

**André Bueno**

**CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO DE  
PRODUTOS SOB MEDIDA UTILIZANDO ENGENHARIA  
REVERSA E MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau  
de mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Carlos H. Ahrens  
Coorientador: Prof. Dr. André Ogliari

Florianópolis  
2012

Bueno, Andre

Contribuições ao Desenvolvimento de Produtos Sob Medida Utilizando Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva / Andre Bueno ; orientador, Prof. Dr. Carlos Henrique Ahrens ; coorientador, Prof. Dr. Andre Ogliari. - Florianópolis, SC, 2012.

157 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Produtos sob medida. 3. Engenharia Reversa. 4. Manufatura Aditiva. 5. Procedimento. I. Henrique Ahrens, Prof. Dr. Carlos. II. Ogliari, Prof. Dr. Andre. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

**CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS  
SOB MEDIDA UTILIZANDO ENGENHARIA REVERSA E  
MANUFATURA ADITIVA**

**André Bueno**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
Sendo aprovada em sua forma final.**

---

Prof. Carlos H. Ahrens, Dr.  
Orientador

---

Prof. André Ogliari, Dr.  
Co-orientador

---

Júlio César Passos, Dr.  
Coordenador do POSMEC

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. João C. Ferreira, Ph.D.

---

Prof. Fernando H. Lafratta, Dr.Eng.

---

Prof. Cristiano V. Ferreira, Dr. Eng.

Ao meu pai, Rubens A. Bueno,  
por todo o apoio dado para que eu  
pudesse chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Aos Professores Carlos Henrique Ahrens e André Ogliari, pela excelente orientação e constante apoio para que esse trabalho pudesse ser concluído.

À direção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, por ter propiciado condições e recursos para a realização desse projeto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro ao trabalho, por meio de bolsa de estudos.

Aos sócios e membros do time da Technosim Engenharia, empresa especializada em simulação do processo de estampagem, Engenharia Reversa, inspeção de produtos e matrizes, dentre outros serviços. Agradecimentos especiais ao Sr. Gustavo Butrico e ao Sr. Henrique de Paula Moreira, Engenheiros e sócios da empresa, e ao Sr. Daniel Suzuki Kudo, Engenheiro de Projetos, por todo o apoio para a realização da etapa de Engenharia Reversa do estudo de caso descrito nessa dissertação, que envolveu a digitalização de uma superfície e a modelagem tridimensional de um produto. A Technosim gentilmente permitiu o acesso a equipamentos e pacotes de *software* especializados, e ainda cedeu preciosas horas de trabalho de seus funcionários.

À equipe da Divisão de Tecnologias Tridimensionais (DT3D) do Centro de Tecnologia da Informação (CTI) Renato Archer, unidade do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Agradecimentos especiais ao Dr. Jorge Vicente Lopes da Silva, Chefe de Divisão, e ao Sr. Marcelo Fernandes de Oliveira, M.Sc., Pesquisador do DT3D, pelo apoio na etapa de Manufatura Aditiva. O CTI gentilmente permitiu acesso a um equipamento de Manufatura Aditiva de última geração, cedeu matéria-prima e preciosas horas de trabalho de seus funcionários para a fabricação do produto desenvolvido para o estudo de caso dessa dissertação.

À querida amiga Sandra Couto Nunes, Fisioterapeuta (CREFITO: 10/34.986-F), por ter me ensinado sobre lesões ortopédicas e formas de tratamento. As informações fornecidas por ela foram essenciais para a elaboração do estudo de caso apresentado nesse trabalho.

A Rubiani Viera, uma talentosa Publicitária e uma das pessoas mais amáveis e generosas com quem tive o prazer de conviver, pela grande ajuda com a edição de várias imagens apresentadas neste trabalho.

Aos colegas do grupo de pesquisas/laboratório CIMJECT pelo companheirismo e por diversas dicas úteis para a realização da minha pesquisa – Janaína Lisi Leite Howarth, Priscila Klauss, Aurélio da Costa Sabino Neto, Fernando Luís Peixoto, Alessandra Fortuna Neves, Rodrigo Acácio Paggi, Luiz Fernando Vieira, Ruben Eger, Manoella Reis Carneduto, Nathalia Fernandes, Andre Alexei Germanovix, Gustavo Rhuan Pereira, Guilherme Apolinário Testoni, Ricardo Brandes, Everson Fernandes, Rafael Pacheco e Aldren Henrique Alves.

Ao caro Dr. Antonio Luiz Pacifico, meu professor durante a graduação em Engenharia, no Instituto Mauá de Tecnologia, pelo incentivo para que eu cursasse o mestrado.

Ao meu pai, Rubens Bueno, e aos meus queridos irmãos, Raquel Bueno e Felipe Bueno, pelo apoio em momentos difíceis. Sem estes apoios, este projeto não poderia ter sido concluído.

"Sente-se, qual uma criança, diante de um fato; disponha-se a abandonar qualquer ideia preconcebida,... ou não aprenderá coisa alguma."

– Thomas Huxley

## RESUMO

Em decorrência de mudanças no perfil do consumidor, a demanda por produtos personalizados têm crescido significativamente nos últimos anos, o que tem estimulado as empresas de determinados segmentos da indústria, em especial do setor de bens de consumo, a promoverem mudanças significativas em seus processos de fabricação. Tais mudanças resultaram num modelo de manufatura conhecido como Personalização em Massa, que permite a fabricação de produtos em pequenas quantidades – ou até mesmo únicos – com custos similares aos obtidos com a Produção em Massa. Mais recentemente, novas tecnologias introduzidas nos processos de projeto e fabricação de produtos, como Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva, permitiram que avanços ainda maiores pudessem ser feitos com relação à personalização. Pelo fato do uso das tecnologias de Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva para a fabricação de produtos personalizados em massa ainda estar em estágios iniciais de desenvolvimento, estudos abordando a modelagem e a padronização de processos de desenvolvimento de produtos dentro desse contexto vem despertando o interesse de pesquisadores. Buscando promover avanços neste campo, é apresentada aqui uma nova proposta de procedimento para a personalização de produtos, gerada com base em um estudo de caso.

**Palavras-Chave:** Engenharia Reversa; Manufatura Aditiva; Personalização em Massa; Procedimento; Desenvolvimento Integrado de Produtos.



## ABSTRACT

Due to changes in the consumer profiles, the demand for custom made products – products that meet specific needs of a given consumer – have been growing significantly in the last years, what has fostered companies of some market segments – consumer market in special – to promote changes in their manufacturing processes. Those changes resulted in a model of manufacturing known as Mass Customization, which allows the production of small lots or even single products with costs similar to those obtained in the Mass Production model. More recently, new technologies introduced in the design and fabrication of products, such as Reverse Engineering and Additive Manufacturing, allowed even bigger advances in the customization of products. Considering that the use of those technologies for the customization of products is in its early stages, this topic has attracted a lot of interest from researchers. With the objective of fulfilling some gaps in this field, a systematic for the personalization of products is introduced. This proposal was based in a case study and is aligned with the reference model for integrated product development put forth by the research group called *Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos* (NEDIP), of the Federal University of *Santa Catarina*.

**Keywords:** Reverse Engineering; Additive Manufacturing; Mass Customization; Procedure; Integrated Product Development.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo de registro de dados .....	22
Figura 2.2 – Amostragem de pontos .....	23
Figura 2.3 – Digitalização de um produto por meio de equipamento de contato.....	24
Figura 2.4 – Apalpadores acoplados a diferentes equipamentos.....	25
Figura 2.5 – Operação de escaneamento de um modelo de carro em escala utilizando um equipamento sem contato .....	26
Figura 2.6 – Escâneres desenvolvidos para a digitalização do corpo humano ou de suas partes.....	27
Figura 2.7 – Métodos de triangulação.....	28
Figura 2.8 – Técnica de luz estruturada – Diferentes padrões de luz utilizados .....	29
Figura 2.9 – Aquisição de imagem através da técnica de luz estruturada, utilizando um padrão de linha .....	30
Figura 2.10 – Princípio de funcionamento de um escâner TC .....	31
Figura 2.11 – Etapas do processo de Manufatura Aditiva .....	33
Figura 2.12 – Representação esquemática do processo SLA .....	37
Figura 2.13 – Representação esquemática do processo de Sinterização a Laser.....	38
Figura 2.14 – Representação esquemática do processo FDM.....	41
Figura 2.15 – Ilustração esquemática do processo de Projeção de Máscara.....	43
Figura 2.16 – Representação esquemática do processo 3DP baseado no uso de aglutinantes.....	44
Figura 2.17 – Acolchoado sob medida de capacete para motociclistas fabricado por meio de tecnologia AM. ....	53
Figura 2.18 – Métodos de Verificação Auxiliada por Computador .....	56
Figura 2.19 – Representação esquemática do processo de criação de capacetes personalizados.....	57
Figura 2.20 – Modelo do processo de criação de produtos sob medida desenvolvido pelo grupo de pesquisas de Loughborough.....	58
Figura 3.1 – Representação gráfica do modelo PRODIP .....	63
Figura 3.2 – Tecnologias de imobilização .....	64
Figura 3.3 – Matriz da Casa da Qualidade.....	68
Figura 3.4 – Esboço do sistema de imobilização .....	75
Figura 3.5 – Conjunto de cinto e fivela.....	76
Figura 3.6 – Pacientes imobilizados com aparelhos gessados (gesso sintético) com acolchoado Gore Procel desempenhando atividades em contato com água .....	77

Figura 3.7 – Aplicação do acolchoado Gore Procel.....	77
Figura 3.8 – Ilustração do princípio de funcionamento do acolchoado Gore Procel.....	78
Figura 3.9 – Escâner tridimensional utilizado para o processo de digitalização .....	79
Figura 3.10 – Captura de dados através de escâner 3D de luz estruturada.....	79
Figura 3.11 – Targets utilizados para facilitar o processo de alinhamento de nuvens de pontos .....	80
Figura 3.12 – Tela do software Forma 4 .....	80
Figura 3.13 – Furos na malha STL provocados pela presença de targets.....	81
Figura 3.14 – Falhas na malha STL .....	82
Figura 3.15 – Malha de triângulos no padrão STL após correção de falhas .....	82
Figura 3.16 – Modelo 3D formado por superfícies no padrão NURBS	83
Figura 3.17 – Modelo de perna .....	83
Figura 3.18 – Modelo 3D da bota visto de diferentes ângulos .....	84
Figura 3.19 – Modelo 3D da bota sobre a perna .....	85
Figura 3.20 – Tenacidade a Fratura versus Módulo de Young .....	86
Figura 3.21 – Tela do software CES EduPack 2005 .....	87
Figura 3.22 – Equipamento de Sinterização a Laser modelo HiQ .....	91
Figura 3.23 – Orientação do produto na câmara de construção .....	92
Figura 3.24 – Carcaça da bota fabricada por meio da tecnologia LS....	92
Figura 3.25 – Detalhes da base da bota e do solado.....	93
Figura 3.26 – Equipamento de impressão 3D modelo Connex 350 .....	95
Figura 3.27 – Sola fabricada em material elastomérico utilizando a tecnologia 3DP.....	95
Figura 3.28 – Bota calçada por uma pessoa .....	96
Figura 4.1 – Fase: Engenharia Reversa e Aprovação Auxiliada por Computador – Fluxo de atividades.....	100
Figura 4.2 – Fase: Fabricação - Fluxo de atividades.....	101
Figura A.1 – Dutos de ar fabricados pela Boeing por meio da tecnologia LS .....	147
Figura A.2 – Componentes de helicópteros fabricados através da tecnologia LS. ....	148
Figura A.3 – Componente de painel automotivo fabricado pela Bentley utilizando a tecnologia LS.....	148
Figura A.4 – Aparelhos auditivos fabricados por meio da tecnologia SLA .....	149

Figura A.5 – Componentes para restaurações dentais fabricados em CoCr por meio da tecnologia DMLS .....	150
Figura A.6 – Implante ortopédico fabricado por meio da tecnologia EBM.....	151
Figura A.7 – Boneco de um personagem do jogo eletrônico World of Warcraft, .....	151
Figura A.8 – Chuteira Assassin, produzida pela empresa P2L utilizando a tecnologia LS para a fabricação da sola .....	152
Figura A.9 – Luminária fabricada pela empresa MGX utilizando tecnologia AM .....	153
Figura B.1 – Imobilização gessada de membro inferior .....	154
Figura B.2 – Tutor plástico para imobilização de membro inferior.....	155
Figura B.3 – Bota imobilizadora.....	157

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens dos equipamentos de contato e sem contato.....	32
Quadro 2.2 – Exemplos de produtos fabricados por meio de tecnologias de Manufatura Aditiva .....	45
Quadro 2.3 – Resumo da avaliação dos procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough .....	60
Quadro 3.1 – Vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias de imobilização .....	65
Quadro 3.2 – Requisitos do usuário .....	66
Quadro 3.3 – Requisitos de Projeto.....	67
Quadro 3.4 – Requisitos de projeto priorizados .....	69
Quadro 3.5 – Especificações de projeto .....	70
Quadro 3.6 – Soluções alternativas .....	72
Quadro 3.7 – Concepções alternativas .....	73
Quadro 3.8 – Matriz de Pugh .....	73
Quadro 3.9 – Descrição da concepção selecionada.....	74
Quadro 3.10 – Tecnologias AM versus materiais .....	88
Quadro 3.11 – Propriedades mecânicas de dois graus de Poliamida para LS .....	89
Quadro 3.12 – Matriz de Pugh utilizada para a seleção do material para a carcaça.....	90
Quadro 3.13 – Propriedades físicas do material DuraForm Flex Plastic .....	94
Quadro 4.1 – Fase: Engenharia Reversa e Aprovação Auxiliada por Computador.....	102
Quadro 4.2 – Fase: Fabricação .....	103
Quadro 4.3 – Resumo da avaliação .....	132

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 0D** – Adimensional
- 2D** – Bidimensional
- 3D** – Tridimensional
- ABS** – Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
- AM** – *Additive Manufacturing* (Manufatura Aditiva)
- CAD** – *Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)
- CAE** – *Computer Aided Engineering* (Engenharia Assistida por Computador)
- CAV** – *Computer Aided Verification* (Verificação Auxiliada por Computador)
- CNC** – Comando Numérico Computadorizado
- DFMA** – *Design for Manufacturing and Assembly* (Projeto para Fabricação e Montagem)
- DLP** – *Digital Light Processing* (Processamento Digital de Luz)
- DMLS** – *Direct Metal Laser Sintering* (Sinterização Direta de Metais a Laser)
- DXF** – *Drawing Exchange Format* (Formato de Troca de Desenhos)
- EBM** – *Electron Beam Melting* (Fusão por Feixe de Elétrons)
- FDM** – *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Fusão e Deposição)
- FEA** – *Finite Element Analysis* (Análise por Elementos Finitos)
- IDEF0** – *Integrated Definition for Function Modeling*
- IGES** – *Initial Graphics Exchange Specification* (Especificação Inicial de Troca de Gráficos)
- LS** – *Laser Sintering* (Sinterização a Laser)
- MC** – *Mass Customization* (Personalização em Massa)
- MMC** – Máquina de Medição por Coordenadas
- NURBS** – *Non Uniform Rational B-Splines* (B-Splines Racionais Não Uniformes)
- PA** – Poliamida
- PC** – Policarbonato
- PEEK** – Poliéter-éter-cetona
- PEI** – Poliéter-imida
- PPP** – *Plastic Powder Printing* (Impressão de Pó de Plástico)
- PPSU** – Polifenilsulfona
- PS** – Poliestireno
- PSU** – Polisulfona
- QFD** – *Quality Function Deployment* (Desdobramento da Função Qualidade)

**RE** – *Reverse Engineering* (Engenharia Reversa)

**RM** – Ressonância Magnética

**SLA** – *Stereolithography Apparatus* (Aparato de Estereolitografia)

**SLM** – *Selective Laser Melting* (Fusão Seletiva a Laser)

**STEP** – *Standard for the Exchange of Product model data* (Padrão para a troca de dados do modelo do produto)

**STL** – *Standard Tessellation Language* (Linguagem Padrão de Tesselação)

**TC** – Tomografia Computadorizada

**UAS** – *Unmanned Aircraft Systems* (Aeronaves Não Tripuladas)

**USP** – *United States Pharmacopoeia* (Farmacopeia dos Estados Unidos)

**UV** – Ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\theta$  – Ângulo de incidência de fonte de luz sobre objeto a ser escaneado
- $P_i$  – Ponto iluminado
- $F$  – Comprimento focal da câmera
- $L$  – Distância entre fonte de luz e câmera
- $P$  – Coordenada da imagem de  $P_i$
- $T_m$  – *Melt Temperature* (Temperatura de Fusão)
- $T_g$  – *Glass Transition Temperature* (Temperatura de Transição Vítreia)
- $\mu m$  – Micrômetro
- $mm$  – Milímetro
- $M_3$  – Índice de mérito utilizado para escolha de materiais sujeitos a altas deformações
- $K_{IC}$  – Tenacidade a Fratura
- $E$  – Módulo de Elasticidade
- $C_e$  – Comprimento efetivo da corda a ser aplicado nos pequenos detalhes do modelo
- $R$  – Raio do menor detalhe do modelo
- $D$  – Maior diagonal do paralelepípedo que envolve completamente o modelo
- $\alpha$  – Ângulo de controle
- $C$  – Comprimento da corda



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS .....	17
1.2	OBJETIVO E QUESTÕES ORIENTATIVAS PARA A PESQUISA.....	19
1.3	CONTEÚDO .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1	ENGENHARIA REVERSA.....	21
2.1.1	<i>Processo generalizado de Engenharia Reversa</i> .....	22
2.1.2	<i>Equipamentos para aquisição de dados</i> .....	24
2.2	MANUFATURA ADITIVA .....	32
2.2.1	<i>Processo de Manufatura Aditiva</i> .....	33
2.2.2	<i>Tecnologias de Manufatura Aditiva</i> .....	36
2.2.3	<i>Exemplos de aplicações de diferentes tecnologias AM</i> .....	45
2.2.4	<i>O impacto da Manufatura Aditiva no processo de desenvolvimento de produtos</i> .....	46
2.3	PERSONALIZAÇÃO EM MASSA.....	48
2.4	RELAÇÕES ENTRE PERSONALIZAÇÃO EM MASSA, MANUFATURA ADITIVA E ENGENHARIA REVERSA .....	50
2.5	PROCEDIMENTOS PARA PERSONALIZAÇÃO DE AJUSTE E CONFORTO.....	52
2.5.1	<i>Projeto Custom-Fit</i> .....	53
2.5.2	<i>Grupo de Pesquisas em Manufatura Aditiva da Universidade Loughborough</i> .....	57
2.5.3	<i>Avaliação e considerações sobre os procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough</i> .....	59
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>63</b>
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO.....	63
3.2	PROJETO INFORMACIONAL.....	64
3.2.1	<i>Análise das tecnologias de imobilização existentes</i> .....	65
3.2.2	<i>Determinação dos requisitos e especificações de projeto</i> .....	66
3.3	PROJETO CONCEITUAL.....	71
3.4	PROJETO PRELIMINAR.....	75
3.4.1	<i>Sistema de fechamento</i> .....	76
3.4.2	<i>Acolchoado hidrofóbico e com alta permeabilidade ao vapor e ao oxigênio</i> .....	76
3.4.3	<i>Carcaça</i> .....	78
3.4.4	<i>Solado</i> .....	93
3.4.5	<i>Considerações finais sobre o estudo de caso</i> .....	96

<b>4</b>	<b>PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA PERSONALIZAÇÃO DE AJUSTE E CONFORTO .....</b>	<b>99</b>
4.1	PRIMEIRA FASE: ENGENHARIA REVERSA E APROVAÇÃO AUXILIADA POR COMPUTADOR.....	104
4.1.1	<i>Etapa 1.1: Captura de dados.....</i>	<i>104</i>
4.1.2	<i>Etapa 1.2: Tratamento de dados e geração de modelo 3D.....</i>	<i>106</i>
4.1.3	<i>Etapa 1.3: Aprovação Auxiliada por Computador.....</i>	<i>113</i>
4.2	SEGUNDA FASE: FABRICAÇÃO .....	123
4.2.1	<i>Etapa 2.1: Planejamento e Ajustes de Processo.....</i>	<i>123</i>
4.2.2	<i>Etapa 2.2: Manufatura Aditiva e Operações Secundárias.....</i>	<i>127</i>
4.2.3	<i>Etapa 2.3: Qualidade e meio-ambiente.....</i>	<i>129</i>
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCEDIMENTO PROPOSTO .....	131
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>135</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	135
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	136
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>137</b>
	<b>APÊNDICE A – EXEMPLOS DE PRODUTOS FABRICADOS POR MÉTODOS ADITIVOS .....</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE B – TECNOLOGIAS DE IMOBILIZAÇÃO.....</b>	<b>154</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

O consumidor moderno está cada vez mais orientado ao *design* e demonstra uma crescente preocupação com qualidade e funcionalidade, o que gera demanda por produtos duráveis e confiáveis que correspondam exatamente as suas necessidades específicas. Em particular, consumidores com grande poder aquisitivo se preocupam em expressar sua personalidade por meio de produtos exclusivos. Por esses motivos, muitas empresas são estimuladas a criar linhas de produtos com uma variedade muito grande ou até mesmo a desenvolver produtos únicos personalizados (REICHWALD, PILLER e MÖSLEIN, 2000).

