARCA STRATASYS

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 63 – Relatório do ensaio do corpo de prova fabricado em ABS + FIBRA + MEK nº 03.

Através do cálculo da média dos três valores obtidos através dos ensaios descritos acima foi obtido o valor de 3274,49 N de resistência a tração, adotado como referência para as avaliações posteriores.

3.10. Análise dos testes preliminares

A análise dos testes preliminares demonstrou um aumento significativo na Força Máxima obtida no ensaio do corpo de prova composto por ABS, Fibra e Epoxi, quando comparado a média das Forças Máximas obtidas pelos ensaios dos corpos de prova maciços fabricados em ABS, mas ao avaliá-lo em detalhe notou-se que o mesmo apresentou delaminação (Figura 64), inviabilizando assim maiores pesquisas no uso e aplicação destes materiais na fabricação de materiais compósitos.

Figura 64 – Efeito de delaminação no ensaio do corpo de prova ABS + Fibra + Epoxi.

O corpo de prova composto de ABS, Fibra e MEK apresentou uma Força Máxima de 3274,49 N demonstrando um aumento de resistência a tração de aproximadamente 371,11% em relação ao primeiro corpo de prova (Figura 65), justificando assim a continuidade do estudo e a fabricação de um cabeçote de deposição contínua de fibras longas a ser usado em equipamentos de manufatura aditiva e a validação do mesmo através da fabricação de novos corpos de prova confeccionados em ABS, FIBRA e MEK.

Figura 65 – Gráfico comparativo dos ensaios de tração preliminares.

4. PROJETO DE UM CABEÇOTE DE DEPOSIÇÃO CONTÍNUA DE FIBRAS LONGAS

Constatou-se, na análise dos testes preliminares, que para a fabricação de corpos em ABS e fibra de vidro com a adição do solvente líquido MEK visando garantir o sucesso da criação da camada de interface entre o polímero ABS e a fibra de vidro é necessário o desenvolvimento de um cabeçote de deposição contínua de fibras longas de forma controlada, projetado para a deposição da fibra e do aditivo líquido MEK sobre camadas de ABS previamente criadas.

4.1. Projeto Conceitual

Durante esta etapa, diversas propostas de mecanismos capazes de depositar continuamente fibras longas foram investigadas, levando à proposta conceitual de um cabeçote que permitisse a deposição do reforço juntamente com a deposição das camadas através da tecnologia FDM.

Hudson (2014), em uma parceria entre o Instituto de Interação Humano-Computador da Universidade Carnegie Mellon e o Centro de Pesquisa Disney em Pittsburgh, propõe a confecção de um urso de pelúcia através de técnicas de manufatura aditiva (Figura 66 e 67), para isso foi desenvolvido um dispositivo capaz de depositar de forma planejada fios de lã sucessivamente sobre uma base, promovendo a confecção do urso de pelúcia (Figura 68).

Figura 66 – Impressão de um urso de pelúcia 3D. Modelo tridimensional (esquerda), Impressão em progresso (direita) (HUDSON, 2014).

Figura 67 – Impressão de um urso de pelúcia 3D. Resultado final. (HUDSON, 2014).

Figura 68 – Dispositivo de deposição de lã Adaptado de HUDSON (2014).

Segundo Halidi e Abdullah (2012) o termoplástico ABS quando submetido ao aquecimento e fundido em um bico de extrusão, sofre mudanças morfológicas possibilitando a incidência de falhas como bloqueio de sua extrusão ou a incidência de bolhas e protuberâncias na superfície do modelo impresso, por esta razão optou-se por desenvolver um sistema de distribuição de fibras separado do sistema de distribuição de ABS e do sistema de distribuição do ligante químico.

Inspirado no trabalho de Hudson (2014) foram desenvolvidas 7 versões do cabeçote conforme é ilustrado a seguir.

4.1.1. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 1

A primeira versão teve como objetivo a deposição somente da fibra, através de um canal para o fornecimento da fibra, sendo a mesma conduzida sobre a superfície destino por um eixo através de um canal de condução. Nesta proposta, a deposição do aditivo líquido prevista pelas análises preliminares, ocorre através de um sistema independente de deposição de líquidos, composto de uma agulha de seringa ligada a um sistema de bombeamento, incorporado ao sistema de movimentação cartesiano do equipamento de manufatura aditiva (Figura 69).

Figura 69 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 1 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

4.1.2. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 2

Com o objetivo de tornar o processo de fabricação o mais autônomo possível, nesta versão incorporou-se ao cabeçote um canal para a montagem de uma agulha de seringa para a deposição do aditivo líquido ao conjunto de deposição da fibra (Figura 70), tornando assim possível fazer experimentações com diferentes intervalos de tempo entre a deposição da fibra e a deposição do aditivo líquido.

Figura 70 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 2 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

Testes preliminares mostraram como inadequado o uso de um eixo para a condução da fibra, tal procedimento não foi bem sucedido tendo em vista que a fibra oferecia pouco ou quase nenhum atrito com o eixo de condução, forçando ao autor a estabelecer nova direção na elaboração conceitual deste cabeçote.

4.1.3. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 3

Uma vez descartado o canal de condução do eixo de assentamento e após analisar as semelhanças entre o objetivo deste estudo e o funcionamento dos equipamentos de fabricação por deposição de fitas pré impregnadas (Tape Laying), optou-se por modificar a geometria deste cabeçote, tornando-o capaz de estabelecer um assentamento da fibra com o próprio corpo. Aproveitando esta fase de

redefinição conceitual, optou-se por definir a geometria superior deste cabeçote com as mesmas dimensões de um bico de extrusão de uma impressora FDM padrão RepRap, tornando assim possível a fixação deste novo cabeçote em um equipamento já existente (Figura 71).

Figura 71 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 3 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

4.1.4. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 4

Em testes preliminares notou-se que o conceito proposto na versão anterior oferece vantagens e desvantagens quanto à fabricação de materiais compósitos através de um método de manufatura aditiva, entre as vantagens está a simplicidade de fabricação e a simplicidade de uso deste cabeçote, porém muitas são as desvantagens, entre elas a própria simplicidade, que impede implementações mais elaboradas que permitiriam aumentar autônomo o processo de fabricação. Outra desvantagem é o tempo que o aditivo líquido leva para criar o efeito de adesibilidade quando depositado sobre o ABS tornando a fixação da fibra na peça de ABS pouco eficiente, forçando o uso de uma velocidade de deposição muito baixa e tornando assim o processo de fabricação muito pouco competitivo.

Explorando os pontos negativos da versão anterior foi proposta uma nova abordagem, um sistema de fixação térmica de fibra batizado de “*Costura Térmica de Fibras*”, com o objetivo de garantir a rápida ancoragem da fibra durante a sua

posição, através de um sistema de aquecimento controlado, responsável por aquecer o capilar de aço inox, por onde a fibra se desloca, na mesma temperatura de fusão do ABS, somado a um sistema mecânico de movimentação no eixo Z, capaz de deslocar o capilar de aço inox em movimentos semelhantes ao de uma máquina de costura, conduzindo assim a fibra ao seu destino de deposição e permitindo que a fibra seja ancorada termicamente ao ABS antes da deposição do aditivo líquido (Figura 72).

Figura 72 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 4 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

4.1.5. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 5

Ajustes técnicos foram feitos durante o desenvolvimento da quinta versão do cabeçote de deposição planejada de fibras, com o objetivo de permitir ajustes durante a montagem deste dispositivo em um equipamento de manufatura aditiva, a posição de fixação na máquina foi invertida, também foram incluídas duas travas para a fibra acionadas por solenoide e um canal para o fornecimento do aditivo líquido MEK, canal este que permitirá incorporar a aplicação do aditivo líquido na função de distribuição planejada deste dispositivo, permitindo que a distribuição

deste componente, durante o processo de fabricação, ocorra com maior exatidão e maior eficiência (Figura 73).