Para atender esse perfil de consumidor, um novo modelo de manufatura e serviços foi desenvolvido e tem sido adotado por muitas empresas. Esse modelo é conhecido como Customização ou Personalização em Massa (MC, do inglês *Mass Customization*). O objetivo deste modelo é a produção de bens e serviços que atendam as necessidades de cada consumidor com custos similares aos obtidos no modelo de Produção em Massa (GODINHO FILHO e FERNANDES, 2006; MACHADO E MORAES, 2008; FETTERMANN E ECHEVESTE, 2010).

A implementação da Personalização em Massa é baseada no potencial oferecido por novas tecnologias e sistemas de manufatura – produção integrada por computador e sistemas flexíveis de manufatura – que minimizam o impacto da maior variedade de produtos sobre a produtividade e os custos (GODINHO FILHO e FERNANDES, 2006; MACHADO e MORAES, 2008; FETTERMANN e ECHEVESTE, 2010)

Embora, no geral, as tecnologias tradicionais de fabricação estejam cada vez mais flexíveis, algumas delas ainda apresentam uma série de limitações que dificultam o avanço da Personalização em Massa. Em especial as tecnologias que requerem o desenvolvimento e a construção de ferramental específico para um determinado produto, como estamparia, fundição, e moldagem por injeção. O tempo de desenvolvimento deste tipo de ferramenta normalmente é consideravelmente alto e o seu custo elevado, o que inviabiliza a fabricação de produtos únicos ou mesmo em pequenas escalas.

Pesquisadores e também profissionais da indústria têm proposto o uso de tecnologias de Manufatura Aditiva (AM, do inglês *Additive*

*Manufacturing*) para solucionar este problema (REEVES, TUCK e HAGUE, 2011).

As tecnologias de Manufatura Aditiva, ou os métodos aditivos de fabricação, tais como Sinterização Seletiva (LS, do inglês *Laser Sintering*), ou Modelagem por Fusão e Deposição (FDM, do inglês *Fused Deposition Modeling*), são mais conhecidas por sua aplicação na confecção de protótipos rápidos. Sua aplicação como método de fabricação de produtos tem sido restrita devido a certas limitações das tecnologias utilizadas até períodos recentes, como baixa repetitividade e precisão, pequeno leque de opções de materiais e baixas propriedades mecânicas das peças. Entretanto, a evolução de algumas destas tecnologias nos últimos anos tornou possível a fabricação de produtos funcionais de alta qualidade com curtos ciclos de produção e custos competitivos (SANTOS *et al.*, 2006; WAURZYNIAK, 2006; 2007).

Devido à natureza das tecnologias de Manufatura Aditiva – adição de materiais ao invés de remoção – e por não requerer ferramental específico para cada produto, elas oferecem uma série de vantagens para a fabricação de produtos funcionais, como flexibilidade de projeto, redução drástica de custos para fabricação de produtos em pequenas séries e até de produtos únicos, além de redução nos tempos de lançamento de novos produtos no mercado. Estas vantagens são diretamente proporcionais ao grau de complexidade das geometrias fabricadas (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006).

De fato, a viabilidade do uso de tecnologias de Manufatura Aditiva para a fabricação de produtos em pequena escala e de produtos únicos e personalizados já foi demonstrada. Vários casos práticos de aplicações destas tecnologias como métodos de fabricação em escala comercial são relatados na literatura científica e na imprensa especializada, em especial nas indústrias aeroespacial, médica e de bens de consumo. Acredita-se que sua disseminação na indústria em geral ocorrerá com a evolução e redução de custo dos equipamentos e de tecnologias associadas, como Engenharia Reversa (RE, do inglês *Reverse Engineering*) e sistemas de Projeto e Engenharia Assistidos por Computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design* e CAE, do inglês *Computer Aided Engineering*) (GIBSON, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006).

Uma vez que a aplicação das tecnologias de Manufatura Aditiva para a fabricação de produtos personalizados ainda está em estágios iniciais de desenvolvimento, este é um campo em que há muitas oportunidades para pesquisas acadêmicas. E um dos temas ainda pouco explorados é a criação de procedimentos padronizados para a

personalização de produtos dentro desse contexto. Mais especificamente, personalização do tipo “ajuste e conforto”, ou seja, fabricação de produtos sob medida para um determinado usuário, conforme a classificação de processos de personalização proposta por Piller (2004), detalhada no Capítulo 2, Tópico 2.3. De acordo com Tuck (2007):

*O desenvolvimento de um processo padronizado para a fabricação de produtos sob medida é de grande importância, especialmente com relação a aplicações futuras. Poucos trabalhos existem com respeito à manipulação de dados pessoais e a sua incorporação em produtos. Sem uma padronização, componentes que são comercializados como sob medida podem não atender as necessidades dos clientes da forma que se espera ou se deseja.*

Uma revisão preliminar da literatura revelou que determinados pontos de procedimentos de personalização de ajuste e conforto existentes, desenvolvidos por grupos de pesquisa internacionais especializados neste tema, poderiam ser aprofundados ou mais bem detalhados. Além disto, não foram identificados procedimentos para este fim em língua portuguesa durante esta revisão.

## 1.2 OBJETIVO E QUESTÕES ORIENTATIVAS PARA A PESQUISA

Com base no exposto no tópico 1.1, estabeleceu-se como objetivo geral desta dissertação a criação de um procedimento para a personalização de ajuste e conforto de produtos utilizando tecnologias de Engenharia Reversa e de Manufatura Aditiva detalhado no nível de tarefas. Para guiar este trabalho, as seguintes questões orientativas de pesquisa foram estabelecidas:

- Como organizar apropriadamente os passos para personalizar um produto para um determinado usuário utilizando tecnologias de Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva?
- Quais as principais orientações para a equipe de projeto nesta operação, tendo em vista os conhecimentos de Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva?

### 1.3 CONTEÚDO

A dissertação é composta de cinco Capítulos – introdução, revisão bibliográfica, estudo de caso, proposta de procedimento para personalização de produtos e conclusões e sugestões para trabalhos futuros. No Capítulo dois são apresentados os fundamentos teóricos sobre determinadas tecnologias disponíveis para a fabricação de produtos personalizados, como Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva, além de conceitos sobre o modelo de produção conhecido como Personalização em Massa. Ainda no Capítulo dois é apresentada uma revisão de pesquisas acadêmicas relacionadas ao tema central deste trabalho. No Capítulo três é descrito o estudo de caso que foi conduzido com o objetivo de gerar subsídios para a proposta de procedimento de personalização. No Capítulo quatro a proposta de procedimento é descrita de forma detalhada. No Capítulo cinco são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo são apresentados os fundamentos teóricos sobre duas tecnologias disponíveis para o projeto e a fabricação de produtos personalizados ou, mais especificamente, sob medida – Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva –, além de conceitos sobre o modelo de produção conhecido como Personalização em Massa. Posteriormente, são estabelecidas as relações entre estas tecnologias e o modelo de Personalização em Massa. Além disso, é apresentada uma revisão de pesquisas acadêmicas relacionadas ao tema central deste trabalho.

### 2.1 ENGENHARIA REVERSA

A Engenharia Reversa pode ser definida como o processo de geração de um modelo CAD a partir de um conjunto de pontos no espaço tridimensional (3D) capturados de um objeto através de técnicas de digitalização (RAJA, 2008).

A Engenharia Reversa tem sido utilizada com sucesso por vários anos em diversas indústrias, como uma forma de acelerar o processo de desenvolvimento de produtos. A seguir são listadas aplicações típicas da RE (RAJA, 2008):

- Fabricação de peças de reposição para produtos descontinuados;
- Fabricação ou reforma de produtos cujos desenhos e modelos originais foram perdidos;
- Inspeção ou controle de qualidade – comparando uma peça fabricada com o respectivo modelo gerado em um sistema CAD ou com uma peça padrão;
- Reengenharia de um produto baseado nas condições de uso;
- Estudo de produtos concorrentes;
- Geração de modelos computacionais a partir de modelos feitos a mão;
- Fabricação de produtos sob medida, i.e. fabricados de acordo com a anatomia de um único ser humano;
- Fabricação de modelos de partes do corpo humano para auxílio em procedimentos médicos, como em cirurgias.

O processo generalizado de Engenharia Reversa e os equipamentos comumente utilizados para aquisição de dados são descritos nas seções a seguir.

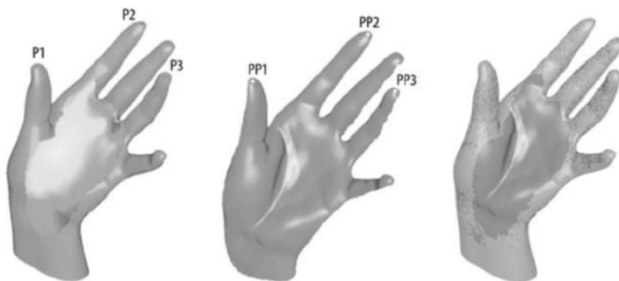
### 2.1.1 Processo generalizado de Engenharia Reversa

O processo generalizado de Engenharia Reversa pode ser dividido em três fases – Escaneamento, processamento dos pontos e desenvolvimento do modelo geométrico.

Na fase de **escaneamento**, seleciona-se a técnica mais adequada, prepara-se o objeto a ser digitalizado e realiza-se o escaneamento efetivamente, com o objetivo de capturar informações que descrevem todas as características geométricas do objeto, como degraus, furos, ressaltos, etc. Escâneres tridimensionais são utilizados para essa operação. Uma nuvem de pontos é gerada, a partir da qual será criada uma superfície que definirá a geometria do objeto no modelo digital (BOEHLER *et al.*, 2002; LERCH, MACGILLIVRAY e DOMINA, 2006; RAJA, 2008).

Na fase de **processamento dos pontos** é realizada a fusão de conjuntos de dados obtidos em diferentes sequências de escaneamento de um mesmo objeto, como ilustrado na Figura 2.1. Este processo é conhecido como **registro dos dados**. Isso se faz necessário em determinadas situações, como no caso de escaneamento de objetos de grandes dimensões e/ou de geometria complexa, para garantir que os dados de todas suas *features* tenham sido capturados (BOEHLER *et al.*, 2002; LERCH, MACGILLIVRAY e DOMINA, 2006; RAJA, 2008).

**Figura 2.1 – Processo de registro de dados**



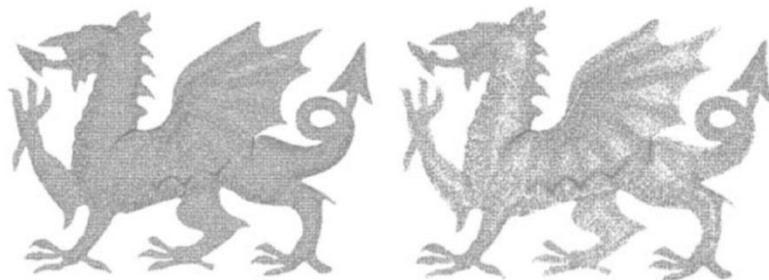
Esquerda: Primeira nuvem de pontos; Centro: Segunda nuvem de pontos; Direita: 1ª e 2ª nuvens de pontos fundidas.

Fonte: Pham e Hieu (2008)



Nessa fase também é feita a redução do nível de ruído nos dados coletados e a redução do número de pontos – processo conhecido como **amostragem de pontos** – como ilustrado na Figura 2.2. Estas tarefas são desempenhadas usando um conjunto de filtros pré-definidos. Diferentes tarefas irão requerer diferentes filtros (BOEHLER *et al.*, 2002; LERCH, MACGILLIVRAY e DOMINA, 2006; RAJA, 2008).

**Figura 2.2 – Amostragem de pontos**



Esquerda: Nuvem de pontos original. Direita: Nuvem de pontos após processo de amostragem – menor ruído e número de pontos

Fonte: Pham e Hieu (2008)

O planejamento da captura de dados em várias etapas tem um impacto importante no processo como um todo. Um bom planejamento irá reduzir o esforço requerido na fase de processamento e também evitar a introdução de erros no momento de fundir os dados. Pacotes de *software* bastante sofisticados estão disponíveis atualmente para acelerar esse processo. O resultado das operações realizadas nessa fase é uma nuvem de pontos limpa e com os pontos de diferentes tomadas alinhados (BOEHLER *et al.*, 2002; LERCH, MACGILLIVRAY e DOMINA, 2006; RAJA, 2008).

Na fase de **desenvolvimento do modelo geométrico** é gerado um modelo CAD a partir da nuvem de pontos. Esta é provavelmente a atividade mais complexa no processo de RE. Algoritmos complexos para a criação de superfícies são necessários para representar com fidelidade os dados coletados da geometria de um produto. A maioria dos sistemas de CAD disponíveis atualmente no mercado não são adequados para a visualização e processamento de números muito grandes de pontos. Como resultado, módulos de RE ou pacotes de *software* especializados normalmente são requeridos. Nesta fase são conduzidas diferentes operações como redução de ruídos e limpeza,

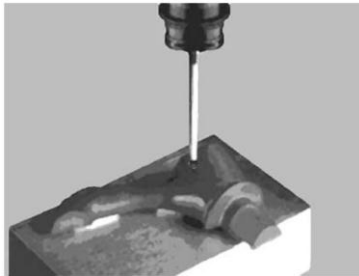
eliminação de *features*, controle e edição de contornos, dentre outras, objetivando a geração de um modelo 3D otimizado, i.e. um modelo que represente adequadamente a superfície escaneada com mínimo custo computacional, em um formato pré-definido, que pode ser lido em diferentes pacotes de *software* CAD, como IGES (do inglês *Initial Graphics Exchange Specification*) ou STEP (do inglês *Standard for the Exchange of Product model data*) (BOEHLER *et al.*, 2002; LERCH, MACGILLIVRAY e DOMINA, 2006; RAJA, 2008).

### 2.1.2 Equipamentos para aquisição de dados

Os equipamentos para aquisição de dados podem ser classificados em dois grupos: Equipamentos de contato e Equipamentos sem contato (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

As tecnologias de RE baseadas em **equipamentos de contato** utilizam apalpadores, como o mostrado na Figura 2.3, acoplados a diferentes tipos de equipamentos, como Braços Mecânicos ou Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC), para digitalizar uma superfície (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

**Figura 2.3 – Digitalização de um produto por meio de equipamento de contato**



Fonte: Raja (2008).

Os métodos de contato podem ser divididos em dois subgrupos: Captação ponto-a-ponto, através de apalpadores de contato, e captação análoga, através de apalpadores digitalizadores.

Na técnica de **captação ponto-a-ponto**, um apalpador acionado por contato acoplado a um Braço Mecânico ou a uma Máquina de Medição por Coordenadas, como mostrado na Figura 2.4, é utilizado para captar as coordenadas de pontos em uma superfície. Um Braço Mecânico Articulado acoplado a um apalpador de contato permite

múltiplos graus de liberdade para a coleta de dados. Uma Máquina de Medição por Coordenadas pode ser programada para seguir um caminho ao longo de uma superfície e permite medições mais precisas que as obtidas com um braço articulado, entretanto sua construção impõe restrições para a digitalização de superfícies complexas (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

Na técnica de **captação análoga**, um apalpador de digitalização – acoplado a um Braço Mecânico, a uma MMC ou a uma máquina de Comando Numérico Computadorizado (CNC) – é utilizado para a captação de coordenadas de pontos de uma superfície. O apalpador de digitalização fornece como dado de saída a deflexão da sua ponta que, combinada com a posição do cabeçote da máquina, permite derivar coordenadas espaciais da superfície. Quando realizando a digitalização, a ponta do apalpador entra em contato com a superfície do objeto a ser escaneado e então se move através de uma trajetória previamente programada, sempre em contato com a superfície. A velocidade de escaneamento no método análogo é até três vezes superior à obtida no método ponto-a-ponto (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

**Figura 2.4 – Apalpadores acoplados a diferentes equipamentos**



Esquerda: Braço Articulado. Direita: MMC.

Fonte: Pham e Hieu (2008).

Nos **equipamentos sem contato**, fontes de energia – luz, som ou campos magnéticos – são projetadas sobre um objeto e imagens 2D de secções, ou nuvens de pontos, são geradas através da observação do

reflexo ou da transmissão destas fontes. As coordenadas da superfície de um objeto são calculadas por meio de algoritmos para processamento de imagens (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008). Na Figura 2.5 é ilustrado o processo de escaneamento utilizando um equipamento sem contato.

**Figura 2.5 – Operação de escaneamento de um modelo de carro em escala utilizando um equipamento sem contato**



Fonte: Raja (2008)

Escâneres sem contato têm sido utilizados não somente em aplicações industriais, mas também nos setores de bens de consumo e médico, para digitalizar partes do corpo humano, ou o corpo como um todo. Entretanto, a realização desse processo utilizando escâneres sem contato convencionais pode ser cansativo e tedioso para o cliente. Embora o tempo de escaneamento normalmente não tome mais que poucos minutos, se manter imóvel durante esse processo não é uma tarefa fácil para algumas pessoas e mesmo pequenos movimentos podem comprometer a qualidade da digitalização. Escâneres especializados, desenvolvidos inicialmente com foco na fabricação sob medida de roupas e calçados, têm sido utilizados para facilitar e acelerar esse processo (D'APUZZO, 2007; TRELEAVEN e WELLS, 2007), como os mostrados na Figura 2.6.

**Figura 2.6 – Escâneres desenvolvidos para a digitalização do corpo humano ou de suas partes.**



Esquerda: Corpo inteiro. Centro: Cabeça. Direita: Pé e tornozelo.

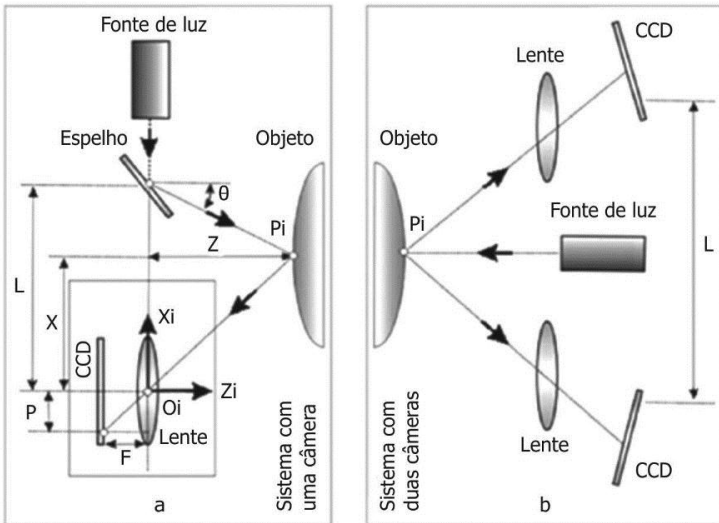
Fonte: D'apuzzo (2007).

Os equipamentos sem contato utilizam diferentes técnicas para a captura de dados. As mais importantes, com foco na fabricação de produtos sob medida, são as técnicas ópticas e as técnicas transmissivas. Dentre as técnicas óticas, as mais frequentemente utilizadas para o escaneamento de objetos e de partes do corpo humano são: Triangulação e Luz Estruturada.

**Triangulação** é um método que emprega localizações e ângulos entre fontes de luz de alta energia, como laser, e dispositivos fotossensíveis (câmeras CCD – *charge-coupled device*) para calcular coordenadas. A maioria dos escâneres laser usa triangulação geométrica para determinar as coordenadas da superfície de um objeto (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

A Figura 2.7 mostra duas variações da técnica de triangulação usando câmeras CCD: com uma ou duas câmeras. Em um sistema com uma só câmera, um dispositivo projeta um ponto ou uma linha de luz no objeto em um ângulo definido. A câmera detecta a posição do ponto ou linha refletida na superfície. Em um sistema com duas câmeras, o projetor de luz não é envolvido na medição. Um ponto, linha ou padrões de luz são utilizados nesse modo de digitalização (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

**Figura 2.7 – Métodos de triangulação: (a) Arranjo com uma câmera; (b) Arranjo com duas câmeras**



Fonte: Pham e Hieu (2008).

O princípio do método de triangulação é ilustrado na Figura 2.7a. Uma fonte de luz de alta energia é focada e projetada em um ângulo pré-determinado ( $\theta$ ) na superfície de um objeto. Um dispositivo fotossensível capta o reflexo do ponto iluminado na superfície. A posição do ponto iluminado ( $P_i$ ) com relação ao sistema de coordenadas da câmera pode ser calculada por meio da equação 2.1:

$$Z = \frac{F \cdot L}{P + F \tan \theta} \quad (2.1)$$

Onde:

F = Comprimento focal da câmera.

L = Distância (L) entre a fonte de luz e a câmera (conhecida a partir da calibração do sistema).

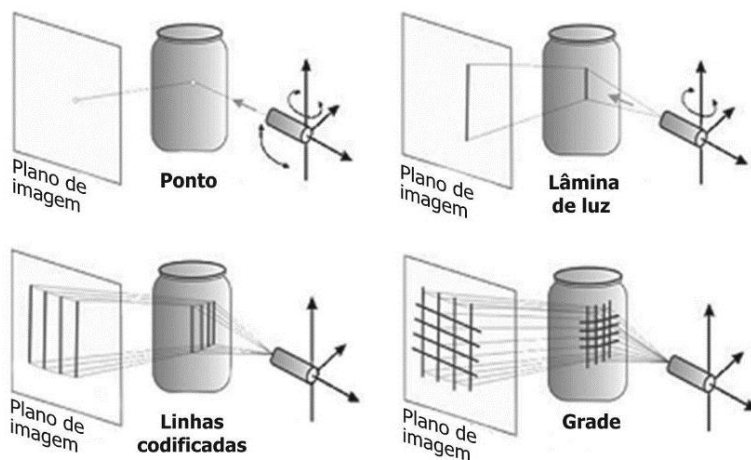
P = Coordenada da imagem de  $P_i$ .

Escâneres que utilizam o princípio de triangulação tipicamente são utilizados para a digitalização de pequenos objetos em curtas distâncias, pois em grandes distâncias os erros de leitura são consideravelmente grandes. Estes sistemas normalmente são fornecidos como sistemas completos ou como cabeçotes para montagem em braços mecânicos articulados ou em máquinas de medição por coordenadas (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

Na técnica de **luz estruturada**, um padrão ou perfil de luz é projetado em um ângulo conhecido na superfície de interesse e uma imagem do padrão resultante, refletida pela superfície, é capturada. A imagem é então analisada para calcular as coordenadas dos pontos na superfície (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008). Um padrão de luz pode ser um ponto, uma linha, uma malha ou padrões mais complexos (Figura 2.8).

O padrão mais comum é uma linha gerada através da movimentação de um feixe de luz. As coordenadas X, Y e Z de centenas de pontos ao longo dessa linha são determinadas através de triangulação (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

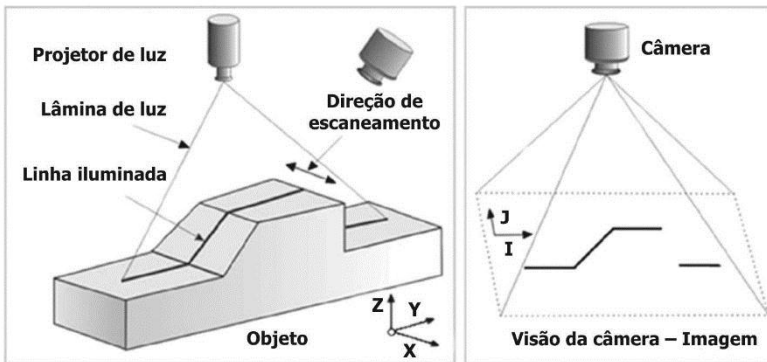
**Figura 2.8 – Técnica de luz estruturada –  
Diferentes padrões de luz utilizados**



Fonte: Pham e Hieu (2008).

A linha de luz varre o objeto enquanto uma sequência de imagens é captada pela câmera, como ilustrado na Figura 2.9. Um índice  $k$  é atribuído a cada uma das imagens na ordem em que foram captadas. Cada índice  $k$  corresponde à coordenada  $X$  da fonte de luz. Para cada imagem  $k$ , obtém-se um conjunto de coordenadas  $(i, j)$  dos pixels da linha iluminada. Os trios  $(i, j, k)$  compõem as coordenadas da imagem. Posteriormente essas coordenadas são transformadas para um sistema global  $(x, y, z)$  usando uma matriz de calibração (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

**Figura 2.9 – Aquisição de imagem através da técnica de luz estruturada, utilizando um padrão de linha**



Esquerda: Arranjo típico do objeto, projetor de luz e câmera. Direita: Visão da câmera.

Fonte: Pham e Hieu (2008).

Para aprimorar o processo de captura, um padrão de luz contendo linhas múltiplas é projetado na superfície de um objeto. Para distinguir entre linhas diferentes, elas devem ser codificadas de forma que o problema de correspondência seja resolvido sem ambiguidade (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

Os sistemas de luz estruturada possuem as seguintes vantagens sobre os sistemas de triangulação (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008):

- A aquisição de dados é mais rápida (milhões de pontos por segundo);
- Possibilidade de registrar cores;
- Custos mais baixos de aquisição e manutenção; podem ser utilizados para digitalização do corpo humano sem riscos.

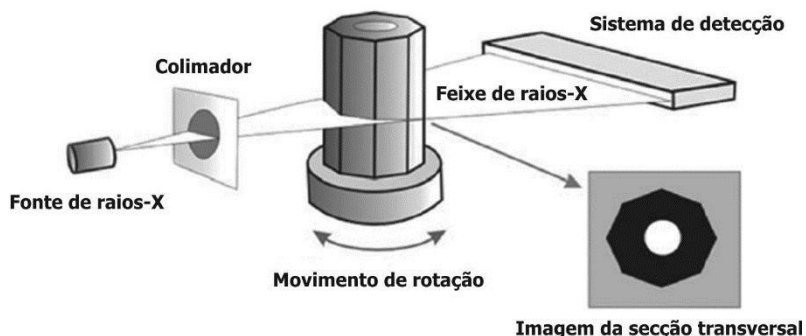


Já dentre as **técnicas transmissivas**, as mais comumente utilizadas para a fabricação de produtos sob medida são a **Tomografia Computadorizada (TC)** e **Ressonância Magnética (RM)**.

A **Tomografia Computadorizada** é uma técnica não destrutiva que permite a visualização tridimensional da parte interna de um objeto. A imagem final é gerada por meio da fusão de uma série de imagens bidimensionais (2D) de seções do objeto em estudo captadas ao longo de um eixo. Esta é uma abordagem de grande valor para reconstruções tridimensionais (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

A Figura 2.10 apresenta o princípio de funcionamento da TC. Por meio da projeção de um feixe de raios-X, direcionado por um acessório chamado colimador, através de um plano de um objeto submetido a rotação e medindo a quantidade de radiação que passa através do objeto, por meio de um sistema de detecção, um mapa de coeficientes de atenuação, ou mapa de densidades, é reconstruído e uma imagem da secção transversal é gerada a partir dele.

**Figura 2.10 – Princípio de funcionamento de um escâner TC**



Fonte: Pham e Hieu (2008).

A TC tem sido utilizada com sucesso na medicina por muitos anos e mais recentemente também passou a ser utilizada na indústria. Tomógrafos de alta resolução e escâneres de micro-TC permitem a visualização de detalhes muito pequenos – de décimos de microns – mesmo em objetos fabricados com materiais de alta densidade. Além das aplicações tradicionais para análises de partes do corpo humano, produtos industriais fabricados em metais, plásticos e cerâmicos também podem ser analisados (BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

A **Ressonância Magnética** é uma tecnologia avançada que utiliza campos magnéticos e ondas de rádio para criar imagens de alta definição de secções do corpo humano. Quando prótons de hidrogênio no corpo humano são colocados em um campo magnético de alta intensidade, através da emissão de pulsos de radiofrequência eletromagnética, eles emitem sinais. Esses sinais são coletados e processados para construir imagens de seções transversais. Comparada à Tomografia Computadorizada, a RM permite a obtenção de imagens de tecidos moles – órgãos, músculos, cartilagem, etc. – com qualidade superior, além de não utilizar radiação (BOEHLER e MARBS, 2002; e HIEU, 2008).

As principais vantagens e desvantagens dos equipamentos de contato e sem contato são listadas no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens dos equipamentos de contato e sem contato**

	<b>Contato</b>	<b>Sem Contato</b>
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta precisão</li> <li>- Baixos custos</li> <li>- Habilidade de medir furos e cavidades profundas</li> <li>- Insensibilidade à cor e transparência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não deformação de superfícies de materiais flexíveis</li> <li>- Rápida digitalização de volumes substanciais</li> <li>- Boa precisão e resolução para aplicações comuns</li> <li>- Habilidade para detectar cores</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longo tempo de coleta de dados</li> <li>- Distorção de objetos flexíveis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possíveis limitações para superfícies coloridas, transparentes ou refletivas</li> <li>- Menor precisão</li> </ul>

Fonte: Boehler e Marbs (2002); Pham e Hieu (2008).

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva foi definida pela ASTM (ASTM, 2010) como “o processo de unir materiais para fabricar objetos a partir de modelos tridimensionais, geralmente camada a camada, de forma oposta às metodologias de manufatura subtrativas”. A expressão Manufatura Aditiva tem sido utilizada preferencialmente em relação a outras comumente utilizadas até então, como Fabricação Aditiva, Processo

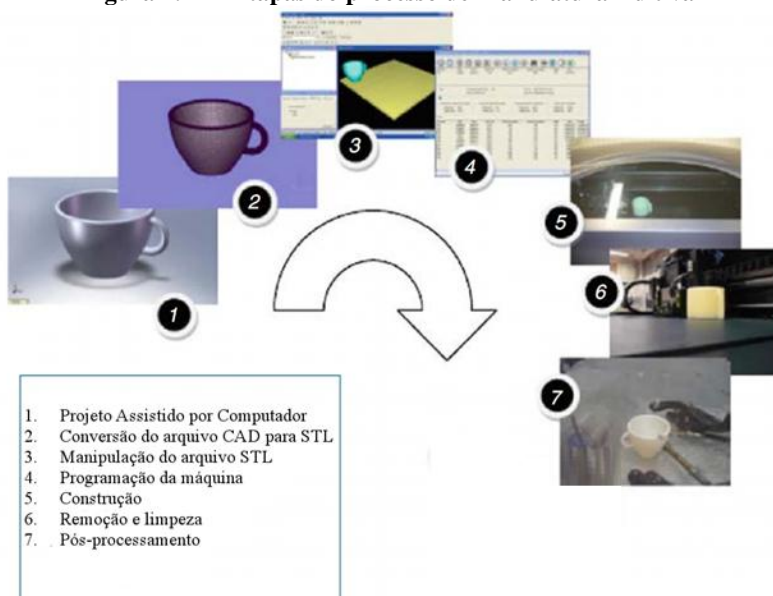
Aditivo, Técnica Aditiva, Manufatura Aditiva por Camadas, Manufatura por Camadas e Fabricação de Formas Livres.

O processo e as tecnologias de Manufatura Aditiva, além de seu impacto no processo de desenvolvimento de produtos, são descritos nas seções a seguir.

### 2.2.1 Processo de Manufatura Aditiva

O processo de fabricação por métodos aditivos pode ser dividido em sete etapas: Projeto Assistido por Computador; Conversão do arquivo CAD para STL; Manipulação do arquivo STL; Programação da máquina; Construção; Remoção e limpeza; Pós-processamento. Este processo é ilustrado na Figura 2.11.

**Figura 2.11 – Etapas do processo de Manufatura Aditiva**



Fonte: Gibson, Rosen e Stucker (2010).

Na etapa de **Projeto Assistido por Computador** é gerado um modelo CAD 3D, sólido ou de superfície, do produto a ser fabricado. Nesta etapa, é importante garantir que o modelo esteja completamente fechado, ou seja, que não existam descontinuidades de superfícies. Modelos com descontinuidades podem gerar resultados imprevisíveis

durante a fabricação. A maior parte dos pacotes de *software* CAD tratam superfícies como recursos para construção de modelos sólidos, portanto a continuidade de superfícies garante a integridade dos modelos sólidos. Os sistemas mais avançados de CAD disponíveis atualmente oferecem vários recursos para checagem e correção de eventuais falhas nos modelos, mas isso não é sempre verdade. Pacotes de *software* antigos ou mal desenvolvidos podem apresentar vários problemas nesse aspecto (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Na etapa de **conversão do arquivo CAD para STL**, como o nome sugere, o arquivo CAD é convertido para o padrão STL (do inglês *Standard Tessellation Language*). Os arquivos STL permitem a simples descrição de um modelo CAD levando em consideração basicamente a geometria – os dados de construção e a história de modelagem são removidos, e as superfícies do modelo são aproximadas com uma série de facetas triangulares. Embora diferentes formatos possam ser utilizados por equipamentos de Manufatura Aditiva, o formato STL é considerado o padrão de fato da indústria. A conversão do arquivo CAD para STL pode ser feita por meio de um recurso disponível nos principais pacotes de *software* CAD ou utilizando programas desenvolvidos especificamente para conversão e manipulação de arquivos STL (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Na etapa de **manipulação do arquivo STL** são realizadas operações adicionais sobre o modelo com o objetivo de otimizar propriedades mecânicas, melhorar a aparência ou reduzir o ciclo e o custo do produto. Tais operações incluem a alteração da orientação ou o reposicionamento da peça, a replicação do modelo ou inclusão de outros modelos na mesma batelada, alteração de dimensões, segmentação ou fusão de modelos e inclusão de caracteres para a identificação do produto, além da criação de estruturas de suporte para regiões de produtos em balanço ou desconectadas. Tais operações também podem ser realizadas por meio de pacotes de *software* específicos para essa finalidade e que funcionam de forma independente do equipamento de Manufatura Aditiva a ser utilizado (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Na etapa de **programação da máquina** são ajustados os parâmetros de processo do equipamento de Manufatura Aditiva. Os parâmetros a serem ajustados irão variar em função da tecnologia utilizada. Determinadas máquinas são projetadas para trabalhar somente com um ou, no máximo, dois materiais diferentes (não

simultaneamente) e não permitem alterações na espessura de camada. Estes tipos de máquinas irão requerer poucos ajustes antes do início de uma produção. Outras máquinas são projetadas para trabalhar com uma variedade de materiais e permitem a otimização de parâmetros para o tipo de peça a ser fabricada. Estes tipos de máquinas podem ter muitas opções de programação (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Na etapa de **construção** ocorre a fabricação do produto efetivamente, camada por camada. Uma vez definidos todos os parâmetros de processo, tem início uma fase totalmente controlada pelo computador. Cada tecnologia de AM utilizará uma abordagem diferente para geração de camada, porém todas seguirão uma sequência similar de construção – uma vez gerada uma camada, com base em uma seção transversal do modelo, uma plataforma ou um cabeçote se desloca verticalmente e o processo se repete até que o produto esteja completo (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Na etapa de **remoção e limpeza** o produto do processo de AM deveria estar pronto para uso, mas esse não é sempre o caso. Na maior parte das vezes, as peças devem passar por outras operações, como remoção da plataforma de construção, remoção de resíduo de material não processado e remoção de estruturas de suporte, antes que possam ser utilizadas (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN E STUCKER, 2009).