Figura 73 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 5 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

4.1.6. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 6

Na sexta versão, novos ajustes técnicos foram feitos, o bloco de aquecimento foi posicionado em um ponto mais próximo do ponto de contato entre a fibra, o capilar de aço inox aquecido e o corpo de ABS, garantindo uma melhor transmissão e um maior aproveitamento do calor. Devido o reposicionamento do bloco de aquecimento fez-se necessário a criação de um bloco utilizado exclusivamente para a distribuição do movimento do motor, posicionado onde antes estava o bloco responsável pelas funções de transmissão de movimento e transmissão de calor. Por fim isolantes térmicos foram adicionados com o objetivo de impedir que os elementos com mudanças de temperatura afetassem todo o restante do sistema e assim proteger o motor de passo da exposição ao calor gerado (Figura 74).

Figura 74 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 6 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

4.1.7. Cabeçote de deposição contínua de fibras longas – Versão 7

Na sétima e última versão, novamente ajustes técnicos foram feitos, com o objetivo de reduzir a perda de energia térmica gerada pelo resistor responsável pelo aquecimento de todo o conjunto de ancoragem da fibra, foi removido uma parte do mancal inferior, permitindo também que o bloco de aquecimento fosse posicionado ainda mais próximo do ponto de contato entre a fibra, o capilar de aço inox aquecido e o corpo de ABS, garantindo uma transmissão e um aproveitamento do calor ainda maior e, portanto uma melhor fixação da fibra sobre o ABS. Também aproveitando o espaço criado pela remoção de uma porção do mancal inferior, decidiu-se por modificar a posição da trava inferior da fibra e tornar a distância entre as travas da fibra maior, possibilitando um melhor movimento da fibra dentro do capilar de aço inoxidável (Figura 75).

Figura 75 – Vistas Isométrica e Frontal da Versão 7 do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

4.2. Fabricação e Montagem do Cabeçote de Deposição Contínua de Fibras Longas

Após a proposta de diversas versões para um cabeçote de deposição contínua de fibras longas, motivadas pela criação de um sistema mecânico que permitisse a execução completa dos passos necessários para a fabricação de um material compósito através de técnicas de manufatura aditiva e de seus respectivos materiais, optou-se por adotar o conceito proposto na última versão do cabeçote de deposição contínua de fibras longas, descartando-se o uso do sistema de travas da fibra, do sistema de bombeamento para o aditivo químico e do sistema de corte automático da fibra, deixando os mesmos como sugestão para trabalhos futuros.

4.2.1. Fabricação e aquisição das partes mecânicas

Nesta etapa, é descrita a fabricação das diversas peças necessárias para a efetiva criação do dispositivo em questão, as quais, ilustradas na Figura 76, foram fabricadas através de técnicas de torneamento, fresamento, furação e rosqueamento, destacando-se o aço inoxidável como material resistente a abrasão da fibra de vidro, o latão como material adotado para a fabricação dos mancais superior e inferior por oferecer uma boa relação tribológica com o aço inoxidável do capilar de condução da fibra, o Celeron como material isolante escolhido para a fabricação das flanges e arruelas responsáveis pelo isolamento térmico e o alumínio para as demais partes como bom condutor de calor e de fácil usinagem.

Figura 76 – Peças fabricadas para a montagem do cabeçote.

4.2.2. Montagem do Sistema de Aquecimento

As Figuras 77 e 78 mostram a montagem do sistema de aquecimento, responsável por promover a ancoragem térmica da fibra sobre o ABS, constituído de bloco de aquecimento, canal condutor de fibra, termistor de 100K NTC e resistência de 4,7 Ohms e 5W, usada para aquecer todo o conjunto a uma temperatura dentro da faixa de temperaturas adotadas para os aquecer os bicos de extrusão de ABS

dos equipamentos FDM. Através deste aquecimento, transmitido do bloco de alumínio ao canal de condutor da fibra é possível aquecer a ponta do canal e a fibra dentro dele à temperatura necessária para que a fibra seja ancorada termicamente no termoplástico (ABS) para que posteriormente toda a fibra restante também seja ancorada quimicamente ao mesmo material, promovendo assim a criação de uma camada de interface que permite a distribuição das cargas da matriz polimérica para o material de reforço fibroso.

Figura 77 – Montagem do bloco de aquecimento (visão geral).

Figura 78 – Montagem do bloco de aquecimento (detalhe).

4.2.3. Montagem do Conjunto Principal

As Figuras 79, 80, 81, 82 e 83 mostram o processo de montagem do conjunto principal do cabeçote de deposição contínua de fibras longas. Vale ressaltar que nesta etapa optou-se por não implementar os sistemas de trava de fibras superior e inferior, deixando esse sistema para futuras melhorias.

Figura 79 – Montagem do conjunto principal – 1ª etapa.

Figura 80 – Montagem do conjunto principal – 2ª etapa.

Figura 81 – Montagem do conjunto principal – 3ª etapa.

Figura 82 – Montagem do conjunto principal – 4ª etapa.

Figura 83 – Montagem do conjunto principal – 5ª etapa.

4.2.4. Montagem do Conjunto Principal na Impressora RepRap

Após testes de bancada e a confirmação do funcionamento adequado do cabeçote montado, o mesmo foi fixado em uma impressora 3D padrão RepRap conforme Figura 84.

Figura 84 – Montagem do conjunto principal na impressora RepRap.

4.2.5. Eletrônica

O sistema de controle do cabeçote foi desenvolvido para funcionar independente do equipamento onde o mesmo foi montado. Para viabilizar o funcionamento deste novo cabeçote foi necessário o desenvolvimento de um sistema com 2 elementos:

- *Controle do motor de passo responsável por movimento do canal condutor da fibra:* para isto foi adotado um driver de potência A4988, utilizado em equipamentos de manufatura aditiva do tipo FDM de baixo custo como o que foi adotado neste estudo para a execução dos testes finais, o qual permite o controle de direção, cinco diferentes resoluções de passo, passo-completo, meio passo, 1/4 passo, 1/8 passo e 1/16 passo, controle de corrente ajustável para tensões de operação de 8V a 35V e foi ligado a um sistema microcontrolado (Arduino, 2015), capaz de gerenciar o seu funcionamento baseado no Microcontrolador Atmel Atmega328 (Figura 85).
- *Controle do sistema de aquecimento do canal condutor da fibra:* para isto utilizou-se de um resistor de 4,7 Ohms e 5W, ligado a uma fonte de 12V e um termistor de 100k NTC como sensor de temperatura, ambos ligados ao mesmo sistema microcontrolado (Arduino, 2015) baseado no Microcontrolador Atmel Atmega328 em que foi ligado o driver de potência citado acima.

Figura 85 – Arduino Duemilanove.

A Figura 86 mostra uma placa eletrônica criada para tornar possível a ligação entre a placa microcontrolada com o motor de passo do sistema de movimentação linear do eixo Z e o sistema de aquecimento.

Figura 86 – Placa de controle de movimentação e temperatura.

4.2.6. Software de Controle

A Figura 87 mostra o fluxograma do software desenvolvido em linguagem C++, criado com o objetivo de permitir o controle dos elementos citados no Item 5.2.5 e possibilitar a alteração dos critérios de funcionamento e assim a definição dos melhores parâmetros a serem adotados.

Figura 87 – Diagrama do programa utilizado no microcontrolador Atmel Atmega328.

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, incluindo a criação de corpos de prova obtidos através do uso do cabeçote de deposição contínua de fibras longas, descrito no Capítulo 4, o ensaio destes corpos de prova e a análise dos resultados finais obtidos.

5.1. Criação dos Corpos de Prova por Montagem Automática

Esta etapa do estudo foi dividida em 3 passos, (1) a criação de um corpo de prova maciço em ABS para servir como corpo de controle, (2) a criação de um corpo de prova piloto por montagem automática, através do uso do cabeçote de deposição contínua de fibras longas descrito no Capítulo 4 e do solvente de ABS Metil Etil Cetona (MEK) como agente de adesão das partes e (3) a criação de 03 corpos de prova finais através de montagem automática, variando-se o espaçamento entre as fibras depositadas, a distância entre os pontos de costura térmica e o número de camadas de ABS e fibra de vidro.