Na etapa de **pós-processamento** o produto semiacabado passa por operações secundárias, como polimento ou pintura, de acordo com as necessidades da aplicação. De um modo geral, o acabamento das peças obtidas por AM é inferior ao das obtidas por métodos tradicionais de fabricação, como moldagem por injeção ou usinagem. Determinados processos ainda geram componentes relativamente frágeis que requerem o uso de infiltração e/ou de recobrimentos de superfície para aumentar a resistência mecânica. Normalmente estas operações são realizadas manualmente, devido à complexidade das peças fabricadas por métodos aditivos. Entretanto, certas tarefas podem ser automatizadas com o uso de equipamento apropriado (HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

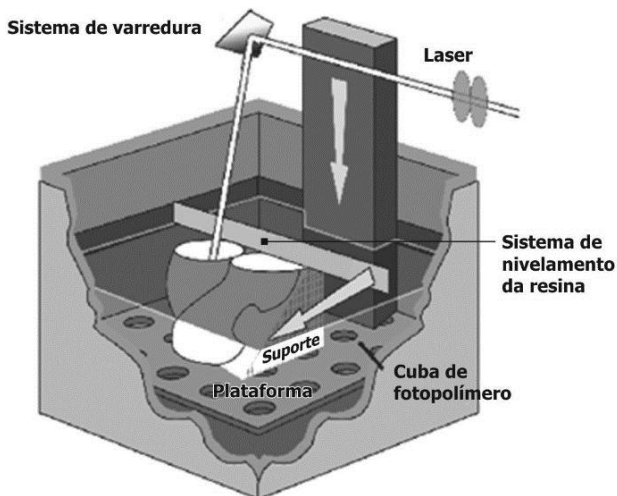
### 2.2.2 *Tecnologias de Manufatura Aditiva*

Um grande número de tecnologias de Manufatura Aditiva foi e continua a ser desenvolvido, entretanto, nem todas têm sido utilizadas para a fabricação de produtos acabados devido a limitações técnicas ou econômicas. As tecnologias que venceram essas barreiras e que podem ser ou têm sido efetivamente utilizadas para a fabricação de produtos personalizados são: Estereolitografia, Sinterização a Laser, Sinterização Direta de Metais a Laser, Fusão por Feixe de Elétrons, Fusão Seletiva a Laser, Modelagem por Fusão e Deposição, Projeção de Máscara e Impressão Tridimensional (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

A **Estereolitografia** (SLA, do inglês *Stereolithography*) é amplamente reconhecida como a primeira tecnologia de AM, lançada comercialmente em 1987 pela 3D Systems. Neste processo, a reação de cura de uma resina fotossensível, também chamada de fotopolímero, é iniciada por um laser ultravioleta (UV). Usando dados obtidos do arquivo STL, um sistema de varredura guia o feixe de laser sobre uma determinada área na superfície de uma cuba de fotopolímero que é então curado e solidificado. A primeira camada solidificada fica presa a uma plataforma, que é então baixada, tipicamente em 100  $\mu\text{m}$ , e uma nova camada de resina é depositada sobre a anterior. A uniformidade da superfície de resina é garantida por um sistema de nivelamento. O laser então varre uma nova camada que adere à primeira. O processo se repete até que a peça esteja completa. Em áreas em que partes desconectadas ou em balanço são criadas, suportes são gerados automaticamente pelo *software* da máquina. Esses suportes podem ser editados pelo operador antes da construção e devem ser removidos posteriormente. Após a construção, retirada da máquina e remoção dos suportes, as peças devem ser submetidas a uma operação de pós-cura, para concluir a reticulação da resina (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009). A Figura 2.12 mostra um esquema do processo de estereolitografia.

Os produtos fabricados por SLA possuem propriedades mecânicas relativamente baixas e as peças tendem a sofrer alterações dimensionais e distorções significativas ao longo do tempo em função de fatores externos, como presença de luz e umidade. Por esse motivo, essa tecnologia não é recomendada para a fabricação de produtos acabados que possam vir a ser submetidos a altos esforços mecânicos e que demandem alta durabilidade (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

**Figura 2.12 – Representação esquemática do processo SLA**



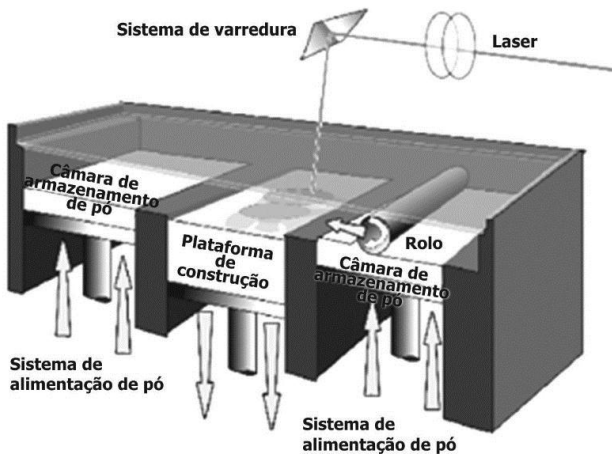
Fonte: Hopkinson e Dickens (2006).

A **Sinterização a Laser** (LS, do inglês *Laser Sintering*) foi inventada e patenteada por Ross Householder em 1979, mas foi comercializada apenas após o trabalho de Carl Deckard na Universidade do Texas, em Austin, ao final dos anos 1980. Isto levou à formação da DTM Corporation, que comercializou a primeira máquina em 1992 e deu continuidade ao desenvolvimento da tecnologia, o que permitiu o processamento de uma variedade de polímeros e também de metais e cerâmicas. A DTM passaria a se chamar 3D Systems após uma reorganização. Em 1994 a EOS GmbH lançou a máquina de LS EOSINT, se tornando ao longo dos anos um concorrente importante nesse mercado (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

O processo é, sob vários aspectos, similar a estereolitografia, porém a matéria-prima, na forma de pó, é sinterizada ao invés de curada, como ocorre na tecnologia SLA. Após a sinterização da primeira camada (tipicamente com 100  $\mu\text{m}$  de espessura), por meio de um feixe de laser guiado por um sistema de varredura, um pistão desloca para baixo a base de uma câmara central, conhecida como plataforma de construção, uma quantidade de material é deslocada por meio de um rolo de uma das duas câmaras de armazenamento de pó

laterais para o topo da plataforma de construção e uma nova camada é sinterizada, simultaneamente aderindo à camada anterior. O processo continua até que o produto esteja concluído. O pó não utilizado na fabricação do produto age como suporte natural para estruturas em balanço. A Figura 2.13 ilustra o funcionamento do processo LS. Durante o processo de sinterização a laser, o pó presente na câmara de construção é aquecido até uma temperatura poucos graus abaixo da temperatura de sinterização. Esse pré-aquecimento é usualmente feito através de fontes de infravermelho e auxilia o processo pela redução dos gradientes de temperatura entre o pó sinterizado e o não sinterizado, além de reduzir a energia requerida pelo laser para a sinterização (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

**Figura 2.13 – Representação esquemática do processo de Sinterização a Laser**



Fonte: Hopkinson e Dickens (2006).

Polímeros semicristalinos, como as poliamidas (PA), são sinterizados por meio de lasers para elevar a temperatura do pó até o seu ponto de fusão ( $T_m$ , do inglês *melt temperature*). Isto permite que ocorra um bom contato entre as partículas, o que, por sua vez, provoca um aumento nas propriedades mecânicas. O alto desempenho dos polímeros semicristalinos tem permitido a sua utilização em uma série de aplicações comerciais, incluindo produtos sujeitos a elevados esforços mecânicos, altas temperaturas e contato com produtos



químicos. Já no caso de materiais amorfos, como o Policarbonato (PC), o laser é utilizado para elevar a temperatura do material até sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ , do inglês *glass transition temperature*). As peças fabricadas com materiais amorfos possuem propriedades mecânicas relativamente baixas, o que limita sua aplicação como produto final. Peças fabricadas com materiais amorfos, entretanto, têm sido largamente utilizadas como modelos para confecção de moldes para fundição (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Durante os anos 1990, a DTM e a EOS aprimoraram o processo de sinterização a laser, o que permitiu a fabricação de machos e cavidades de moldes de areia para fundição, usando areia recoberta com polímero, que age como ligante ou aglutinante. A sinterização de cerâmicas também se tornou possível posteriormente, porém esta tecnologia ainda não parece estar num estágio adequado para a fabricação de produtos acabados (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

A DTM posteriormente aliou as tecnologias dos aglutinantes e da metalurgia do pó para a fabricação de peças metálicas. O processo desenvolvido consiste na sinterização parcial do material com o uso do laser, seguido de um estágio de pós-processamento em um forno, onde ocorre a queima do aglutinante e uma segunda etapa de sinterização, e, por fim, infiltração das peças porosas com bronze. Este processo foi concebido com o objetivo de fabricar cavidades de moldes para injeção de plásticos, mas passou a ser utilizado posteriormente também para a fabricação de produtos acabados. Deve-se notar, entretanto, que as propriedades das peças metálicas fabricadas por meio dessa tecnologia não estão no mesmo nível de peças fabricadas por métodos tradicionais, como usinagem, fundição ou forjamento (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Durante os anos 1990 do século XX a empresa EOS desenvolveu uma variação do método de sinterização a laser (LS) que permite a produção de peças metálicas com melhores propriedades mecânicas e com menor ciclo de produção. A nova tecnologia, batizada de **Sinterização Direta de Metais a Laser** (DMLS, do inglês *Direct Metal Laser Sintering*) basicamente consiste em equipamentos com lasers de maior potência e uso de novas ligas metálicas que dispensam os aglutinantes. Por não requerer aglutinantes, as etapas posteriores de sinterização e infiltração não são necessárias. Os metais para o processo DMLS foram originalmente desenvolvidos pela empresa Electrolux. Esta tecnologia, assim como a tecnologia de LS para metais, também foi

concebida objetivando a fabricação de cavidades de moldes para injeção de plásticos, mas passou a ser utilizada para a fabricação de produtos acabados posteriormente, passando a competir com métodos tradicionais de manufatura, como usinagem, fundição e forjamento (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

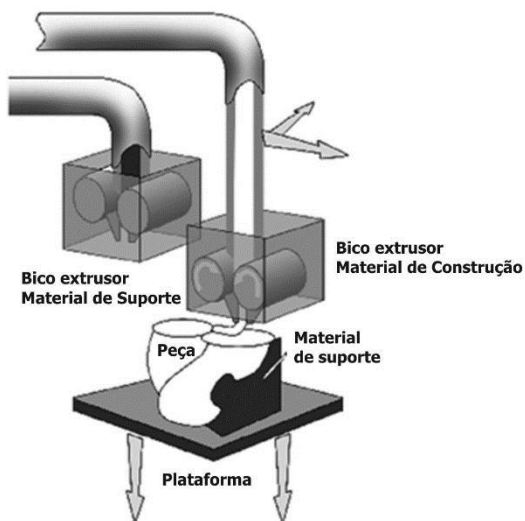
A tecnologia de **Fusão por Feixe de Elétrons** (EBM, do inglês *Electron Beam Melting*) foi lançada comercialmente pela empresa Arcam, em Gotemburgo, Suécia, em 1997. O processo utiliza uma abordagem similar a da LS, porém aqui o laser é substituído por um feixe de elétrons, o que tem várias implicações. Primeiramente, o feixe de elétrons pode ser direcionado através de alterações no campo magnético pelo qual ele passa. Isto elimina a necessidade de espelhos e pode aumentar significativamente a velocidade de varredura (até 1 km/s). Além disso, a potência desenvolvida pelo feixe de elétrons é muito alta, permitindo ao processo fundir rapidamente uma grande variedade de metais, incluindo ligas de titânio. Entretanto, o processo é limitado a materiais condutivos e, assim como para outras tecnologias de AM, as peças normalmente requerem um trabalho intensivo de acabamento posterior. Ainda que o processo utilize uma abordagem de varredura 0D (adimensional), a alta velocidade de varredura aliada à possibilidade de fabricação de produtos em ligas metálicas de alto desempenho permitiu que essa tecnologia passasse a ser utilizada para a fabricação de produtos acabados com altas demandas, como implantes médicos e aplicações aeroespaciais (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

A empresa MCP Group lançou comercialmente um equipamento de Manufatura Aditiva chamado Realizer, capaz de fundir completamente aço inoxidável em pó com o uso de laser, utilizando uma abordagem similar a LS. Esta tecnologia ficou conhecida como **Fusão Seletiva a Laser** (SLM, do inglês *Selective Laser Melting*). Posteriormente, a empresa Trumf também comercializou equipamentos de AM utilizando a mesma tecnologia. Este processo se mostrou particularmente adequado à produção de componentes de pequenas dimensões e com geometrias complexas, como implantes odontológicos (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

A tecnologia de **Modelagem por Fusão e Deposição** (FDM, do inglês *Fused Deposition Modeling*) foi comercializada pela empresa Stratasys em 1991, com patentes conferidas a Scott Crump, o fundador da companhia, em 1992. O processo FDM cria peças por meio da

extrusão de material fundido – normalmente um polímero de engenharia termoplástico – através de um bico que se desloca nas direções X e Y para criar uma camada. Um segundo bico de extrusão é utilizado para criar estruturas de suporte quando necessário. Após concluída uma camada, uma plataforma de construção é deslocada verticalmente e tem início a deposição de material para a geração da próxima camada. O ciclo é repetido até que o produto esteja finalizado (Hopkinson e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009). A Figura 2.14 ilustra o princípio de funcionamento do processo FDM.

**Figura 2.14 – Representação esquemática do processo FDM**



Fonte: Hopkinson e Dickens (2006).

O diâmetro do orifício do bico – tipicamente na faixa de 0,3mm – impacta negativamente a precisão das peças. A necessidade de deslocamento dos bicos no plano XY limita significativamente a velocidade de construção.

Os suportes podem ser removidos manualmente ou dissolvidos em água, quando se utiliza materiais hidrossolúveis. Embora mais caros, os suportes fabricados com materiais hidrossolúveis são preferíveis para a manufatura de produtos com geometrias complexas, por serem de mais fácil remoção.

Os materiais comumente processados incluem Policarbonato (PC), Polifenilsulfona (PPSU) e Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS). O fato de trabalhar com termoplásticos de engenharia – materiais com altas propriedades mecânicas, térmicas e químicas – permitiu que a tecnologia FDM fosse adotada como meio de fabricação de produtos finais, entretanto a sua relativamente baixa velocidade de construção e baixa resolução limitam a sua utilização em determinadas aplicações (HOPKINSON e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

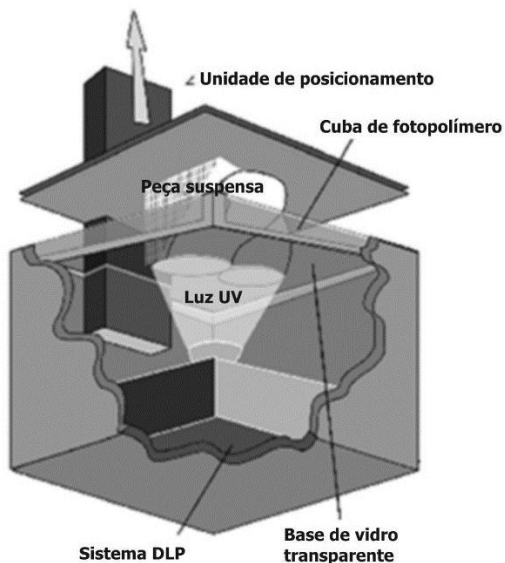
O processo conhecido como **Projeção de Máscara** utiliza um *chip* da tecnologia DLP (do inglês *Digital Light Processing*) para projetar padrões de luz ultravioleta sob uma cuba transparente de resina fotossensível, normalmente baseada em acrilatos, para promover a polimerização e solidificação de cada camada.

O princípio de funcionamento do processo de Projeção de Máscara possui várias semelhanças com o da tecnologia SLA, porém com uma diferença importante – A fonte de luz UV gera um padrão bidimensional, enquanto na tecnologia SLA é utilizado laser, considerada uma fonte de luz adimensional. O uso de padrões bidimensionais permite uma maior velocidade de polimerização e solidificação das camadas. Outra diferença em relação à tecnologia SLA é que no processo de Projeção de Máscara a peça fica suspensa, presa em uma plataforma que se desloca de baixo para cima, controlada por uma unidade de posicionamento (Figura 2.15).

O primeiro equipamento a utilizar esta tecnologia foi lançado em 2003 pela empresa Envision Tec, da Alemanha, e recebeu o nome comercial de Perfactory (HOPKINSON e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Com uma velocidade de construção de 10–15 segundos por camada, o processo permite a fabricação de peças com ciclos consideravelmente mais baixos que os obtidos com a tecnologia SLA. Além dos baixos ciclos, esta tecnologia permite a obtenção de peças com um excelente acabamento superficial e a reprodução de pequenos detalhes com elevada precisão, o que abriu as portas para que passasse a ser utilizada na fabricação de produtos funcionais de pequenas dimensões, como carcaças de aparelhos auditivos (HOPKINSON e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

**Figura 2.15 – Ilustração esquemática do processo de Projeção de Máscara**

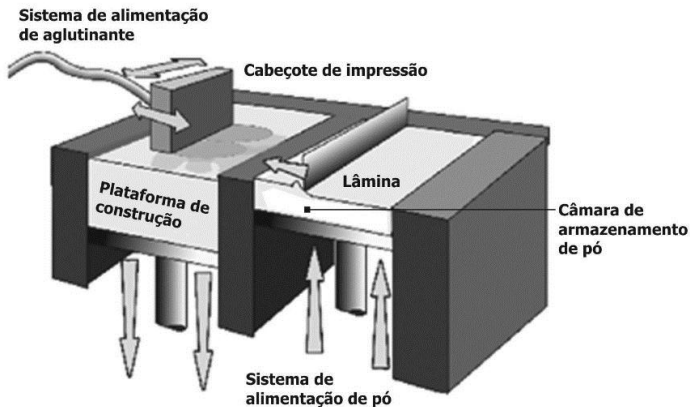


Fonte: Hopkinson e Dickens (2006).

A primeira tecnologia de **impressão 3D** comercial foi um equipamento chamado MoldelMaker, fabricado pela empresa Sanders Prototype (agora chamada Solidscape), lançado em 1994. Esse equipamento permitia a impressão de cera fundida. Em 1996, a empresa 3D Systems introduziu o equipamento Actua 2100, também para a impressão de produtos de cera. O modelo Actua foi atualizado em 1999 e comercializado como ThermoJet. Em 2001, a empresa Sanders Design International entrou no Mercado com o modelo Rapid ToolMaker, mas suas vendas foram rapidamente restringidas devido a conflitos envolvendo propriedade intelectual com a empresa Solidscape. No início dos anos 1990 foram desenvolvidos processos de impressão 3D baseados no uso de aglutinantes, primariamente pelo Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT, do inglês Massachussets Institute of Technology). A tecnologia desenvolvida no MIT consiste na impressão de um perfil de aglutinante sobre uma cuba de pó (de polímero, metal ou cerâmica), que une as partículas nesta região, formando uma camada da peça em construção. O processo de impressão se baseia na tecnologia de impressão *inkjet*. O cabeçote de impressão, entretanto, asperge um aglutinante no lugar de tinta. Em seguida, uma

plataforma de construção se desloca para baixo, uma nova quantidade de pó é depositada – deslocada de uma câmara de armazenagem de pó localizada na lateral para a câmara principal, por meio de uma lâmina – e uma outra camada é formada pela impressão de aglutinante, até que o produto esteja completo (Figura 2.16). Várias companhias licenciaram a tecnologia do MIT e se tornaram fabricantes de equipamentos de sucesso, incluindo empresas como ZCorp e Ex One (HOPKINSON e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

**Figura 2.16 – Representação esquemática do processo 3DP baseado no uso de aglutinantes**



Fonte: Hopkinson e Dickens (2006).