Vale ressaltar que o cabeçote de deposição contínua de fibras longas foi adaptado em uma impressora 3D do tipo RepRap, citada no Capítulo 3, na identificação da demanda, utilizada como parte do ferramental deste projeto.

Vale também ressaltar que a amostra de Fibra de Vidro utilizada se apresenta na forma de um feixe de fibra “*rouving*” contendo aproximadamente 200 fios, a qual foi dividida em 4 partes aproximadamente iguais, totalizando uma média de 50 fios depositados pelo cabeçote de deposição contínua de fibras longas durante a fabricação dos corpos de prova.

5.1.1. Corpo de prova maciço em ABS

Um corpo de prova maciço (Figura 88) foi criado aplicando-se o solvente de ABS Metil Etil Cetona entre as camadas criadas, com o objetivo de verificar se houve alteração na resistência à tração em comparação com os resultados obtidos com os corpos de prova maciços em ABS citados no Capítulo 3.

Nesta etapa o corpo de prova em ABS foi fabricado a partir de um modelo tridimensional, resultando nas seguintes dimensões:

- Largura: 13,65 mm
- Comprimento: 178,00 mm
- Espessura: 3,40 mm

Figura 88 – Corpo de prova de controle maciço feito em ABS (RepRap).

5.1.2. Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK piloto

A fabricação do corpo de prova piloto foi planejada através da união das 3 camadas de ABS e 2 camadas de fibra de vidro através do uso do solvente Metil Etil Cetona depositado manualmente com um conta gotas.

As camadas de ABS foram produzidas com aproximadamente 0,58 mm de espessura, por uma impressora 3D do tipo RepRap, modelo Mendel Prusa, com filamento de 3 mm e bico de extrusão com orifício de 0,4 mm.

O cabeçote de deposição contínua de fibras longas teve a sua temperatura ajustada para 245°C e a sua movimentação foi promovida pelo sistema cartesiano de movimentação disponível na impressora 3D.

Com o objetivo de estabelecer os parâmetros iniciais de confecção dos corpos de prova, optou-se por definir a trajetória de distribuição da fibra de vidro sobre as camadas de ABS através do uso dos controles manuais de movimentação encontrados no programa da impressora 3D utilizada, bem como o ajuste da altura de cada camada, feito através do reposicionamento do sensor de início de curso do eixo Z, totalizando 3 linhas longitudinais de fibra sobre cada camada de ABS, adotando-se a distância de 8 mm entre os pontos de ancoragem térmica e a distância de 4 mm entre as linhas de fibra de vidro.

5.1.2.1. Criação da primeira camada de ABS

Na primeira etapa, como mostra a Figura 89, criou-se uma camada de ABS a partir de um modelo tridimensional com as seguintes dimensões:

- Largura: 12,70 mm
- Comprimento: 180 mm
- Espessura: 0,58 mm

Figura 89 – Primeira camada de ABS do corpo de prova nº 01 (RepRap).

5.1.2.2. Criação da primeira camada de fibra de vidro

Nesta etapa ajustou-se a posição do sensor de início de curso do eixo Z na mesma altura da última camada de ABS, permitindo a deposição de fibra sobre a camada anterior, a qual foi então depositada (Figura 90) através do uso do cabeçote de deposição de fibras longas, movimentado pelo sistema cartesiano de movimentação da impressora 3D, seguindo um padrão de distribuição de linhas paralelas no sentido longitudinal, no total de 3 linhas contínuas sobre todo o comprimento da peça, com espaçamento de 4mm entre as linhas, aplicando-se manualmente o solvente Metil Etil Cetona sobre a camada de fibra depositada, permitindo assim a adesão entre as diferentes fases deste compósito.

Figura 90 – Primeira camada de fibra de vidro do corpo de prova nº 01 (RepRap).

5.1.2.3. Criação da segunda camada de ABS

Nesta etapa, ajustou-se a posição do sensor de início de curso do eixo Z na mesma altura da última camada de fibra de vidro depositada, permitindo a impressão de uma nova camada de ABS sobre a camada de fibra de vidro depositada na etapa anterior (Figura 91).

Figura 91 – Segunda camada de ABS do corpo de prova nº 01 (RepRap).

5.1.2.4. Criação da segunda camada de fibra de vidro

Nesta etapa ajustou-se a posição do sensor de início de curso do eixo Z na mesma altura da última camada de ABS, permitindo a deposição de fibra de sobre a camada anterior, a qual foi então depositada através do uso do cabeçote de deposição contínua de fibras longas, movimentado pelo sistema cartesiano de movimentação da impressora 3D, seguindo um padrão de distribuição de linhas paralelas no sentido longitudinal, adotando-se um espaçamento de 4mm entre as linhas (Figura 92), obtendo-se um total de 3 linhas contínuas sobre todo o comprimento da peça, aplicando-se manualmente o solvente Metil Etil Cetona sobre a camada de fibra depositada, permitindo assim a adesão entre as diferentes fases deste compósito.

Figura 92 – Segunda camada de fibra de vidro do corpo de prova nº 01 (RepRap).

5.1.2.5. Criação da terceira camada de ABS

Nesta etapa, ajustou-se a posição do sensor de início de curso do eixo Z na mesma altura da última camada de fibra de vidro depositada, permitindo a impressão de uma nova camada de ABS sobre a camada depositada na etapa anterior (Figura 93).

Figura 93 – Terceira camada de ABS do corpo de prova nº 01 (RepRap).

A sequência de passos descritos acima seguiu como critério de execução uma lista de parâmetros (Tabela 01) que culminaram na criação de um corpo de prova (Figura 94) com as seguintes dimensões finais:

- Largura: 13,05 mm
- Comprimento: 182,00 mm
- Espessura: 2,8 mm

Tabela 1 – Parâmetros para confecção do corpo de prova piloto.

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
Número de camadas de ABS	3,00	unid.
Espessura das camadas de ABS	0,58	mm
Número de camadas de fibra de vidro	2,00	unid.
Espessura das camadas de fibra de vidro	0.60	mm
Número de linhas de distribuição de fibra de vidro	3,00	unid.
Distância entre as linhas de distribuição de fibra de vidro	4,00	mm
Distância entre os pontos de ancoragem térmica	variável

Figura 94 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 01 (RepRap).

5.1.3. Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK nº 02

A fabricação do segundo corpo de prova também foi planejada através da união das 3 camadas de ABS e 2 camadas de fibra de vidro, utilizando-se do solvente Metil Etil Cetona, depositado manualmente com um conta gotas, como agente de adesão.

Assim como o corpo de prova anterior, as camadas de ABS foram produzidas com aproximadamente 0,58 mm de espessura, por uma impressora 3D do tipo RepRap, modelo Mendel Prusa, com filamento de 3 mm e bico de extrusão com orifício de 0,4 mm.

A temperatura do cabeçote de deposição contínua de fibras longas foi mantida em 245°C e a sua movimentação promovida pelo sistema cartesiano de movimentação disponível na impressora 3D citada acima.

A distribuição da fibra de vidro sobre as camadas de ABS, bem como o ajuste da altura entre as camadas, passou a ser feita através de linhas de programação em código G, previamente criadas e interpretadas pelo programa de controle da impressora 3D, permitindo assim ajustar a distância entre os pontos de ancoragem térmica para valores fixos, adotando-se a distância de 8 mm entre os pontos.

Neste corpo de prova optou-se por variar o parâmetro da distância entre as linhas de fibra de vidro, passando de 4 mm, valor adotado na confecção do corpo de prova anterior, para o novo valor de 3 mm, permitindo a inclusão de mais uma linha na trajetória de distribuição de fibra de vidro, totalizando 4 linhas longitudinais sobre cada camada de ABS, como é possível notar na Tabela 02.

Tabela 2 – Parâmetros para confecção do corpo de prova nº 02.