Mais recentemente, o foco do desenvolvimento passou a ser em tecnologias para a deposição de fotopolímeros baseados em acrilatos, em que gotículas de monômero líquido são aspergidas de forma controlada, formando uma camada do produto em construção, que é em seguida polimerizada e solidificada através de luz ultravioleta. O primeiro equipamento de destaque dessa nova geração de máquinas foi o modelo Quadra, fabricado pela empresa Objet Geometries, de Israel, lançado no ano 2000, seguido pelo modelo QuadraTempo, lançado em 2001. Ambos os equipamentos possuíam cabeçotes de impressão com mais de 1500 orifícios. Em 2003, a empresa 3D Systems lançou uma tecnologia concorrente, chamada Multi-Jet Modeling. O primeiro equipamento a utilizar esta tecnologia foi batizado de InVision 3D Printer.

As propriedades físicas dos produtos fabricados pelas tecnologias de impressão 3D são significativamente inferiores às obtidas com as

tecnologias LS e FDM. Por esse motivo, os equipamentos de 3DP são primariamente utilizados para fabricação de modelos conceituais e modelos para fundição ou vazamento pelo processo de cera perdida. Entretanto, mais recentemente estas tecnologias passaram a ser utilizadas também para a fabricação de produtos acabados, como bonecos de personagens de jogos eletrônicos – aplicações com baixos requerimentos em termos de resistência mecânica, térmica e química (HOPKINSON e DICKENS, 2006; AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

### 2.2.3 Exemplos de aplicações de diferentes tecnologias AM

Embora as tecnologias AM tenham começado a ser utilizadas como meio de fabricação de produtos acabados há relativamente pouco tempo, diversos casos de sucesso são relatados na literatura, como os descritos no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2 – Exemplos de produtos fabricados por meio de tecnologias de Manufatura Aditiva**

Indústria	Aplicação	Empresa	Tecnologia	Material
Aeroespacial	Componentes de <i>drones</i>	Paramount	LS	Plástico
	Componentes de helicópteros	Paramount	LS	Plástico
	Dutos de ar de aeronaves	Boeing	LS	Plástico
Automotiva	Componentes do interior de veículos de luxo	Bentley	LS	Plástico
Médica e Odontológica	Carcasas de aparelhos auditivos personalizados	Phonak e Siemens	SLA/Projeção de Máscara	Plástico
	Componentes de restaurações dentais	3M	DMLS/SLM	Metal
	Implantes ortopédicos	Ala Ortho	EBM	Metal
	Implantes ortopédicos	ConforMIS	LS	Metal
Bens de consumo não duráveis	Bonecos de personagens de jogos eletrônicos	Figureprints/Electronic Arts/Z Corp	3DP	Plástico
	Solados de chuteiras personalizadas	Prior 2 Lever	LS	Plástico
Arquitetura	Encosto de cadeira	3T RPD	LS	Plástico
	Luminárias	MGX	LS	Plástico

Fonte: Brad (2006); Harris e Savalani (2006); Janne (2006); Masters, Velde e McBagonluri (2006); Wooten (2006); Fu (2008); Reeves (2008); Wohlers (2009).

Mais detalhes sobre estas aplicações podem ser encontrados no Apêndice A.

#### ***2.2.4 O impacto da Manufatura Aditiva no processo de desenvolvimento de produtos***

Utilizando-se métodos aditivos de fabricação, as restrições ao desenho de produtos são reduzidas significativamente em relação a métodos convencionais. Devido à possibilidade de fabricar, virtualmente, qualquer geometria e também de combinar materiais, é possível integrar funções e reduzir significativamente o número de componentes de um produto. Com isso, questões relacionadas a encaixes, fixações, processos de montagem, etc. são reduzidas sensivelmente (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

A flexibilidade para produzir geometrias complexas permite avançar consideravelmente na otimização estrutural de produtos, uma vez que é possível adicionar material somente onde é realmente necessário, o que resulta em melhoria de desempenho e redução de custos (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Por permitir a fabricação de um produto diretamente a partir de um modelo CAD, sem a necessidade de construir ferramentas específicas, é possível manufaturar rápida e economicamente produtos personalizados e adaptados às características de cada indivíduo (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Comparando-se com processos tradicionais de manufatura, como moldagem por injeção de termoplásticos, ou usinagem de metais, em geral os métodos aditivos apresentam acabamento superficial inferior, variações dimensionais mais amplas e maiores restrições com relação ao tamanho dos produtos que podem ser fabricados em uma única etapa. Para peças que requerem um acabamento superficial de alto padrão e tolerâncias dimensionais estreitas, normalmente se faz necessário realizar operações secundárias, como usinagem e/ou polimento e pintura. Já, comparando os processos de sinterização direta ou de fusão de metais, como DMLS ou EBM, com o processo tradicional de



fundição, essas novas tecnologias tendem a apresentar resultados similares ou até superiores nessas características (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Nos processos que trabalham com polímeros, a maioria emprega materiais termofixos, que possuem propriedades físicas e químicas bastante diferentes das dos termoplásticos. Mesmo nos processos em que se utilizam materiais termoplásticos, como PA no processo SLS, ou ABS no processo FDM, as propriedades mecânicas das peças fabricadas através de processos aditivos normalmente são inferiores as daquelas fabricadas através de moldagem por injeção. Já no caso dos metais, quando se compara materiais com composições similares, as propriedades das peças fabricadas através de tecnologias como DMLS ou EBM, por exemplo, são muito próximas às obtidas por processos tradicionais (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

É importante notar que, em geral, as peças fabricadas por métodos aditivos são anisotrópicas. O grau de anisotropia varia de acordo com a tecnologia adotada, com o material utilizado e com a orientação da peça no equipamento. A anisotropia também ocorre com certos processos convencionais – como na moldagem por injeção de polímeros termoplásticos reforçados com fibras de vidro. Entretanto, esse efeito é significativamente mais pronunciado nos processos aditivos (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Dependendo do tipo de tecnologia utilizada, peças com geometrias complexas podem requerer a geração de estruturas de suporte, que precisam ser removidas posteriormente, o que prejudica o acabamento superficial. As estruturas de suporte também afetam negativamente o ciclo de fabricação e o custo do produto final (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Mesmo com todos os avanços ocorridos nos últimos anos, as opções de materiais para os atuais sistemas de Manufatura Aditiva ainda são bastante limitadas se comparadas às disponíveis para os processos tradicionais de fabricação, o que restringe muito a liberdade de escolha dos Engenheiros de Projetos na seleção de materiais para um novo

produto (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Os dados técnicos dos materiais para Manufatura Aditiva disponibilizados pelos fornecedores em geral são escassos e, muitas vezes, não explicitam as condições em que foram obtidos. Dados necessários para Análise por Elementos Finitos (FEA), como curvas de tensão-deformação, resistência à fadiga, fluência, etc. normalmente não são encontrados com facilidade (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Além das limitações próprias dos processos aditivos, as tecnologias de CAD/CAE e de Engenharia Reversa, essenciais para a fabricação de produtos sob medida, também possuem deficiências que impactam no tempo de lançamento de novos produtos. Os sistemas comerciais de CAD/CAE disponíveis atualmente não oferecem a flexibilidade necessária para a rápida criação de geometrias de alta complexidade e para a geração de modelos para simulação/fabricação de componentes com gradientes funcionais. As tecnologias de Engenharia Reversa ainda requerem muito trabalho manual para conversão dos dados capturados em um modelo CAD de qualidade (HAGUE, MANSOUR e SALEH, 2003; BECKER, GRZESIAK e HENNING, 2005; HOPKINSON, HAGUE e DICKENS, 2006; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

### 2.3 PERSONALIZAÇÃO EM MASSA

Anteriormente à Revolução Industrial, os produtos eram fabricados por artesãos, que os produziam de acordo com as características e necessidades de cada cliente. Com a Revolução Industrial, no final do século XVII, teve início um processo de transformação na manufatura que culminou no modelo de Produção em Massa, no início do século XX. A produção em massa permitiu a redução drástica dos custos de fabricação e, conseqüentemente, que parcelas cada vez maiores da população tivessem acesso a um número crescente de produtos industrializados de qualidade. Entretanto, isto teve um efeito colateral importante – a perda da individualidade, já que os produtos fabricados no modelo de Produção em Massa são padronizados e relativamente poucas opções destes produtos estão disponíveis no mercado. Atualmente a manufatura está passando por uma nova transformação e se movendo em direção a um novo

paradigma conhecido como Personalização em Massa, que combina determinados aspectos do trabalho artesanal com outros da produção em massa (GODINHO FILHO e FERNANDES, 2006; MACHADO e MORAES, 2008; FETTERMANN e ECHEVESTE, 2010). O modelo de Personalização em Massa busca oferecer bens e serviços adaptados às necessidades específicas de cada consumidor, produzidos com a eficiência e economia de escala da Produção em Massa (BOËR e DULIO, 2007).

A viabilidade de implementar um modelo de manufatura de Personalização em Massa é dependente, primariamente, de dois fatores (PILLER, 2004): da demanda e da heterogeneidade das preferências do consumidor. A Personalização em Massa somente é viável quando há grande heterogeneidade nas preferências do consumidor e quando a demanda por produtos personalizados é grande o suficiente para cobrir os custos de introduzir um novo sistema de fabricação. Estudos mostram que consumidores possuem necessidades muito particulares, que muitos estão insatisfeitos com produtos padronizados e um percentual importante está disposto a pagar preços acima da média por produtos que satisfaçam suas necessidades individuais. A razão para a insatisfação parece estar relacionada com a incapacidade do modelo de produção em massa de responder às necessidades específicas dos consumidores. Produtos padronizados atendem apenas as preferências comuns de clientes médios de um determinado segmento de mercado. Isto implica que uma parcela importante dos clientes não é atendida plenamente, mesmo quando se trata de mercados maduros (PILLER, 2004). Outro indicador de heterogeneidade é o fato de muitos usuários estarem modificando produtos existentes. Pesquisas mostram percentuais entre 10 e 40% de usuários que já modificaram produtos em determinados segmentos de mercado (PILLER, 2004).

A Personalização em Massa pode ocorrer em três níveis (não mutuamente excludentes) – Estilo; ajuste e conforto; funcionalidade.

Na personalização de **estilo**, são fabricados produtos de acordo com as necessidades ou desejos de consumidores específicos com relação à aparência – cores, formas, etc. A maior parte dos casos de Personalização em Massa atualmente foca no estilo (PILLER, 2004).

Na personalização de **ajuste e conforto** são fabricados produtos **sob medida** para determinados usuários. A implementação de programas para a fabricação de produtos sob medida demanda sistemas caros e complexos para capturar as dimensões dos consumidores e para incorporá-las ao projeto dos produtos (PILLER, 2004).

Na personalização de **funcionalidade** são fabricados produtos com atributos especificados pelos clientes, tais como velocidade, precisão, potência, dispositivos de saída, interfaces, conectividade, etc. A implementação de processos para fabricação de produtos com funcionalidade personalizada requer esforços similares aos da personalização de ajuste e conforto. Das três dimensões, a funcionalidade é a menos utilizada na prática da Personalização em Massa (PILLER, 2004).

Embora o modelo de Personalização em Massa ainda esteja em estágio embrionário, alguns casos de implementação desse modelo podem ser encontrados em escala comercial. As fabricantes de calçados Nike e Adidas introduziram programas de personalização, intitulados Nike id e miAdidas respectivamente, que permitem a fabricação de tênis sob medida, com sistema de amortecimento adaptado às características do consumidor e com estética de acordo com as suas preferências pessoais. A fabricante de relógios Swatch lançou um sistema de personalização de estilo de relógios de pulso em que os consumidores são guiados ao longo do processo por vendedores em lojas físicas. A Dell Computers implementou um programa que permite a configuração de computadores pessoais através da internet, durante o processo de compra. Acredita-se que o caso da Dell seja o mais conhecido e bem sucedido programa de Personalização em Massa posto em prática até hoje (BERGER e PILLER, 2003; PILLER, MOESLEIN e STOTKO, 2004; SALVADOR, HOLAN e PILLER, 2009).

#### 2.4 RELAÇÕES ENTRE PERSONALIZAÇÃO EM MASSA, MANUFATURA ADITIVA E ENGENHARIA REVERSA

A Personalização em Massa atualmente é colocada em prática por meio de uma técnica conhecida como modularização, em que componentes ou subsistemas de um produto são montados em diferentes configurações, o que permite obter um determinado grau de personalização com custos competitivos. Com o uso de outra técnica, chamada *postponement*, a decisão sobre a configuração final do produto pode ser postergada de forma a permitir um grau ligeiramente maior de personalização. No modelo atual, entretanto, os módulos ainda são fabricados através de métodos e tecnologias convencionais de manufatura que requerem a utilização de ferramentas complexas, como moldes e estampos, para a produção de determinados tipos de componentes. A necessidade destes tipos de ferramentas impõe uma série de limitações ao processo de desenvolvimento de novos produtos.

As ferramentas restringem o *design*, as opções de materiais, e a variedade de versões. Além disso, tem um impacto significativo no custo do produto final e no prazo de lançamento de novos produtos, o que cria uma barreira para a fabricação de pequenos lotes ou de produtos únicos. Técnicas de fabricação mais flexíveis, como de ferramental rápido ou de usinagem, são alternativas interessantes em determinados casos, mas não em todas as situações (TUCK, CHRISTOPHER e HAGUE, RICHARD, 2006; TUCK, CHRIS e HAGUE, RICHARD, 2006; TUCK *et al.*, 2007; GARRET, 2009; REEVES, TUCK e HAGUE, 2011).

Com a evolução e a crescente incorporação das tecnologias de Engenharia Reversa e de Manufatura Aditiva nos processos de projeto e fabricação de produtos personalizados, esse cenário tende a se alterar de forma significativa. Na manufatura convencional, há uma ligação direta entre a complexidade geométrica de um produto e o seu custo. Na Manufatura Aditiva, não apenas o custo não está relacionado com a geometria, mas virtualmente qualquer geometria pode ser fabricada. Somando o fato de que não se faz necessário produzir altos volumes para amortizar custos do ferramental, as possibilidades de fabricação de produtos personalizados complexos são ampliadas. Tais tecnologias oferecem ainda a possibilidade de fabricação de produtos fora do ambiente industrial. Dessa forma, produtos poderiam ser fabricados diretamente no ponto de venda ou em outros locais mais convenientes para o consumidor. Para os usuários finais, a combinação das tecnologias de RE e AM ainda oferece o potencial de fabricação de produtos com melhor desempenho e maior conforto, como demonstrado através dos casos descritos no Apêndice A: a chuteira profissional Assassin fabricada pela empresa P2L, os implantes ortopédicos fabricados pela empresa Ala Ortho e os aparelhos auditivos fabricados pelas empresas Siemens e Phonak (TUCK, CHRISTOPHER e HAGUE, RICHARD, 2006; TUCK, CHRIS e HAGUE, RICHARD, 2006; TUCK *et al.*, 2007; GARRET, 2009; REEVES, TUCK e HAGUE, 2011).

Em suma, a adoção das tecnologias de Engenharia Reversa e de Manufatura Aditiva torna possível a fabricação de produtos com níveis de personalização superiores aos obtidos com os métodos atuais, o que oferece a possibilidade de aprimorar o modelo de Personalização em Massa em última instância (TUCK, CHRISTOPHER e HAGUE, RICHARD, 2006; TUCK, CHRIS e HAGUE, RICHARD, 2006; TUCK *et al.*, 2007; GARRET, 2009; REEVES, TUCK e HAGUE, 2011).

## 2.5 PROCEDIMENTOS PARA PERSONALIZAÇÃO DE AJUSTE E CONFORTO

Nesta seção é feita uma revisão de pesquisas acadêmicas relacionadas ao tema central desse trabalho com o objetivo de levantar avanços feitos neste campo nos últimos anos e também o de encontrar pontos que possam ser aprofundados, de forma a estabelecer o escopo desse trabalho.

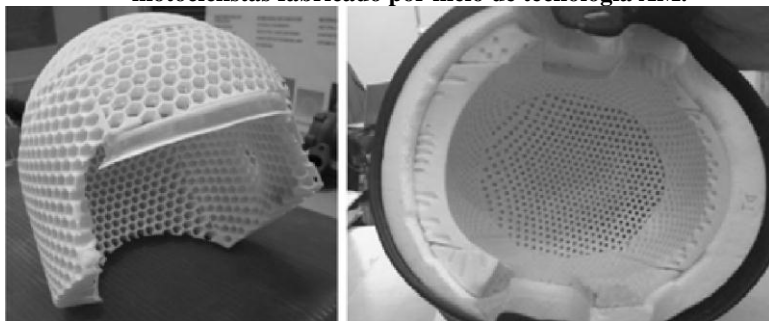
O número de artigos sobre personalização de ajuste e conforto de produtos por meio de RE e AM publicados em periódicos indexados e em anais de conferências é relativamente baixo, possivelmente por se tratar de um campo de pesquisas relativamente novo. Dentro dos diversos aspectos relacionados ao tema, um tópico que tem recebido grande atenção dos pesquisadores da área é a análise de viabilidade técnica e econômica da fabricação de diferentes tipos de produtos personalizados utilizando estas técnicas. Exemplos de produtos estudados incluem **soquetes de próteses para amputação transtibial** – amputação parcial de membro inferior, entre as articulações do joelho e do tornozelo (ROGERS *et al.*, 1991; FREEMAN e WONTORCIK, 1998; FAUSTINI *et al.*, 2001; Ng, LEE e GOH, 2002; TAY, MANNA e LIU, 2002; BURHAN e CRAWFORD, 2004; FAUSTINI, 2004; HERBERT *et al.*, 2005; FAUSTINI *et al.*, 2006; FUH, FENG e WONG, 2006; ROGERS *et al.*, 2007; COLOMBO *et al.*, 2010), **órteses para tornozelo e pé** – dispositivos utilizados para auxiliar pessoas com problemas neuromotores a controlar os movimentos dos pés ao caminhar (MILUSHEVA *et al.*, 2006; CADDLE *et al.*, 2007; FAUSTINI *et al.*, 2008; PALLARI *et al.*, 2010; MAVROIDIS *et al.*, 2011; SCHRANK e STANHOPE, 2011), **próteses de pé** (FEY *et al.*, 2009; SOUTH *et al.*, 2010; FEY, KLUTE e NEPTUNE, 2011; VENTURA, KLUTE e NEPTUNE, 2011b; a), **calçados femininos** (ZANDE *et al.*, 2007), **solados de chuteiras** (DELAMORE, JUNIOR e LEVER, 2005), **solados de tênis de corrida** (TOON, HOPKINSON e CAINE, 2007; ESTIVALET *et al.*, 2008; MAJEWSKI *et al.*, 2008; TOON *et al.*, 2011), **capacetes, bancos de motocicletas e implantes ortopédicos** (CUSTOM-FIT, 2007; JONES, C. L. e GUNNINK, J., 2008; JONES, C. L. e GUNNINK, J. W., 2008; PANDREMENOS *et al.*, 2008; PANDREMENOS e CHRYSSOLOURIS, 2009). Pesquisas envolvendo procedimentos para a personalização de ajuste e conforto de produtos, entretanto, parecem representar um pequeno percentual dentro desse universo. As pesquisas sobre este tópico conduzidas por dois

grupos renomados – Custom-Fit e Loughborough – se destacam nesse campo, e são detalhadas a seguir.

### 2.5.1 Projeto Custom-Fit

Os participantes de um projeto intitulado Custom-fit, financiado pelos governos de países-membros da Comunidade Europeia, trabalharam em várias linhas de pesquisa relacionadas a personalização de ajuste e conforto de produtos por meio de RE e AM. Para tal, desenvolveram diferentes produtos sob medida, como capacetes, bancos de motocicletas, soquetes de próteses e implantes ortopédicos (CUSTOM-FIT, 2007; JONES, C. L. e GUNNINK, J., 2008; JONES, C. L. e GUNNINK, J. W., 2008; PANDREMENOS *et al.*, 2008; PANDREMENOS e CHRYSOLOURIS, 2009). Uma das linhas de pesquisa consistiu no desenvolvimento de procedimentos para personalização de alguns destes produtos. O procedimento para o desenvolvimento de capacetes sob medida foi escolhido para ilustrar o trabalho deste grupo por estar melhor documentado na literatura científica. O projeto consistiu na criação de um acolchoado – uma camada do revestimento interno – para capacetes adaptado à anatomia do usuário, com o objetivo de aumentar o conforto, e também de permitir o atendimento de uma parcela da população que não encontra capacetes adequados as suas medidas. O acolchoado, fabricado por métodos aditivos neste caso, é posteriormente montado em um modelo comercial de capacete (Figura 2.17).

**Figura 2.17 – Acolchoado sob medida de capacete para motociclistas fabricado por meio de tecnologia AM.**



Esquerda: Acolchoado antes da montagem no capacete.

Direita: Acolchoado montado no capacete.

Fonte: Pandremenos e Chryssolouris (2009).

As tecnologias avaliadas para fabricação do componente personalizado do capacete foram LS e PPP, ou Impressão de Plástico em Pó, do inglês *Plastic Powder Printing*. A tecnologia PPP, ainda em estado experimental, é baseada nos princípios da eletrofotografia, ou impressão a laser, onde o toner é substituído por um polímero termoplástico que é posteriormente sinterizado por meio de radiação infravermelha (CUSTOM-FIT, 2007; JONES, C. L. e GUNNINK, J., 2008; JONES, C. L. e GUNNINK, J. W., 2008; PANDREMENOS *et al.*, 2008; PANDREMENOS e CHRYSSOLOURIS, 2009).

O processo proposto para a personalização de ajuste e conforto de capacetes é composto de cinco etapas – Captura de dados geométricos, Captura de dados não geométricos, Projeto do acolchoado personalizado, Verificação Auxiliada por Computador e Fabricação do acolchoado e montagem no capacete.

Na etapa de **captura de dados geométricos** um escâner tridimensional é utilizado para a captura da superfície da cabeça e pescoço do usuário. Os dados do escaneamento são manipulados para permitir a utilização nas etapas posteriores do processo (CUSTOM-FIT, 2007; JONES, C. L. e GUNNINK, J. W., 2008; PANDREMENOS *et al.*, 2008).

Na **etapa de captura de dados não geométricos** é determinado o nível de conforto do usuário, por meio de um sistema de medição da pressão entre o capacete e a sua cabeça. As pressões medidas durante essa etapa, registradas na forma de um mapa de pressão, são correlacionadas com respostas do usuário a um questionário sobre conforto. Os dados obtidos permitem determinar as regiões mais sensíveis à pressão para o usuário, o que permite ajustes no *design* do acolchoado em etapas posteriores (CUSTOM-FIT, 2007; JONES, C. L. e GUNNINK, J. W., 2008; PANDREMENOS *et al.*, 2008).

Na etapa de **projeto do acolchoado personalizado** é utilizado um sistema inteligente que combina o modelo CAD de um capacete com os dados geométricos e não geométricos do usuário para gerar o modelo do acolchoado automaticamente, por meio de técnicas avançadas de morfismo. Durante o processo, o modelo sólido é convertido em uma estrutura do tipo *honeycomb* (que emula uma colmeia), para conferir flexibilidade e reduzir peso, e canais são introduzidos para permitir a circulação de ar (CUSTOM-FIT, 2007; JONES, C. L. e GUNNINK, J. W., 2008; PANDREMENOS *et al.*, 2008).

Na etapa de **Verificação Auxiliada por Computador** (CAV, do inglês *Computer Aided Verification*) os ensaios de liberação do produto



são simulados computacionalmente, substituindo a realização de ensaios mecânicos destrutivos, que não são viáveis economicamente, já que os produtos personalizados são únicos (JANSEN, KNAAP e POSTHUMA, 2007a; b; PANDREMENOS *et al.*, 2008). A metodologia proposta pelos pesquisadores do grupo Custom-Fit para esta etapa pode ser dividida em dois grupos – **Aprovação Auxiliada por Computador** e **Aprovação do Processo**.

A **Aprovação Auxiliada por Computador** é realizada na etapa imediatamente anterior à fabricação. Duas diferentes abordagens podem ser utilizadas para esse fim – Destinação e Canais:

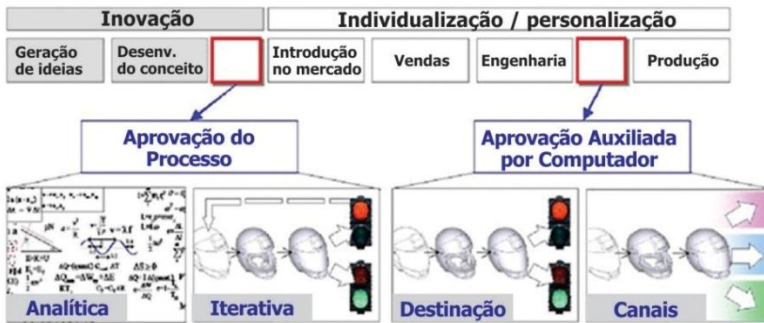
- **Destinação** – Nesta abordagem, o *design* de um produto é avaliado utilizando simulação computacional, de forma a garantir que somente produtos dentro das especificações sejam produzidos.
- **Canais** – Nesta abordagem, são definidas faixas ou limites para os carregamentos aplicados – canais – a um produto e a cada operação de personalização os carregamentos são checados. Quando estes carregamentos estão dentro dos limites pré-estabelecidos, a simulação computacional pode ser dispensada.

A metodologia de **Aprovação do Processo** conduz os projetistas à criação de *designs* de acordo com as especificações de projeto, em oposição à metodologia de Aprovação Auxiliada por Computador, em que o projeto é avaliado somente num estágio avançado. Esta metodologia pode ser comparada aos sistemas de manufatura projetados para fabricar produtos certificados. Neste caso, entretanto, projetos dentro das especificações – e não produtos – são gerados automaticamente. Duas diferentes abordagens foram propostas para a implementação deste método:

- **Analítica** – Nesta abordagem, a verificação é feita por meio de relações analíticas entre carregamentos, propriedades dos materiais e geometria do produto.
- **Iterativa** – Nesta abordagem, projetos de acordo com as especificações são gerados automaticamente por meio de um sistema de retroalimentação que produz alterações no desenho com base em resultados da verificação.

O modelo de referência adotado para o processo de desenvolvimento de produtos nesta metodologia é composto de duas fases: **inovação** e **individualização/personalização**. A metodologia de Aprovação do Processo é implementada na fase de inovação, após a etapa de desenvolvimento do conceito, e a metodologia de Aprovação do Projeto nas etapas finais do processo de personalização, imediatamente antes da etapa de produção, como ilustrado na Figura 2.18.

**Figura 2.18 – Métodos de Verificação Auxiliada por Computador**



Fonte: Jansen, Knaap e Posthuma (2007a).

Na etapa de **fabricação do acolchoado e montagem no capacete** o modelo geométrico final é convertido para o formato STL e transferido para o computador que controla o equipamento de Manufatura Aditiva. Quando necessário, o modelo é manipulado para otimizar a etapa de fabricação. O acolchoado é então fabricado e posteriormente montado no capacete (TUCK *et al.*, 2007; TUCK *et al.*, 2008).

O procedimento de personalização desenvolvido pelos pesquisadores do projeto Custom-fit é ilustrado na Figura 2.19.

**Figura 2.19 – Processo de criação de capacetes personalizados**



Fonte: Custom-Fit (2007).

### **2.5.2 Grupo de Pesquisas em Manufatura Aditiva da Universidade Loughborough**

Membros do grupo de pesquisas em Manufatura Aditiva da Universidade de Loughborough, da Inglaterra, propuseram um procedimento para a fabricação de produtos sob medida composto de quatro etapas – Captura da geometria, manipulação de dados, combinação de dados de projeto e Manufatura Aditiva:

Na etapa de **Captura da geometria** são coletados os dados geométricos do indivíduo que servirão de base para o projeto do produto. Os dados coletados formam uma nuvem de pontos – um conjunto de pontos com coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  no espaço. O processo de captura de geometria deve ser padronizado de forma a minimizar a introdução de erros. O aspecto mais importante nessa etapa é capturar a geometria do corpo nas condições em que o produto será utilizado. Por exemplo, o desenvolvimento de um assento sob medida deveria partir da geometria do corpo da pessoa sentada (TUCK *et al.*, 2007; TUCK *et al.*, 2008).

Na etapa de **manipulação de dados** a nuvem de pontos gerada durante a fase de captura da geometria é trabalhada, utilizando pacotes de *software* especializados, para permitir a modelagem do produto. Pontos de diferentes tomadas de captura são alinhados, pontos desnecessários são eliminados e um modelo de superfície, usualmente no padrão STL, é gerado. Um modelo CAD 3D sólido ou de superfície é

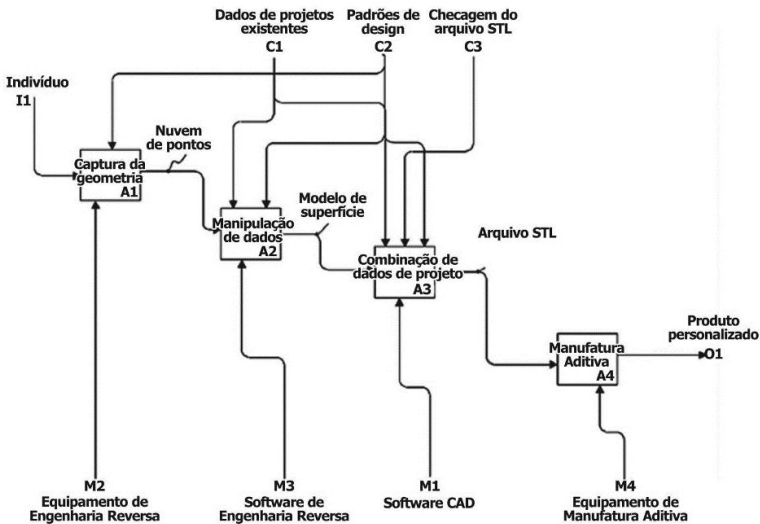
então criado a partir do arquivo STL (TUCK *et al.*, 2007; TUCK *et al.*, 2008).

Na etapa de **combinação de dados de projeto** outros modelos geométricos contendo *features*, como castelos, roscas, nervuras, etc., são combinados com o modelo CAD 3D gerado na etapa anterior para formar o produto final. O modelo do produto acabado é então convertido para o padrão STL, para permitir a fabricação através de métodos aditivos (TUCK *et al.*, 2007; TUCK *et al.*, 2008).

Na etapa de **Manufatura Aditiva** ocorre a fabricação do produto efetivamente, através de tecnologias AM.

A metodologia proposta pelos autores é ilustrada na Figura 2.20. A técnica de modelagem de processos IDEF0 (do inglês *Integrated Definition for Function Modeling*) foi utilizada para esta representação (BUEDE, 2009).

**Figura 2.20 – Modelo do processo de criação de produtos sob medida desenvolvido pelo grupo de pesquisas de Loughborough**



Fonte: Tuck *et al.* (2008).

### ***2.5.3 Avaliação e considerações sobre os procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough***

Os procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough foram avaliados através de uma versão adaptada da metodologia desenvolvida por Vernadat (1996), que consiste na verificação do “nível de atendimento” dos procedimentos a uma série de critérios, representados por perguntas específicas estabelecidas pelos responsáveis pela avaliação.

Os critérios propostos por Vernadat (1996) são: Abrangência, Representação, Profundidade, Clareza, Consistência, Aplicabilidade, Conteúdo, Flexibilidade e Benefícios. Para cada um destes critérios, as seguintes perguntas foram estabelecidas (adaptadas de SACCHELLI, 2007):

**Abrangência** – O procedimento abrange as áreas de conhecimento necessárias ao processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?

**Representação** – A forma de representação do procedimento é de fácil compreensão?

**Profundidade** – O nível de detalhamento do procedimento é adequado para orientar o processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?

**Clareza** – O procedimento apresenta-se logicamente estruturado para o processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?

**Consistência** – O fluxo de informações entre as etapas encontra-se adequadamente especificado?

**Aplicabilidade** – O procedimento pode ser empregado para o processo de personalização de diferentes tipos de produtos por meio de RE e AM?

**Conteúdo** – O procedimento possui conteúdo suficiente para suportar a realização de todas as atividades e tarefas do processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?

**Flexibilidade** – O procedimento permite modificações para inserir outras etapas, atividades e tarefas para atender objetivos não previamente definidos?

**Benefícios** – O procedimento poderá auxiliar no cumprimento dos prazos de entrega dos produtos feitos sob medida por meio de RE e AM?

O procedimento poderá auxiliar no atendimento das especificações de qualidade dos produtos feitos sob medida por meio de RE e AM?

Para avaliação do nível de atendimento dos procedimentos a cada uma destas questões, a seguinte escala foi utilizada: 4 (quatro) – atende totalmente; 3 (três) – atende em muitos aspectos; 2 (dois) – atende parcialmente; 1 (um) – atende poucos aspectos; 0 (zero) – não atende.

O resultado da avaliação foi resumido no Quadro 2.3.

**Quadro 2.3 – Resumo da avaliação dos procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough**

Critério	Questão	Custom-fit	Loughbor.
Abrangência	O procedimento abrange as áreas de conhecimento necessárias ao processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	3	3
Representação	A forma de representação do procedimento é de fácil compreensão?	3	4
Profundidade	O nível de detalhamento do procedimento é adequado para orientar o processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	2	2
Clareza	O procedimento apresenta-se logicamente estruturado para o processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	3	3
Consistência	O fluxo de informações entre as etapas encontra-se adequadamente especificado?	3	3
Aplicabilidade	O procedimento pode ser empregado para o processo de personalização de diferentes tipos de produtos por meio de RE e AM?	4	4
Conteúdo	O procedimento possui conteúdo suficiente para suportar a realização de todas as atividades e tarefas do processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	2	2
Flexibilidade	O procedimento permite modificações para inserir outras etapas, atividades, tarefas, ferramentas, etc. para atender objetivos não previamente definidos?	4	4
Benefícios	O procedimento poderá auxiliar no cumprimento dos prazos de entrega dos produtos feitos sob medida por meio de RE e AM?	3	3
	O procedimento poderá auxiliar no atendimento das especificações de qualidade dos produtos feitos sob medida por meio de RE e AM?	3	3

Fonte: O autor (2011).

A seguir são feitas considerações sobre o nível de atendimento aos critérios de avaliação por parte dos procedimentos em questão.

**Abrangência** – As principais áreas de conhecimento necessárias ao processo de personalização de ajuste e conforto foram determinadas como sendo: RE, AM e CQ (Controle de Qualidade). As áreas de RE e AM estão adequadamente cobertas em ambos procedimentos. A cobertura da área de CQ, entretanto, poderia ser aprimorada nos dois casos. O procedimento do grupo Custom-fit estabeleceu uma rotina para verificação do desempenho de produtos sob medida utilizando simulações computacionais antes da etapa de fabricação. Entretanto, no procedimento proposto por eles não há rotinas de CQ no produto físico, após o processo a fabricação, para checar eventuais problemas que não podem ser detectados nas simulações computacionais, como problemas de aparência superficial, dimensões e forma. No procedimento proposto pelo grupo de pesquisas de Loughborough não são propostas rotinas para CQ em nenhuma etapa.

**Representação** – Embora a descrição do procedimento para personalização de ajuste e conforto de produtos desenvolvido pelos pesquisadores do grupo Custom-fit seja muito clara, a sua representação gráfica poderia ser melhorada, por exemplo, utilizando fluxogramas e/ou tabelas. O procedimento proposto pelo grupo de Loughborough é representado graficamente utilizando a metodologia IDEFO, que é de fácil compreensão.

**Profundidade** – As etapas e atividades estão bem descritas em ambos procedimentos. Porém, o mesmo não pode ser dito sobre as tarefas, que não são claramente definidas nem detalhadas em nenhuma delas.

**Clareza** – As etapas e atividades estão logicamente estruturadas em ambos procedimentos. Entretanto, como as tarefas não estão devidamente definidas, conclui-se que há uma oportunidade de melhoria neste ponto.

**Consistência** – O fluxo de informações não está adequadamente especificado em nenhum dos procedimentos sob análise.

**Aplicabilidade** – Os dois procedimentos podem ser utilizados para o processo de personalização de diferentes tipos de produtos.

**Conteúdo** – O conteúdo disponibilizado por ambos os procedimentos parece ser suficiente para orientar o trabalho de profissionais com grande experiência e profundos conhecimentos sobre engenharia em geral e, mais especificamente, sobre RE e AM. Um conteúdo mais amplo, entretanto, poderia beneficiar profissionais menos

experientes e com menos conhecimentos sobre as tecnologias envolvidas na personalização de ajuste e conforto de produtos.

**Flexibilidade** – Ambos os procedimentos são bastante flexíveis e permitem modificações, caso necessário.

**Benefícios** – Ambos os procedimentos podem auxiliar no cumprimento dos prazos de entrega e no atendimento das especificações de qualidade, em especial para equipes experientes e com profundos conhecimentos sobre engenharia em geral e, mais especificamente, sobre RE e AM. Os benefícios para equipes menos experientes e com menos conhecimentos sobre essas áreas tendem a ser menores, devido ao baixo nível de detalhamento e de conteúdo de ambas.