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
Número de camadas de ABS	3,00	unid.
Espessura das camadas de ABS	0,58	mm
Número de camadas de fibra de vidro	2,00	unid.
Espessura das camadas de fibra de vidro	0.60	mm
Número de linhas de distribuição de fibra de vidro	4,00	unid.
Distância entre as linhas de distribuição de fibra de vidro	3,00	mm
Distância entre os pontos de ancoragem térmica	8	mm

Os valores da lista de parâmetros acima foram aplicados no planejamento e execução dos passos necessários para a criação de um corpo de prova (Figura 95), cujas dimensões finais obtidas foram:

- Largura: 13,20 mm
- Comprimento: 178,50 mm
- Espessura: 3,55 mm

Figura 95 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02 (RepRap).

5.1.4. Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK nº 03

A fabricação do terceiro corpo de prova também foi planejada através da união das 3 camadas de ABS e 2 camadas de fibra de vidro, utilizando-se do solvente MEK, depositado manualmente com um conta gotas, como agente de adesão.

Assim como o corpo de prova anterior, as camadas de ABS foram produzidas com aproximadamente 0,58 mm de espessura, por uma impressora 3D do tipo RepRap, modelo Mendel Prusa, com filamento de 3 mm e bico de extrusão com orifício de 0,4 mm.

A temperatura do cabeçote de deposição contínua de fibras longas foi mantida em 245°C e a sua movimentação promovida pelo sistema cartesiano de movimentação disponível na impressora 3D citada acima.

A distância entre as linhas de fibra de vidro foi mantida em 3 mm e 4 linhas longitudinais de fibra de vidro foram depositadas sobre cada camada de ABS.

A distribuição da fibra de vidro sobre as camadas de ABS, bem como o ajuste da altura entre as camadas, foi feita através de linhas de programação em código G, optando-se por definir como variação de parâmetro, a distância entre os pontos de ancoragem térmica de 8 mm, para o novo valor de 4mm (Tabela 3).

Tabela 3 – Parâmetros para confecção do corpo de prova nº 03.

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
Número de camadas de ABS	3,00	unid.
Espessura das camadas de ABS	0,58	mm
Número de camadas de fibra de vidro	2,00	unid.
Espessura das camadas de fibra de vidro	0.60	mm
Número de linhas de distribuição de fibra de vidro	4,00	unid.
Distância entre as linhas de distribuição de fibra de vidro	3,00	mm
Distância entre os pontos de ancoragem térmica	4	mm

Os valores da lista de parâmetros acima foram aplicados no planejamento e execução dos passos necessários para a criação de um corpo de prova (Figura 96), cujas dimensões finais obtidas foram:

- Largura: 13,10 mm
- Comprimento: 178,20 mm
- Espessura: 3,40 mm

Figura 96 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 (RepRap).

5.1.5. Corpo de prova em ABS + FIBRAS + MEK nº 04

Neste último corpo de prova optou-se definir a variação de parâmetros através da redução da espessura das camadas de ABS de 0.58 mm para 0,38 mm, aumentar o número de camadas de fibra de vidro para 3 e aumentar o número de camadas de ABS para 4, ainda utilizando-se do solvente Metil Etil Cetona, depositado manualmente com um conta gotas, como agente de adesão.

A temperatura do cabeçote de deposição contínua de fibras longas foi mantida em 245°C e a sua movimentação promovida pelo sistema cartesiano de movimentação disponível na impressora 3D citada acima.

A distância entre as linhas de fibra de vidro foi mantida em 3 mm e 4 linhas longitudinais de fibra de vidro foram depositadas sobre cada camada de ABS.

A distribuição da fibra de vidro sobre as camadas de ABS, bem como o ajuste da altura entre as camadas, continuou a ser feita através de linhas de programação em código G, assim como a distância entre os pontos de ancoragem térmica em 4 mm (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros para confecção do corpo de prova nº 04.

PARÂMETROS	VALOR	UNIDADE
Número de camadas de ABS	4,00	unid.
Espessura das camadas de ABS	0,38	mm
Número de camadas de fibra de vidro	3,00	unid.
Espessura das camadas de fibra de vidro	0.60	mm
Número de linhas de distribuição de fibra de vidro	4,00	unid.
Distância entre as linhas de distribuição de fibra de vidro	3,00	mm
Distância entre os pontos de ancoragem térmica	4	mm

Vale ressaltar que neste último corpo de prova optou-se também por aplicar pressão mecânica sobre cada camada de fibra aplicada sobre o ABS e umedecida com Metil Etil Cetona, isto foi feito através de um pequeno rolo de borracha e um eixo metálico utilizado como manipululo (Figura 97).

Figura 97 – Compactação no corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 (RepRap).

Os valores da lista de parâmetros acima foram aplicados no planejamento e execução dos passos necessários para a criação de um corpo de prova (Figura 98), cujas dimensões finais obtidas foram:

- Largura: 12,80 mm
- Comprimento: 179,00 mm
- Espessura: 3,60 mm

Figura 98 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 (RepRap).

5.2. Execução dos Ensaios dos Corpos de Prova por Montagem Automática

Esta etapa do estudo foi dividida em 5 passos, (1) ensaio do corpo de prova maciço em ABS, (2) ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto, (3) ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02, (4) ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03, (5) ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04.

5.2.1. Corpo de prova maciço em ABS

Após a montagem do corpo de prova no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante (Figura 99).

Deu-se então início ao ciclo de execução do primeiro ensaio, mostrando que o corpo de prova maciço em ABS rompeu (Figura 100) após resistir a uma força máxima de tração de 1216,04 N conforme resultado ilustrado na Figura 101.

Figura 99 – Corpo de prova maciço em ABS montado no equipamento de ensaio.

Figura 100 – Corpo de prova maciço em ABS rompido.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002204
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 08/11/2016
 HORA: 19:50:53
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRE CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

KRATOS
 EQUIPAMENTOS

Cliente:

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	1216,04	26,20	25,32	1175,00	621,25	46,410	13,650	3,4000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA 1 – 100% ABS

FABRICADO EM IMPRESSORA 3D

REPRAP MODELO MENDEL PRUSA

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 101 – Relatório do ensaio do corpo de prova maciço em ABS.

5.2.2. Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto

Após a montagem do corpo de prova no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante (Figura 102), deu-se início ao ciclo de execução do primeiro ensaio, mostrando que o corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 1304,31 N conforme resultado ilustrado na Figura 103.

Figura 102 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto montado no equipamento de ensaio

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002191
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 23/06/2016
 HORA: 19:46:12
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRE CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	1304,31	28,98	24,44	1100,00	718,63	45,000	15,000	3,0000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA 01 - ABS+MEK+FIBRA
 FABRICAÇÃO AUTOMATIZADA EM
 IMPRESSORA 3D REPRAP MODELO MENDEL PRUSA

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 103 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto.

Uma vez rompido o corpo de prova muito próximo ao ponto de fixação no equipamento de ensaio e com o objetivo de confirmar os valores obtidos, optou-se por executar um novo ciclo de ensaio com o material resultante (Figura 104).

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002192
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 23/06/2016
 HORA: 19:49:36
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
1	1206,24	26,81	22,22	1000,00	780,74	45,000	15,000	3,0000

Informações do Ensaio:
 CORPO DE PROVA 02 - ABS+MEK+FIBRA
 FABRICAÇÃO AUTOMATIZADA EM
 IMPRESSORA 3D REPRAP MODELO MENDEL PRUSA
 NUMERO 02

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCV61301A-USB)

Figura 104 – Relatório do segundo ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK piloto.

O novo ciclo de execução de ensaio permitiu verificar que não houve falha na execução do primeiro ensaio, uma vez que o corpo de prova rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 1206,24 N, valor muito próximo ao valor obtido pelo ensaio anterior (Figura 105).

Figura 105 – Corpo de prova final rompido.