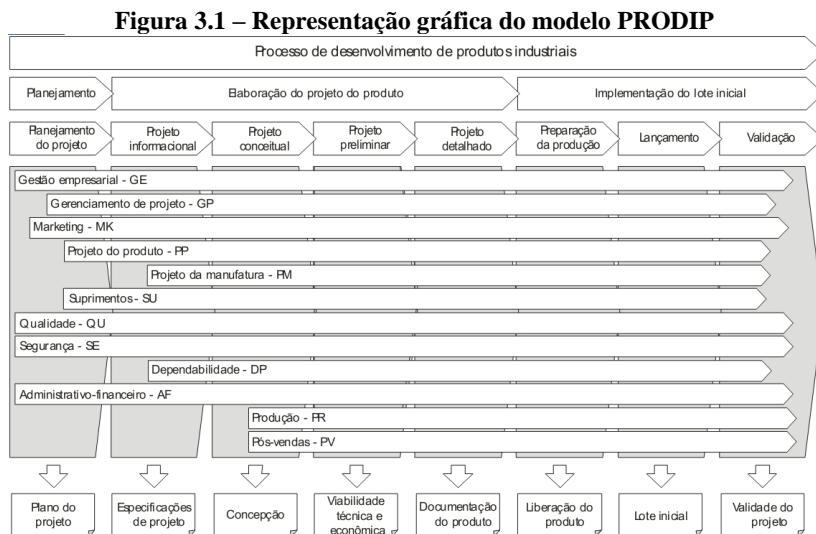
Em resumo, um novo procedimento de personalização de ajuste e conforto que pretenda avançar em relação aos procedimentos aqui apresentados deveria focar nos seguintes pontos:

- Abrangência: Inclusão de rotinas de controle de qualidade após a fabricação do produto;
- Representação: Utilização de tabelas e/ou fluxogramas;
- Profundidade, Clareza e Conteúdo: Inclusão e detalhamento de tarefas e fluxos de dados/materiais quando aplicável.



### 3 ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de obter um melhor entendimento dos processos de projeto e fabricação de um produto feito sob medida por meio de RE e AM, um produto foi projetado e construído utilizando estas tecnologias. Para a concepção do produto, foram utilizados processos do modelo de referência PRODIP (BACK *et al.*, 2008), ilustrado na Figura 3.1.



Fonte: Back *et al.* (2008).

Para as etapas de RE e AM, foram seguidos procedimentos atualmente utilizados pelos parceiros neste projeto – A empresa Technosim (RE)<sup>1</sup> e o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (AM)<sup>2</sup>.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PROJETO

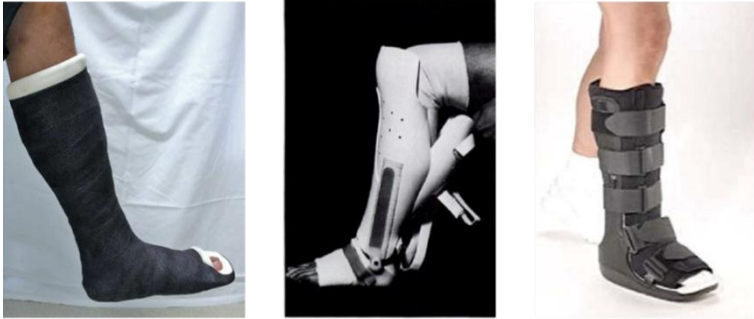
O problema de projeto consistiu no desenvolvimento de um dispositivo ortopédico de imobilização sob medida para um determinado usuário. Tais dispositivos são utilizados para o tratamento conservador (não invasivo) de lesões, como fraturas, entorses e luxações, além de tratamento pós-cirúrgico, em diferentes partes do

<sup>1</sup> Site da empresa disponível em: <<http://technosim.ind.br>>. Acesso em: 2014.

<sup>2</sup> Site do CTI disponível em: <<http://www.cti.gov.br>>. Acesso em: 2014.

corpo – membros superiores e inferiores, tronco e pescoço. Mais especificamente, optou-se pelo desenvolvimento de um dispositivo de imobilização para membros inferiores. Atualmente três tecnologias de imobilização são utilizadas primariamente no caso de membros inferiores – Imobilização com aparelho gessado, tutores e botas imobilizadoras –, conforme ilustrado na Figura 3.2 (SARMIENTO *et al.*, 1984; KEEFER *et al.*, 2008; BOYD, BENJAMIN e ASPLUND, 2009; SOLOMON, WARWICK e NAYAGAM, 2010).

**Figura 3.2 – Tecnologias de imobilização**



Esquerda: Aparelho gessado. Centro: Tutor.  
Direita: Bota imobilizadora.

Fonte: Sarmiento *et al.* (1984); Keefer *et al.* (2008); Boyd, Benjamin e Asplund (2009).

O produto desenvolvido neste projeto tem como principais inovações em relação aos existentes no mercado os processos de adaptação do sistema de imobilização à anatomia de um paciente (feito sob medida), utilizando tecnologias de Engenharia Reversa, e o de fabricação, utilizando tecnologias de Manufatura Aditiva.

### 3.2 PROJETO INFORMACIONAL

Nesta fase as principais tecnologias de imobilização ortopédica existentes foram analisadas com o objetivo de obter um melhor entendimento sobre o tipo de produto a ser desenvolvido e de verificar eventuais oportunidades de aprimoramento destes tipos de produtos. Além disto, foram estabelecidos e priorizados os requisitos de projeto, com apoio de um glossário e da Matriz da Casa da Qualidade, da

metodologia QFD e, com base neles, as especificações de projeto. Os resultados desta fase são mostrados nas seções que seguem.

### 3.2.1 Análise das tecnologias de imobilização existentes

Três tecnologias de imobilização ortopédica foram identificadas: Imobilização com aparelho gessado (gesso natural ou sintético), tutores e botas imobilizadoras. As principais vantagens e desvantagens de cada uma dessas tecnologias são mostradas, de forma resumida, no Quadro 3.1 (SARMIENTO *et al.*, 1984; KEEFER *et al.*, 2008; BOYD, BENJAMIN e ASPLUND, 2009; SOLOMON, WARWICK e NAYAGAM, 2010).

**Quadro 3.1 – Vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias de imobilização**

	Vantagens	Desvantagens
<b>Gesso</b>	<p>Baixo custo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto peso</li> <li>- Circulação de ar e vapor ineficiente</li> <li>- Não ajustável</li> <li>- Baixas propriedades mecânicas</li> <li>- Não resistente a água</li> <li>- Materiais não recicláveis</li> <li>- Sujeira na “moldagem” e na remoção</li> </ul>
<b>Gesso Sintético</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistente à água</li> <li>- Boa resistência mecânica</li> <li>- Circulação de ar e vapor satisfatória</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativamente pesado</li> <li>- Não ajustável</li> <li>- Custo relativamente alto</li> <li>- Materiais não recicláveis</li> </ul>
<b>Tutor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimentação nas articulações</li> <li>- Baixo peso</li> <li>- Permite ajustes de pressão</li> <li>- Fácil colocação e retirada</li> <li>- Boa circulação de ar e vapor d’água</li> <li>- Boa resistência mecânica (seco ou molhado)</li> <li>- Pode ser fabricado sob medida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo relativamente alto</li> <li>- De aplicação limitada (não aplicável a fraturas nos pés ou tornozelos)</li> <li>- Processo de fabricação sob medida é longo e trabalhoso</li> </ul>
<b>Bota</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimentação controlada das articulações (modelos específicos)</li> <li>- Baixo peso</li> <li>- Fácil colocação, retirada e ajustes</li> <li>- Boa circulação de ar e vapor</li> <li>- Boa resistência mecânica (seco ou molhado)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo relativamente alto</li> <li>- Aplicação limitada a fraturas estáveis e somente após o início do processo de consolidação</li> <li>- Produzidas em massa</li> <li>- Retenção de suor e outros líquidos</li> </ul>

Fonte: Sarmiento *et al.* (1984); Keefer *et al.* (2008); Boyd, Benjamin e Asplund (2009); Solomon, Warwick e Nayagam (2010).

As desvantagens podem ser vistas como oportunidades de melhoria para guiar os projetos de novos produtos para esta finalidade. Para mais informações, consultar o Apêndice B.

### 3.2.2 Determinação dos requisitos e especificações de projeto

O processo de determinação dos requisitos e especificações de projeto teve início com a definição dos requisitos dos usuários, estabelecidos com base em uma revisão bibliográfica (SARMIENTO *et al.*, 1984; HEBERT *et al.*, 2003; HAMBLEN, 2007; KEEFER *et al.*, 2008; BOYD, BENJAMIN e ASPLUND, 2009; SOLOMON, WARWICK e NAYAGAM, 2010) e redigidos com o apoio de um glossário disponível em Back et al (2008), posteriormente validados por uma Fisioterapia. Os requisitos do usuário, ao lado de considerações, são listados no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2 – Requisitos do usuário**

<b>Requisitos do usuário</b>	<b>Considerações</b>
Imobilização eficiente	Deve manter os fragmentos ósseos na posição correta
Alta estabilidade	Deve prover estabilidade ao caminhar
Pressão ajustável	Deve permitir ajustes da pressão em diferentes pontos
Baixo crescimento de microrganismos	A proliferação de fungos e bactérias pode provocar odor, irritações e infecções
Durabilidade	Deve manter a funcionalidade ao longo de todo o tratamento
Proteção ao membro em tratamento	Deve proteger o membro afetado contra novas lesões e evitar o agravamento das lesões existentes
Alto fluxo de ar e vapor d'água	A passagem de ar e vapor d'água evita o acúmulo de suor e acelera a cicatrização de eventuais ferimentos na pele
Manutenção da resistência após expos. à água	Não deve se deteriorar ou perder a função se molhada
Baixo desgaste (base)	A base de apoio não deve se desgastar com facilidade
Alta absorção de impacto	Deve amortecer impactos durante a caminhada
Controle de movimento na articulação do tornozelo	A movimentação da articulação evita o seu enrijecimento, o que acelera o período de recuperação.
Alta aderência ao solo	Deve evitar escorregamentos ao caminhar
Fácil colocação/retirada	Deve permitir fácil colocação e retirada
Mínimo desconforto	Deve provocar pouco desconforto
Não alergênica	Não deve provocar reações alérgicas
De fácil limpeza	Deve ser de fácil limpeza/não deve manchar com facilidade
Transparência aos Raios-X	Deve permitir a geração de radiografias sem a necessidade de remover o dispositivo de imobilização
Custo competitivo ao longo do ciclo de vida	O custo total do tratamento deve ser competitivo em relação as tecnologias disponíveis no mercado atualmente
Baixo impacto ambiental	Deve ter mínimo impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida do produto

Fonte: O autor (2011).

Em seguida, os requisitos de projeto foram estabelecidos com base nos requisitos do usuário e, novamente, com o apoio de um glossário disponível em Back et al (2008). Os requisitos de projeto determinados ao longo deste processo são listados, ao lado dos respectivos atributos e requisitos do usuário, no Quadro 3.3.

**Quadro 3.3 – Requisitos de Projeto**

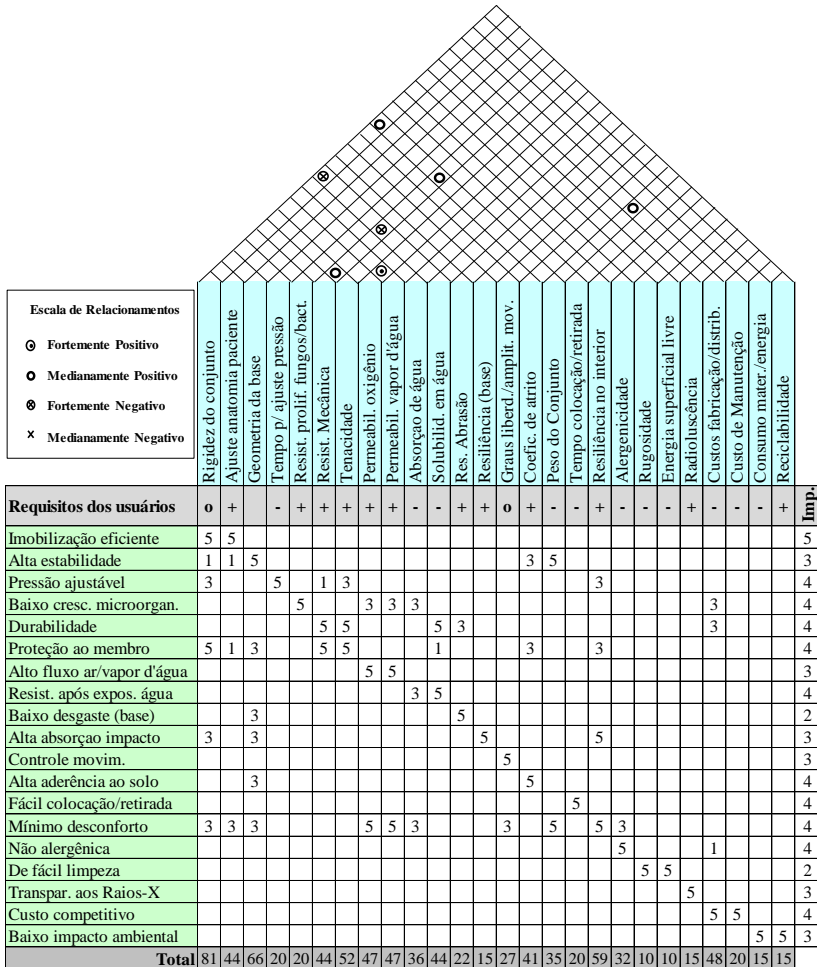
<b>Atributo</b>	<b>Requisito do Usuário</b>	<b>Requisito de Projeto</b>
Funcionalidade	Imobilização eficiente	Rigidez do conjunto
		Ajuste anatomia paciente
Ergonomicidade	Alta estabilidade (ao caminhar)	Geometria da base
Funcionalidade	Pressão ajustável	Tempo p/ ajuste pressão
Materiais	Baixo crescimento de microorganismos	Resist. prolif. fungos/bact.
Robustez	Durabilidade	Resist. Mecânica
		Tenacidade
Segurança	Proteção ao membro em tratamento	Resist. Mecânica
		Tenacidade
Funcionalidade	Alto fluxo de ar e vapor d'água	Permeabil. oxigênio
		Permeabil. vapor d'água
Robustez	Manutenção da res. mecânica após expos. água	Absorção de água
		Solubilid. em água
Robustez	Baixo desgaste (base)	Res. Abrasão
Funcionalidade	Alta absorção de impacto ao caminhar	Resiliência (base)
Funcionalidade	Controle de movimento na articulação	Graus liberd./amplít. mov.
Segurança	Alta aderência ao solo	Coefic. de atrito
Usabilidade	Fácil colocação/retirada	Peso do Conjunto
		Tempo colocação/retirada
Ergonomicidade	Mínimo desconforto	Resiliência no interior
Materiais	Não alergênica	Alergenicidade
Mantenabilidade	De fácil limpeza	Rugosidade
		Energia superficial livre
Materiais	Transparência aos Raios-X	Radioluscência
Fabricabilidade	Custo competitivo ao longo do ciclo de vida	Custos fabricação/distrib.
		Custo de Manutenção
Impacto Ambiental	Baixo impacto ambiental (manufatura/uso/descarte)	Consumo mater./energia
		Reciclabilidade

Fonte: O autor (2011).

A Matriz da Casa da Qualidade foi utilizada para a priorização dos requisitos de projeto. Os requisitos dos usuários receberam um valor de importância, listados na última coluna da direita. Posteriormente, os requisitos de usuários foram relacionados aos requisitos de projeto utilizando a seguinte escala: 0 (zero) – Ausência de relacionamento; 1 (um) – Relacionamento fraco; 3 (três) – Relacionamento médio e 5 (cinco) – Relacionamento forte.

Em seguida foram estabelecidos relacionamentos entre os requisitos de projeto, indicados no teto da Casa da Qualidade. A Matriz da Casa da Qualidade obtida é mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Matriz da Casa da Qualidade



Fonte: O autor (2011).

Os requisitos de projetos foram classificados com base nos valores de importância dos requisitos dos usuários e nos valores dos relacionamentos entre os requisitos de usuários e os requisitos de

projeto (somatório do produto entre o grau de importância e o valor do relacionamento). A lista de requisitos de projeto priorizados (em ordem decrescente de importância) é mostrada no Quadro 3.4.

**Quadro 3.4 – Requisitos de projeto priorizados**

<b>Classificação</b>	<b>Requisito de Projeto</b>
1	Rigidez do conjunto
2	Geometria da base
3	Resiliência da superfície em contato com o pé/perna
4	Tenacidade
5	Custos de fabricação e distribuição
6	Permeabilidade ao oxigênio
7	Permeabilidade ao vapor d'água
8	Ajuste a anatomia do paciente
9	Resistência Mecânica (curto e longo prazo)
10	Solubilidade em água dos materiais de construção
11	Coefficiente de atrito da superfície em contato com o solo
12	Absorção de água dos materiais de construção
13	Peso do Conjunto
14	Alergenicidade dos materiais de construção
15	Graus de liberdade/amplitude de movimento no tornozelo
16	Resistência a abrasão da superfície em contato com o solo
17	Tempo para ajuste de pressão
18	Resistência a proliferação de fungos e bactérias
19	Tempo de colocação e retirada
20	Custo de Manutenção
21	Resiliência da superfície em contato com o solo
22	Radiolucência dos materiais de construção
23	Consumo de materiais/energia para fabricação e distribuição
24	Reciclabilidade
25	Rugosidade da superfície externa
26	Energia superficial livre da região externa

Fonte: O autor (2011).

Com base nos requisitos de projeto, foram estabelecidas as especificações de projeto, resumidas no Quadro 3.5.