5.2.3. Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02

Após a montagem do corpo de prova no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante (Figura 106), deu-se início ao ciclo de execução do primeiro ensaio, mostrando que o corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02 rompeu após resistir a uma força máxima de tração de 1980,98 N conforme resultado ilustrado na Figura 107.

Figura 106 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02 montado no equipamento de ensaio

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002205
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 08/11/2016
 HORA: 20:25:41
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	1980,98	42,27	40,55	1900,00	1066,21	46,860	13,200	3,5500

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA 02 - ABS+MEK+FIBRA
 FABRICAÇÃO AUTOMATIZADA EM
 IMPRESSORA 3D REPRAP MODELO MENDEL PRUSA
 NUMERO 02

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCV61301A-USB)

Figura 107 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 02.

5.2.4. Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03

Após a montagem do corpo de prova no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante (Figura 108), deu-se início ao ciclo de execução do primeiro ensaio, mostrando que o corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 rompeu (Figura 109) após resistir a uma força máxima de tração de 2098,66 N conforme resultado ilustrado na Figura 110.

Figura 108 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 montado no equipamento de ensaio.

Figura 109 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 rompido.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002206
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 08/11/2016
 HORA: 20:34:43
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRE CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	2098,66	47,12	43,78	1950,00	911,37	44,540	13,100	3,4000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA 03 - ABS+MEK+FIBRA

FABRICAÇÃO AUTOMATIZADA EM

IMPRESSORA 3D REPRAP MODELO MENDEL PRUSA

NUMERO 03

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 110 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03.

5.2.5. Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04

Após a montagem do corpo de prova no equipamento de ensaio de tração, respeitando as recomendações do fabricante (Figura 111), deu-se início ao ciclo de execução do primeiro ensaio, mostrando que o corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 03 rompeu (Figura 112) após resistir a uma força máxima de tração de 3129,37 N conforme resultado ilustrado na Figura 113.

Figura 111 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 montado no equipamento de ensaio.

Figura 112 – Corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04 rompido.

RELATÓRIO DE ENSAIO

ENSAIO: 00002207
 NORMA: ENSAIO TRAÇÃO
 Identificação:
 CÉLULA DE CARGA: 10000 kgf (1)
 VEL. DESLOC.: 5,00 mm/min
 TEMPERATURA: 25,00°C

DATA: 08/11/2016
 HORA: 20:42:00
 TRABALHO REALIZADO: TRAÇÃO
 PRÉ CARGA: 100,00 N
 UMIDADE RELATIVA: 50,00 %

Cliente:

KRATOS
EQUIPAMENTOS

Amostra No.	FORÇA MÁXIMA N	LIMITE DE RESISTÊNCIA MPa	LIMITE DE ESCOAMENTO MPa	CARGA LIM. DE ESCOAMENTO N	MÓDULO DE ELASTICIDADE MPa	ÁREA TRANSVERSAL mm ²	LARGURA mm	ESPESSURA mm
■ 1	3128,37	67,89	53,17	2450,00	1066,84	46,080	12,800	3,6000

Informações do Ensaio:

CORPO DE PROVA 04 - ABS+MEK+FIBRA

FABRICAÇÃO AUTOMATIZADA EM

IMPRESSORA 3D REPAP MODELO MENDEL PRUSA

MÁQUINA DE ENSAIO KRATOS (TRCv61301A-USB)

Figura 113 – Relatório do ensaio do corpo de prova ABS+FIBRA+MEK nº 04.

5.3. Análise dos resultados finais

Analisando-se os dados, foi possível observar que a resistência mecânica à tração do corpo de prova fabricado inteiramente de ABS através da impressora 3D do tipo RepRap modelo Mendel Prusa disponível para o projeto, teve um aumento de 74% quando comparado ao corpo de prova de mesmo material fabricado em um equipamento comercial da marca Stratasys, através da sobreposição de camadas com a aplicação de Metil Etil Cetona sobre as camadas de ABS, entende-se que a aplicação de Metil Etil Cetona durante o processo de fabricação promoveu melhor adesão entre os fios de termoplástico depositados durante a impressão 3D.

Comparando-se esse resultado ao resultado obtido pelo ensaio do corpo de prova piloto fabricado em ABS e reforçado com fibra de vidro, através do uso do cabeçote de deposição de fibras longas desenvolvido nota-se uma inferior resistência mecânica a tração em relação ao corpo de prova também fabricado em ABS e reforçado com fibra de vidro, mas obtido através de montagem manual em aproximadamente 1/3 dos valores obtidos. Entende-se que esta diferença se deve ao percentual de fibra de vidro utilizado em ambos os casos, o que justifica a queda de resistência mecânica à tração verificada acima.

A redução para $\frac{1}{4}$ da quantidade de fibra de vidro utilizada entre as camadas de ABS teve como objetivo a visualização da distribuição e ancoragem da fibra de vidro durante o processo de fabricação automática e o estabelecimento dos parâmetros iniciais de confecção dos corpos de prova, permitindo também verificar a prova de conceito obtida pelo funcionamento adequado do cabeçote citado acima.

Notou-se que alguns eventos tornaram os resultados inferiores ao esperado, como é possível observar no corpo de prova piloto, onde foi possível perceber que a interação humana para o ajuste manual da posição do sensor de início de curso do eixo Z ao fim da fabricação de cada camada de ABS ou fibra, aumentou a ocorrência de erros durante o processo de fabricação, motivo pelo qual os corpos de prova de nº 02, 03 e 04, foram fabricados através da prévia programação em código G de todos os movimentos relacionados às suas devidas criações.

Notou-se também que o corte manual da fibra impediu que o processo de fabricação fosse automático e isto possivelmente influenciou na qualidade destes corpos de prova.

Conforme ilustrado na Figura 114, durante os ensaios dos corpos de prova finais criados através da variabilidade de parâmetros, foram obtidas as seguintes resistências máximas a tração:

- Corpo de prova ABS + MEK - 1216,04 N;
- Corpo de prova ABS + FIBRA + MEK nº 01 - 1304,31 N;
- Corpo de prova ABS + FIBRA + MEK nº 02 - 1980,98 N;
- Corpo de prova ABS + FIBRA + MEK nº 03 - 2098,66 N;
- Corpo de prova ABS + FIBRA + MEK nº 04 - 3129,37 N.

Figura 114 – Gráfico comparativo dos ensaios de tração finais.

Também é possível observar na Tabela XX que os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova finais criados através da variabilidade de parâmetros demonstram aumento percentual nas medidas de Força Máxima quando comparados ao corpo de prova fabricado inteiramente em ABS.

Tabela 5 – Comparativo percentual dos resultados finais.

Nº	MATERIAL USADO	FORÇA MÁXIMA (N)	AUMENTO PERCENTUAL DE FORÇA MÁXIMA EM COMPARAÇÃO AO CORPO DE PROVA 01 (%)
1	ABS MACIÇO (STRATASYS)	695,05	0
2	ABS + MEK (CAMADAS)	1216,04	74,96
3	ABS + FIBRA + MEK nº 01	1304,31	87,66
4	ABS + FIBRA + MEK nº 02	1980,98	185,01
5	ABS + FIBRA + MEK nº 03	2098,66	201,94
6	ABS + FIBRA + MEK nº 04	3129,37	350,24

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são discutidas as conclusões obtidas pela análise dos resultados e índice de sucesso deste estudo. Ainda neste capítulo são abordadas as sugestões para trabalhos futuros, possibilitando a continuidade desta pesquisa.

6.1. Conclusões

Concluiu-se que a adoção do aditivo líquido MEK como agente de adesão entre as fases do material compósito composto de matriz de ABS e reforço de fibra de vidro melhorou a adesão entre as camadas e permitiu a criação de uma interface que garantiu a distribuição das cargas entre a fibra de vidro e o ABS, o que é confirmado através da análise dos resultados dos ensaios de tração executados nos corpos de prova criados, manualmente, bem como dos resultados dos ensaios executados nos corpos de prova criados através do cabeçote de deposição contínua de fibras longas.

A aplicação deste mesmo aditivo líquido entre as camadas de um corpo de prova maciço fabricado inteiramente em ABS, também demonstrou aumento significativo das propriedades físicas do mesmo.

Os ensaios de tração executados nos corpos de prova demonstraram resultados promissores. Quando comparados, os resultados obtidos pelos ensaios de tração dos corpos de prova maciços confeccionados em ABS (695,05 N) e o ensaio de tração dos corpos de prova confeccionados em ABS, fibra de vidro e MEK como agente ligante (3129,37 N), este último demonstrou um aumento de aproximadamente 350% em relação ao primeiro, tendo ainda como vantagem o não aparecimento do efeito de delaminação presente no corpo de prova confeccionado em ABS, fibra de vidro e resina epóxi como agente ligante (3432,38 N).

Concluiu-se também que o cabeçote de deposição desenvolvido permite a deposição de fibras longas com a mesma resolução encontrada em equipamentos comerciais de impressão 3D, cujo algoritmo de fatiamento permite a criação de camadas digitais com aproximadamente 100µm, a mesma precisão confirmada no processo de deposição de fibra uma vez que oferece a possibilidade do uso de fibras em feixes de diversas densidades e quantidade de fios, garantindo assim maior ou menor precisão.

O sistema de costura térmica garantiu o posicionamento da fibra depositada sem causar atraso no processo de fabricação, uma vez que a velocidade de deposição de fibra, de cerca de 120 segundos para a trajetória adotada, é superior à velocidade de deposição de ABS, de cerca de 450 segundos para a criação de uma camada.

O valor de 1304,31 N, obtido através do ensaio de tração do corpo de prova criado pelo cabeçote desenvolvido, mesmo inferior quando comparado ao valor de 3530,45 N obtido através do ensaio do corpo de prova confeccionado manualmente, ainda sim demonstrou ser promissor, uma vez que foram utilizados os mesmos materiais nos corpos de prova criado, mas com uma proporção de fibra de vidro de aproximadamente $\frac{1}{4}$ da quantidade de fibra utilizada no corpo de prova confeccionado manualmente, razão que justifica a diferença nos resultados e na conclusão descrita.

Os ensaios de tração executados nos corpos de prova na segunda etapa do trabalho confirmaram os resultados da primeira etapa do trabalho e permitiram encontrar os melhores parâmetros de uso do cabeçote de deposição contínua de fibras longas desenvolvido. Quando comparados, os resultados obtidos pelos ensaios de tração dos corpos de prova maciços confeccionados em ABS (695,05 N) e o ensaio de tração dos corpos de prova nº 02 (1980,98 N), nº 03 (2098,66 N) e nº 04 (3129,37 N) confeccionados em ABS, fibra de vidro e MEK, é possível notar aumentos semelhantes aos observados nos corpos de prova da primeira etapa do trabalho.

O sistema cartesiano de movimentação do equipamento de impressão 3D permitiu a distribuição da fibra em trajetórias pré-estabelecidas, que podem ser exploradas de forma que os outros métodos de fabricação de materiais compósitos não permitem. Semelhante às vantagens que um processo de manufatura aditiva oferece em comparação aos métodos de fabricação tradicionais, este processo de fabricação de materiais compósitos através da manufatura aditiva oferece a possibilidade de distribuição da fibra através de trajetórias complexas que resultarão em uma distribuição de cargas totalmente diferente de tudo que já foi criado anteriormente, tornando este processo não somente inovador mas único em sua essência.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para o uso deste processo de fabricação em aplicações industriais é necessário que novas soluções sejam incorporadas ao trabalho aqui descrito, as quais são apontadas á seguir:

- Com o objetivo de tornar todo o processo de fabricação livre de interação humana ou com a menor interação humana, é necessário incluir novas funcionalidades ao software da impressora 3D, cujo sistema cartesiano de movimentação foi usado com a finalidade de distribuir este material, permitindo assim, que o processo de fabricação seja unificado, dando-se início a distribuição de fibra tão logo a camada de ABS onde a fibra ser distribuída esteja pronta, permitindo que o equipamento reconheça o fim da etapa de fabricação das partes de ABS e o início da etapa de fabricação das partes de fibra como um único ciclo de trabalho, diminuindo assim a incidência de erros devido aos ajustes manuais do sensor de início de curso do eixo Z;
- Também com o objetivo de tornar todo o processo de fabricação livre de interação humana ou com a menor interação humana possível, faz-se necessário a implementação do sistema de travas de fibra, permitindo que o movimento de subidas e descidas do canal de condução da fibra seja aproveitado, intercalando-se, em tempos distintos, o acionamento de ambas as travas da fibra, superior e inferior, mantendo-se a trava inferior aberta e fixando-se a fibra na região superior do cabeçote de deposição, através do acionamento da trava superior, quando o canal de condução de fibra estiver em seu ponto mais alto do eixo Z e invertendo-se o acionamento destas travas quando o canal de condução da fibra estiver em seu ponto mais baixo do eixo Z;
- Outra sugestão é o desenvolvimento de um sistema de corte automático de fibra de vidro que permita que ao fim da deposição de cada camada de fibra o equipamento possa iniciar a nova etapa da fabricação sem a dependência de interseção humana;

- Com o objetivo de aumentar a densidade da peça e garantir a formação de uma camada consistente após a aplicação de fibra faz-se necessário a implantação de um sistema de compactação das fibras sobre a camada de ABS;
- Entre as funcionalidades sugeridas no início deste projeto, mas não implantadas por decisão do autor, está o sistema de deposição de aditivo líquido (MEK), cujo desenvolvimento depende intimamente de modificações no ciclo de trabalho da impressora 3D, cujo sistema cartesiano de movimentação foi usado com a finalidade de distribuir o ABS assim como a fibra de vidro. Para isto, novas funcionalidades devem ser adicionadas ao software de controle existente, permitindo que o equipamento reconheça o fim da etapa de fabricação das partes de fibra de vidro e dê início à etapa de distribuição do aditivo líquido (MEK).

7. REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS, INC. *Stereolithography Interface Specification*, 1988.

ARDUINO. *Open-source physical computing platform*. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>>. Acessado em: 10/10/2015.

AGARWAL, B.D.; BROUTMAN, L.J.; *Analysis and performance of fiber composites, second edition*. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; *ASTM D3039-D3039M Standard Test Method for tension properties of polymer matrix composite materials*, Philadelphia, PA, 1995.

BADOTTI, A. V. B.; *Avaliação do processo de metalização superficial aplicado às peças obtidas por estereolitografia*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BACK, N.; *Metodologia de projeto de produtos industriais*. Editora Guanabara Dois, 1985.

BANERJEE, R.; COLLINS, R.C.; GENC, A.; FRASER, H.L.; *Direct laser deposition of in situ Ti-6Al-4V-TiB composites*. Mater Sci Eng A, 2003, v.358, p.343–9.

BARNATT, C.; *3D Printing: The Next Industrial Revolution*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.

BAXTER, M.; *Projeto do produto*. Editora Edgard Blücher, 1998.

BEAMAN, J.J.; ANTWOOD, C.; BERGMAN, T.L.; BOURELL, D.; HOLLISTER, S.; ROSEN, D.; *WTEC panel report on additive/subtractive manufacturing research and development in Europe*. Baltimore, Maryland, 21224: World Technology Evaluation Centre, Inc., 2004.

BEAUMONT, P.W.R.; *The failure of fibre composites: an overview. Journal of Strain Analysis*. 1989, v.24, n.4, p.189-205.

CALLISTER Jr. W. D.; RETHWISH, D. G.; *Materials science and engineering: An introduction*. 9ª Ed., New York, John Wiley & Sons, 2014.

CARVALHO, J.; VOLPATO, N.; *Prototipagem rápida como processo de fabricação*. In: Neri Volpato. (Org.). *Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações*. 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2007, v. 1, p. 2.

CARVALHO, J.; *Computer integrated design optimization and manufacturing of filament wound parts*. Tese (Doutorado) – Faculty of Applied Sciences, Division PMA, K.U. Leuven, 1996.

CHEAH, C.M.; FUH, J.Y.H.; NEE, A.Y.C.; LU, L.; *Mechanical characteristics of fibre-filled photo-polymer used in stereolithography*. *Rapid Proto J*, 1999, v.5, i.3 p.112–9.

CHO, W.; SACHS, E.M.; PATRIKALAKIS, N.M.; TROXEL, D.E.; *A dithering algorithm for local composition control with three-dimensional printing*. *Computer-Aided Design*, 2003, v.35, i.9, p.851–67.

CZYZEWSKI, J.; BURZYNSKI, P.; GAWEL, K.; MEISNER, J.; *Rapid Prototyping of electrically conductive components using 3D printing technology*. *J Mater Process Technol*, 2009, v.209, i.12-13, p.5281–5.

DALGARNO, K.W.; WOOD, D.J.; et al.; *Mechanical properties and biological responses of bioactive glass ceramic processed using indirect SLS*. Texas, In: *Proc. SFF*, 2005, p.132–40.

DIMITROV, D.; SCHREVE, K.; DE BEER, N.; *Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives*. *Rapid Proto J*, 2006, v.12, i.3, p.136–47.

EDWARDS, K.L.; *An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes*. *Materials & Design*, 1998. v.19, p.1-10.

EVANS, R.S.; BOURELL, D.L.; BEAMAN, J.J.; CAMPBELL, M.I.; *Rapid manufacturing of silicon carbide composites*. Rapid Proto J, 2005, v.11, i.1, p.37–40.

EXNER, H.; HORN, M.; STREEK, A.; REGENFUSS, P.; ULLMANN, F.; EBERT, R.; *Laser micro sintering – a new method to generate metal and ceramic parts of high resolution with sub-micrometer powder*. Portugal, VRAP, 2007; p. 491–9.

FERREIRA, J. M. G. C.; ALVES, N. M. F.; MATEUS, A. J. S.; CUSTÓDIO, P. M. C. *Desenvolvimento integrado de produtos e ferramentas por metodologias de engenharia inversa e prototipagem rápida*. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Florianópolis, 2001.

FOUCHE, G.; *Polymer engineering and science. An overview of the basic aspects of polymer adhesion*. Part 1: fundamentals. Centre de Recherche Paul Pascal, France 1995, v. 35, n. 12.

GAARD, A.; KRAKHALEV, P.; BERGSTROM, J.; *Microstructural characterization and wear behaviour of (Fe,Ni)–TiC MMC prepared by DMLS*. J Alloys Comp, 2006, v.421, i.1–2, p.166–71.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B., *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2014.

GORNI, A. A. *Introdução à Prototipagem Rápida e seus Processos*. Revista Plástico Industrial, 2001, p. 230-239.

GOODRIDGE, R.D.; WOOD, D.J.; OHTSUKI, C.; DALGARNO, K.W.; *Biological evaluation of an apatite–mullite glass–ceramic produced via selective laser sintering*. Acta Biomater, 2007, v.3, i.2 p.221–31.

GRAY IV, R.W.; BAIRD, D.G.; BOHN, J.H.; *Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts*. Rapid Proto J, 1998, v.4, i.1, p.14–25.

GREER, C.; MCLAURIN, J.; OGALE, A.A.; *Processing of carbon fiber reinforced composites by three dimensional photolithography*. Texas , In: Proc. SFF, 1996, p.307–11.

GRIMM, T. *Choosing the Right RP System*. A study of seven RP systems, 2005.

GU, D.; SHEN, Y.; *WC–Co particulate reinforcing Cu matrix composites produced by direct laser sintering*. Mater Lett, 2006, v.60, i.29–30, p.3664–8.

GU, D.; SHEN, Y.; ZHAO, L.; XIAO, J.; WU, P.; ZHU, Y.; *Effect of rare earth oxide addition on microstructures of ultra-fine WC–Co particulate reinforced Cu matrix composites prepared by direct laser sintering*. Mater Sci Eng A., 2007; v.445– 446, p.316–22.

GUPTA, A.; OGALE, A.A.; *Dual curing of carbon reinforced photoresins for rapid prototyping*. Polym Compos, 2004, v.23 i.6, p.1162–70.

HALIDI, S. N. A. M. & ABDULLAH, J. *Moisture effects on the ABS used for Fused Deposition Modeling rapid prototyping machine*. IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, Kuala Lumpur, 2012, p.839-843.

HEINZL, J.; HERTZ ,C.H. *Ink-Jet printing. Advances in Electronics and Electron Physics*. Orlando, 1985, v.65, p. 91-171.

HOPKINSON, N.; HAGUE, R.; DICKENS, P. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester, London: John Wiley & Sons, Ltd., 2006.

HYER, MICHAEL W. *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials* 1. Ed. International Editions, 1998.

HYMAN, P.; *Ten disruptive technologies*. Communications of the ACM, 2011 v. 54 i.9, p. 20.

HUDSON, S. *Printing teddy bears: a technique for 3D printing of soft interactive objects*. Proc. CHI, 2014, p.459-468.

JACKSON, T.R.; LIU, H.; PATRIKALAKIS, N.M.; SACHS, E.M.; KIMA, M.J.; *Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control*. Mater Design, 1999, v.20, i.2–3, p.63–75.

JANAKI RAM, G.D.; YANG, Y.; STUCKER, B.E.; *Effect of process parameters on bond formation during ultrasonic consolidation of aluminium alloy 3003*. J Manufact Syst, 2006, v.25, i.3, p.221–38.

KAMITANI, T.; YAMADA, O.; MARUTANI, Y.; *Selective laser sintering with heat of formation by using reactive materials*. SPIE, 2000; v.4088, p.299–302.

KARALEKAS, D.; ANTONIOU, K.; *Composite rapid prototyping: overcoming the drawback of poor mechanical properties*. J Mater Process Technol, 2004, p.153–154:526–30.

KERNAN, B.D.; SACHS, E.M.; *Three dimensional printing of tungsten carbide–cobalt using a cobalt oxide precursor*. Texas, In: Proc. SFF, 2003, p.616–31.

KLOCKE F, WIRTZ H. Selective laser sintering of ceramics. In: Proc. LANE; 1997. p. 589–96.

KLOCKE F, FREYER C. *Quick manufacture, repair and modification of steel moulds suing controlled metal build up (CMB)*. Germany, In: Proc. LANE, 2004, p.579–87.

KLOSTERMAN, D.A.; CHARTOFF, R.P.; OSBORNE, N.R.; GRAVES, G.A.; LIGHTMAN, A.; HAN, G.; et al.; *Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites*. Rapid Proto J, 1999, v.5, i.2, p.61–71.

KONG, C.Y.; SOAR, R.C.; DICKENS, P.M.; *Characterization of aluminium alloys 6061 for the ultrasonic consolidation process*. Mater Sci Eng A, 2003, v.363, i.1–2, p.99–106.

KONG, C.Y.; SOAR, R.C.; DICKENS, P.M.; *Optimal process parameters for ultrasonic consolidation of 3003 aluminium*. J Mater Process Technol, 2004, v.146, i.2, p.181–7.

KONG, C.Y.; SOAR, R.C.; *Fabrication of metal–matrix composites and adaptive composites using ultrasonic consolidation process*. Mater Sci Eng A, 2005, v.412, i.1–2, p.12–8.

KRETSCHKEK. D.; FOGGIATTO, J. A.; VOLPATO, N., *Infiltração de peças fabricadas por tecnologia FDM com resinas poliméricas*. In: 10. Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, 2009.

KUMAR, S.; *Manufacturing of WC–Co Moulds using SLS machine*. J Mater Process Technol, 2009, v.209 p.3840–8.

KUMAR, S.; KRUTH, J.P.; FROYEN, L.; *Wear behaviour of SLS WC–Co composites*. Texas , SFF, 2008. p. 543–57.

LAOUI, T.; FROYEN, L.; KRUTH, J.P.; *Effect of mechanical alloying on selective laser sintering of WC–9CO powder*. Powder Metal, 2000, v.42, i.3, p.203–5.

LAOUI, T.; SHAIK, S.K.; HALL, R.F.; SCHNEIDER, A. *Microfabrication of dental root implants with a porous surface layer by micro-stereolithography*. 2nd International Conference on Advanced Research in Virtual and an Rapid Prototyping. Leiria, Portugal, 2005, p. 47-51.

LENK, R.; NAGY, A.; TECHEL, A.; *Material development for laser sintering of high temperature strength silicon carbide with extern hardness*. Frankfurt, In: Proc. Euro-uRapid, 2003, p.B/4.

LEONG, C.C.; LU, L.; FU, J.Y.H.; WONG, Y.S.; *In-situ formation of copper matrix composites by laser sintering*. Mater Sci Eng A, 2002, v.338, p.81–8.

LEVY G.; SCHINDEL R.; KRUTH J.P., *Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing technologies: state of the art and future perspectives*. Ann CIRP, 2003, v.52, i.2, p.589–609.

LI, X.C.; STAMPFL, J.; PRINZ, F.B.; *Mechanical and thermal expansion behaviour of laser deposited metal matrix composites of Invar and TiC*. Mater Sci Eng A, 2000, v.282, p.86–90.

LIU, W.; DUPONT, J.N.; *Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping*. Scripta Mater, 2003, v.48, p.1337–42.

LÖVGREN, R.; *Product development methods: Leonardo Da Vinci versus modern engineering education*. Department of Innovation, Design and Product development (IDP). Mälardalen University (MdH), Eskilstuna, Sweden, 2002.

LU, L.; FUH, J.; WONG, Y.S.; *Laser-induced materials and processes for rapid prototyping*. Massachusetts, 02061, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001.

MAEDA, K.; CHILDS, T.H.C.; *Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings*. J Mater Process Technol., 2004, v.149, i.1–3 p.609–15.

MASOOD, S.H.; SONG, W.Q.; *Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modeling*. Mater Design, 2004, v.25 p.587–94.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D.; *Composite materials: engineering and science*. London, Chapman & Hall, 1994.

MORVAN, S.; HOCHSMANN, R.; SAKAMOTO, M.; *ProMetal RCT(TM) process for fabrication of complex sand molds and sand cores*. Rapid Prototyping, 2005, v. 11, n. 2, p. 1–7.

NETO, E. S.; *Estudo da Aplicação de Perfis Pultrudados em Projetos Estruturais: Análise, Dimensionamento e Fabricação*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

NOORANI, R.; *Rapid Prototyping—Principles and Applications*, Hoboken, N.J.; John Wiley & Sons, 2006.

ONAGORUWA, S.; BOSE, S.; BANDYOPADHYAY, A.; *Fused deposition of ceramics (FDC) and composites*. Texas , In: Proc. SFF, 2001, p.224–31.

PAHL, G. et al.; *Projeto na Engenharia*. Editora Edgard Blücher, 6ª edição, 2005.

PHAM, D. T.; GAULT, R. S. *A comparision of rapid prototyping technologies*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, n. 38, p. 1257-1287.

RAMBO, C.R.; TRAVITZKY, N.; ZIMMERMANN, K.; GREIL, P.; *Synthesis of TiC/Ti–Cu composites by pressureless reactive infiltration of TiCu alloy into carbon preforms fabricated by 3D-printing*. Mater Lett, 2005, v.59, p.1028–31.

REINHART, T.J.; CLEMENTS, L.L.; *Engineered materials handbook*. Composites, Ohio, ASM International, 1987, v.1, p.27-34.

RODRIGUEZ, J.F.; THOMAS, J.P.; RENAUD, J.E.; *Rapid Prototyping Journal*, 2000, v. 6, Issue 3, p. 175.

ROZENFELD, H.; VALERI, S. G.; *Gerenciamento de projetos*. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/Gerenciam ento_Projetosv2.html>. Acessado em: 20/12/2008.

SELLS, E. A.; *Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine*, Thesis of Doctor of Philosophy. University of Bath, Bath, UK, 2009

SIMCHI, A.; POHL, H.; *Direct laser sintering of iron–graphite powder mixture*. Mater Sci Eng A., 2004, v.383, i.2, p.191–200.

SHISHKOVSKY, IV.; TARASOVA, E.; PETROV, A.; *Synthesis of biocomposite on the base of niti with hydroxyapatite by selective laser sintering*. LANE, 2001, p. 459–64.

SHISHKOVSKII, IV.; TARASOV, E.Y.; ZHURAVEL, L.V.; PETROV, A.L.; *Selective laser sintering in the powder synthesis of a biocomposite based on titanium nickelide and hydroxyapatite*. Tech Phys Lett, 2001, v.27, i.3, p.211–3.

SHOFNER, M.L.; LOZANO, K.; RODRIGUEZ-MARCIAS, F.J.; BARRERA, E.V.; *Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling*. J Appl Polym Sci, 2001, v.89, i.11, p.3081–90.

SLOCOMBE, A.; LI, L.; *Selective laser sintering of TiC—Al₂O₃ composite with self-propagating high-temperature synthesis*. J Mater Process Technol., 2001; v.118, p.173–8.

STEVINSON, B.Y.; BOURELL, D.L.; BEAMAN, J.J.; *Over-infiltration mechanisms in selective laser sintered Si/SiC preforms*. Rapid Proto J, 2008, v.14, i.3, p.149–54.

SUNG-WON, J.; *Seven disruptive innovations for future industries*. SERI Quarterly, 2013, July, p. 94–98.

TAN, K.H.; CHUA, C.K.; LEONG, K.F.; CHEAH, C.M.; CHEANG, P.; ABU BAKAR, M.S. et al.; *Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone– hydroxyapatite biocomposite blends*. Biomaterials, 2003, v.24, p.3115–23.

VANEETVELD, G.; CLARINVAL, A.M.; DORMAL, T.; NOBEN, J.C.; LECOMTE-BECKERS, J.; *Optimization of the formulation and post-treatment of stainless steel for rapid manufacturing*. J Mater Process Technol, 2008; v.196, i.1–3, p.160–4.

VOLPATO, N.; *Os Principais Processos de Prototipagem Rápida*. In: Neri Volpato. (Org.). Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2007.

WEISENSEL, L.; TRAVITZKY, N.; SIEBER, H.; GREIL, P.; *Laminated object manufacturing (LOM) of SiSiC composites*. Adv Eng Mater, 2004, v.6, i.11, p.899–903.

WIKIPEDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solid_Ground_Curing>. Acesso em: 18 out 2013.

WIKIMEDIA COMMONS. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RTM_process.png>. Acesso em: 18 out 2013.

WIRIA, F.E.; LEONG, K.F.; CHUA, C.K.; LIU Y., *Poly-e-caprolactone/hydroxyapatite for tissue engineering scaffold fabrication by selective laser sintering*. Acta Biomater, 2007, v.3, i.1, p.1–12.

WOHLERS, T., *Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry: Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., USA, 2008.

WOHLERS, T. **Wohlers Report 2012**. Fort Collins, USA: Wohlers Associates, 2012.

WOZNY, M. J., *CAD and Interfaces*, JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, 1997, Cap 8.

YAN X., GU P., *A review of rapid prototyping technologies and systems*. Computer-Aided Design, 1996, v. 28, p. 307 – 318.

ZAK, G.; HABERER, M.; PARK, C.B.; BENHABIB, B.; *Mechanical properties of short-fibre layered composites: prediction and experiment*. Rapid Proto J, 2000, v.6, i.2, p.107–18.

ZHAN, Y.; HAN, J.; ZHANG, X.; HE, X.; LI, Z.; DU, S.; *Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials*. Materials Science and Engineering A, 2001, v.299, p.218–24.

ZHONG, W.; LI, F.; ZHANG, Z.; SONG, L.; LI, Z.; *Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling*. Materials Science and Engineering A, 2001, v.301, p.125–30.