**Quadro 3.5 – Especificações de projeto**

<b>Descrição da Especificação</b>	<b>Verificação</b>	<b>Riscos</b>
Rigidez do conjunto: O conjunto montado deve ter rigidez adequada para manter os fragmentos ósseos em posição para permitir a consolidação da fratura	Simulação Computacional	Tratam. Ineficiente
Geometria da base: A base do sistema de imobilização deve ter uma geometria que ofereça estabilidade ao paciente em repouso e durante caminhadas	Teste de estabilidade	Quedas
Resiliência da superfície em contato com o pé/perna: As superfícies em contato com a pele de paciente devem ser macias/resilientes para oferecer conforto	Ensaio de resiliência	Desconforto
Tenacidade: Os materiais de fabricação devem ter elevada tenacidade, de forma se manter íntegros após a aplicação de cargas de impacto	Ensaio resist. impacto	Fragilidade
Custos de fabricação/distribuição: Os custos de fabricação e distribuição devem ser similares aos dos tratamentos disponíveis comercialmente no momento	Contabilidade de custos	Inviabilidade econômica
Permeab. ao oxigênio: O sistema de imobilização deve permitir a circulação de oxigênio, o que contribui para o processo de cicatrização de eventuais feridas	Ensaio permeab. ao oxigênio	Longo tempo de cicatrização
Permeabilidade ao vapor d'água: O sistema de imobilização deve permitir a eliminação de vapor d'água de forma a evitar o crescimento de microorganismos	Ensaio permeab. ao vapor	Desconforto; Mal cheiro
Ajuste à anatomia do paciente: O sist. de imobilização deve se adaptar à anatomia do paciente de forma a manter uma pressão uniforme sobre o membro lesionado	Prova no paciente	Pressão não uniforme
Resist. Mecânica: Os materiais de construção devem possuir suficiente resist. mecânica, de forma a se manter íntegros após a aplicação de carregamentos	Ensaio resist. mecânica	Baixa durabilidade
Solubilidade em água dos materiais de construção: Os materiais de construção devem se manter íntegros após exposição à água	Ensaio de solubilidade	Falha prematura
Coefficiente de atrito: O material utilizado p/ a fabricação da superf. em contato com o solo deve ter um alto coef. de atrito, de modo a evitar escorregamentos	Teste de atrito	Escorregamento
Absorção de água dos materiais de construção: Os materiais de construção devem ser hidrofóbicos de forma a evitar o crescimento de microorganismos	Ensaio absorção de água	Desconforto; Mal cheiro
Peso do Conjunto: O peso do conjunto deve ser mínimo para evitar gerar desconforto para o paciente	Pesagem	Desconforto
Alergenicidade dos materiais de construção: Os materiais de construção em contato com a pele do paciente devem ser não-alérgicos	Teste de alergenicidade	Reações alérgicas
Graus de liberdade/amplitude de movim.: O sistema de imobil. deve permitir a movim. controlada do tornozelo para evitar o enrijecimento dessa articulação	Teste funcional	Enrijecimento da articulação
Resistência a abrasão: A superfície em contato com o solo deve ter alta resistência à abrasão p/ evitar o desgaste prematuro	Ensaio resist. a abrasão	Desgaste prematuro
Tempo p/ ajuste de pressão: O processo de ajuste de pressão deve ter curta duração	Cronometragem	Usuários insatisfeitos
Resistência a proliferação de fungos e bactérias: Os materiais de construção não devem permitir o crescimento de microorganismos	Testes microbiológicos	Desconforto; mal cheiro
Tempo de colocação e retirada: Os processos de colocação e retirada devem ter curta duração	Cronometragem	Usuários insatisfeitos
Custo de Manutenção: O custo de manutenção deve ser compatível com os dos sistemas de imobilização disponíveis comercialmente no momento	Contabilidade de custos	Usuários insatisfeitos
Resiliência da superfície em contato com o solo: A superfície em contato com o solo deve ter alta resiliência, de forma a amortecer os impactos ao caminhar	Ensaio de resiliência	Baixa absorção de impactos
Radiolescência: Os materiais de construção devem ser radioisotópicos, permitindo a realização de radiografias sem a necessidade de remover a imobilização	Raios-X	Incômodo ao usuário
Consumo de materiais/energia p/ fabricação e distribuição: O consumo de materiais e de energia deve estar próximo do de produtos disponíveis no mercado	Peso; Consumo de energia	Alto impacto ambiental
Reciclabilidade: No mínimo 85% (em peso) dos materiais utilizados para a fabricação do sistema de imobilização devem ser recicláveis	% de materiais recicláveis	Alto impacto ambiental
Rugosidade da superfície externa: A superfície externa deve ter baixa rugosidade, para evitar o acúmulo de sujeira e para facilitar a limpeza	Medição da rugosidade	Acúmulo sujeira
Energia superficial livre: O material utilizado p/ a fabricação da parte externa deve ter baixa energia superficial livre, de forma a evitar o acúmulo de sujeira	Medição da energ. superfic.	Acúmulo sujeira

Fonte: O autor (2011).



### 3.3 PROJETO CONCEITUAL

Esta fase teve por objetivo o desenvolvimento da concepção do produto. O método da Matriz Morfológica foi utilizado para a geração e análise de concepções alternativas e a Matriz de Pugh foi utilizada para a seleção da concepção mais adequada aos objetivos do projeto.

Como ponto de partida para a elaboração da Matriz Morfológica foram definidas as funções a serem desempenhadas pelo produto com base nas especificações, geradas na etapa de Projeto Informacional, e por analogia com sistemas de imobilização existentes, descritos no tópico 3.2.1. Tais funções são listadas a seguir:

- Função principal:
  - Prover imobilização.
- Funções elementares:
  - Permitir ajustes de pressão;
  - Permitir a circulação de ar e vapor d'água;
  - Absorver impactos (ao caminhar);
  - Permitir movimentos na articulação do tornozelo;
  - Prover conforto.

Em seguida, soluções alternativas foram concebidas para cada uma das funções elementares e compiladas no Quadro 3.6. As soluções apresentadas foram baseadas em sistemas de imobilização existentes, descritos no tópico 3.2.1, assim como foi feito para o desdobramento das funções, e também em outros produtos disponíveis no mercado, como calçados esportivos e botas para esqui.

Algumas das soluções foram descartadas imediatamente e não foram consideradas para a elaboração de concepções alternativas por serem consideradas inadequadas devido a diferentes fatores – As cintas com velcro apresentam baixo desempenho quando molhadas, e um dos objetivos do projeto é desenvolver um produto que mantenha a funcionalidade quando molhado. A estrutura treliçada foi descartada pela alta complexidade, o que implicaria em um tempo muito longo de modelagem. Os acolchoados de algodão e de poliéster retêm umidade, o que pode gerar efeitos negativos para o usuário, como descrito anteriormente.

Quadro 3.6 – Soluções alternativas

Funções	Soluções Alternativas			
	A	B	C	D
<b>Permitir ajustes de pressão</b>	<del> <p><b>Cintas com velcro</b></p> <p>As cintas c/ velcro são comumente utilizadas em botas imobilizadoras. Elas oferecem a vantagem de uma fácil fixação a um custo relativamente baixo, porém com a desvantagem de não terem uma boa fixação quando molhadas.</p> </del>	<p><b>Cintas/fivelas</b></p> <p>Cintas e fivelas, como as utilizadas em bolsas, artigos esportivos e calçados, oferecem a vantagem de uma boa fixação mesmo quando molhadas. Seu custo é ligeiramente superior ao das cintas com velcro.</p>	<p><b>Grampos</b></p> <p>Grampos aqui se referem aos sistemas de fixação e ajuste de pressão utilizados em botas de esqui. Possivelmente são os sistemas mais eficientes disponíveis no mercado para esse fim atualmente, porém, também os mais caros.</p>	<p><b>Cadaço</b></p> <p>Cadaços representam uma forma com boa relação custo-benefício para a fixação e ajuste de pressão em calçados. A grande desvantagem dessa alternativa é que podem se soltar com facilidade.</p>
<b>Permitir a circulação de vapor d'água e oxigênio</b>	<p><b>Materiais com alta permeabilidade ao vapor e ao oxigênio</b></p> <p>Alguns materiais possuem, naturalmente, uma alta permeabilidade ao vapor e ao oxigênio. É importante notar que estes materiais tendem a custar mais que materiais convencionais.</p>	<p><b>Furos</b></p> <p>Furos – microscópicos e/ou macroscópicos – podem ser altamente eficientes para a circulação de vapor e oxigênio, com a vantagem de serem fáceis de modelar em um sistema CAD.</p>	<del> <p><b>Estrutura treliçada</b></p> <p>Estruturas treliçadas oferecem a vantagem de alta resistência mecânica aliada a baixo peso. A desvantagem é a relativa dificuldade de modelagem em um sistema CAD.</p> </del>	
<b>Absorver impactos (ao caminhar)</b>	<p><b>Solas de elastômero</b></p> <p>Elastômeros são comumente utilizados para a fabricação de solados de calçados e também de botas imobilizadoras. Estes materiais oferecem ao mesmo tempo absorção de impacto e boa aderência ao solo.</p>	<p><b>"Amortecedores"</b></p> <p>Por amortecedores aqui se entendem sistemas de amortecimento de impacto fabricados em elastômeros, como os utilizados em tênis esportivos.</p>		
<b>Permitir movimentos na articulação do tornozelo</b>	<p><b>Junta de rotação</b></p> <p>O uso de uma junta de rotação permite um melhor controle do movimento. Entretanto, requer um número maior de componentes, o que tende a aumentar o risco de falhas e a dificultar a manutenção.</p>	<p><b>Articulação Flexível</b></p> <p>Uma articulação flexível tende a minimizar os problemas associados a uma junta de rotação (maior risco de falhas e manutenção mais difícil).</p>		
<b>Prover conforto</b>	<p><b>Acolchoado de material hidrofóbico e respirável</b></p> <p>Materiais hidrofóbicos e respiráveis têm sido utilizados c/ sucesso em conjunto com gesso sintético para imobilizações ortopédicas. Sua desvantagem é o custo relativamente alto.</p>	<del> <p><b>Acolchoado de algodão</b></p> <p>Algodão é o material tradicionalmente utilizado para acolchoamento em imobilizações gessadas. Esse material tem um custo baixo, porém tem o inconveniente de absorver grandes quantidades de umidade.</p> </del>	<del> <p><b>Acolchoado de poliéster</b></p> <p>Tecidos de poliéster oferecem maior conforto em relação aos acolchoados de algodão – todo mais macio e menor absorção de umidade – porém a um custo relativamente mais alto.</p> </del>	

Fonte: O autor (2011).

As concepções alternativas elaboradas são mostradas no Quadro 3.7.

**Quadro 3.7 – Concepções alternativas**

Funções	Concepção # 1	Concepção # 2	Concepção # 3	Concepção # 4
Permitir ajustes de pressão	B	C	C	D
Permitir a circulação de ar e vapor d'água	A + B	A + B	A + B	A + B
Absorver impactos (ao caminhar)	A	A + B	A + B	A
Permitir movimentos na articulação do tornozelo	B	B	A	B
Prover conforto	A	A	A	A

Fonte: O autor (2011).

A seleção da concepção mais adequada aos objetivos do projeto foi feita por meio do método de Pugh, utilizando critérios de seleção adaptados de Back *et al* (2008, pg. 370). Da lista apresentada em Back *et al* (2008) foram excluídos alguns critérios considerados não essenciais para este projeto – Fácil transporte, alta inovação e fácil armazenagem. Por sua vez, outros critérios considerados importantes para o projeto foram acrescentados – Conforto, durabilidade e complexidade. Os resultados desta etapa do processo são resumidos no Quadro 3.8.

**Quadro 3.8 – Matriz de Pugh**

Critérios de Seleção	C1	C2	C3	C4
Atendimento à Função	0	0	0	0
Tecnicamente Viável	0	0	0	0
Custo Competitivo	0	-	-	+
Fácil Manutenção	0	-	-	0
Alta Confiabilidade	0	+	+	-
Boa Aparência	0	0	0	0
Fácil Uso	0	+	+	0
Apropriado ao Meio Ambiente	0	0	0	0
Segurança	0	0	0	-
Conforto	0	0	0	0
Durabilidade	0	0	0	0
Complexidade	0	-	-	0
Total	0	-1	-1	-1

Fonte: O autor (2011).

Com base no resultado do método de Pugh, a concepção C1 foi selecionada – mais detalhes no Quadro 3.9

**Quadro 3.9 – Descrição da concepção selecionada**

<b>Função</b>	<b>Solução Escolhida</b>
<b>Permitir ajustes de pressão</b>	Cinta/fivela
<b>Permitir a circulação de ar e vapor d'água</b>	Material com alta permeabilidade ao vapor e ao oxigênio + Furos Macroscópicos
<b>Absorver impactos (ao caminhar)</b>	Sola de elastômero
<b>Permitir movimentos na articulação do tornozelo</b>	Articulação Flexível
<b>Prover conforto</b>	Acolchoado de material sintético hidrofóbico e respirável

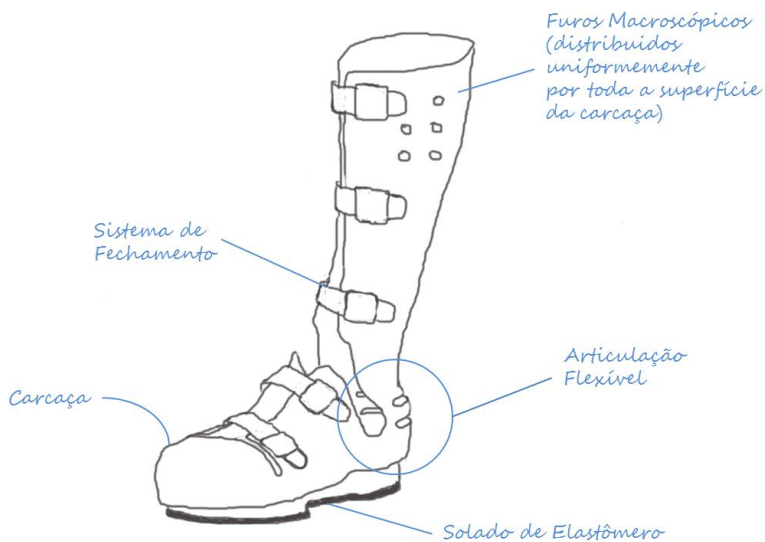
Fonte: O autor (2011).

Baseado nos resultados das etapas de projeto informacional e conceitual pode-se conceber um sistema de imobilização, ou bota, composto de quatro partes principais:

- Uma carcaça fabricada com um material de alta resistência mecânica, rigidez e resistência à fadiga, capaz de prover imobilização e de oferecer proteção ao membro lesionado, com furos macroscópicos para auxiliar na circulação de ar e de vapor d'água e com uma articulação flexível, que permita a movimentação controlada do tornozelo;
- Uma base ou solado de elastômero, capaz de absorver impactos e de prover aderência ao solo;
- Um sistema de fechamento e ajuste de pressão, baseado em cintas e fivelas, capaz de fixar a bota ao corpo e de permitir o ajuste de pressão em diferentes pontos quando necessário;
- Um acolchoado hidrofóbico e respirável, que não provoque reações alérgicas e que permita uma rápida cicatrização de ferimentos na pele.

Um esboço do sistema de imobilização proposto é mostrado na Figura 3.4.

**Figura 3.4 – Esboço do sistema de imobilização**



Fonte: O autor (2011).

### 3.4 PROJETO PRELIMINAR

Nesta etapa foram definidos quais componentes ou subconjuntos do sistema de imobilização – carcaça, solado, sistema de fechamento/ajuste e acolchoado – seriam projetados e produzidos pelo CIMJECT ou através de seus parceiros e quais seriam comprados de terceiros. Posteriormente, os leiautes, os materiais de construção e os processos de fabricação dos componentes do produto a serem projetados e produzidos pelo CIMJECT ou através de seus parceiros foram estabelecidos.

Optou-se por comprar de terceiros os componentes do sistema de fechamento/ajuste e o acolchoado, e por fabricar, por métodos aditivos, a carcaça e o solado. Julgou-se que não seria viável produzir por métodos aditivos os sistemas de fechamento/ajuste e o acolchoado com as mesmas características de produtos existentes no mercado com os recursos e o tempo disponível, daí a opção pela compra de terceiros.

A seguir as decisões relacionadas a escolha dos itens comprados de terceiros e o processo de desenvolvimento dos componentes a serem produzidos pelo CIMJECT são delineados.

### 3.4.1 Sistema de fechamento

Depois de uma pesquisa por alternativas, foi escolhido um produto fabricado pela empresa brasileira Piter Pan Indústria e Comércio Ltda<sup>3</sup>. O produto consiste em um conjunto de cinta e fivela – a cinta fabricada em material termoplástico flexível e a fivela em metal. Decidiu-se utilizar cinco conjuntos de cinta e fivela no total, usando como referência outras botas imobilizadoras disponíveis no mercado. O conjunto de cinta e fivela escolhido é mostrado na Figura 3.5.

**Figura 3.5 – Conjunto de cinta e fivela**



Fonte: Disponível no site <<http://www.piterpan.com.br>>. Acesso em: 2011.

### 3.4.2 Acolchoado hidrofóbico e com alta permeabilidade ao vapor e ao oxigênio

Após analisar diferentes alternativas, optou-se por um acolchoado fabricado pela empresa W. L. Gore & Associates Inc., dos EUA, comercializado com a marca Gore Procel Cast Liner (W. L. Gore & Associates Inc., 2006). Quando utilizado em conjunto com gesso sintético, esse produto permite que pacientes com membros imobilizados possam tomar banho ou desempenhar outras atividades em contato com água livremente, como ilustrado na Figura 3.6.

---

<sup>3</sup> Site disponível em: <<http://www.piterpan.com.br>>.

**Figura 3.6 – Pacientes imobilizados com aparelhos gessados (gesso sintético) com acolchoado Gore Procel desempenhando atividades em contato com água**



Fonte: W. L. Gore & Associates Inc. (2006).

Na Figura 3.7 é ilustrado o processo de aplicação do acolchoado Gore Procel sobre um membro inferior.

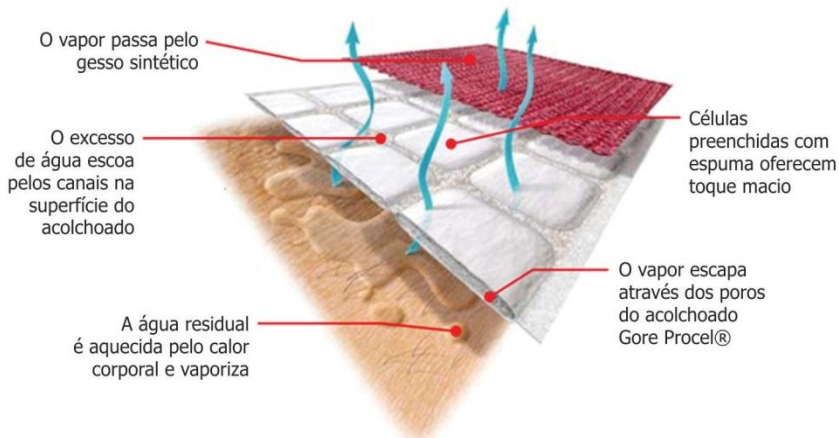
**Figura 3.7 – Aplicação do acolchoado Gore Procel**



Fonte: W. L. Gore & Associates Inc. (2001).

Na Figura 3.8 é ilustrado o princípio de funcionamento do acolchoado Gore Procel.

**Figura 3.8 – Ilustração do princípio de funcionamento do acolchoado Gore Procel**



Fonte: W. L. Gore & Associates Inc. (2006).

### 3.4.3 Carcaça

O leiaute da carcaça foi criado a partir de um modelo CAD 3D da superfície da perna de uma pessoa. O processo de digitalização e de geração do modelo CAD seguiu a metodologia adotada pela empresa Technosim, onde foi realizada esta etapa do trabalho.

A seguir são descritos os principais passos para a obtenção do leiaute da carcaça.

#### *Escaneamento e geração do modelo de superfície da perna*

Um escâner de luz estruturada, modelo FMM 3D, fabricado pela empresa brasileira Spatium<sup>4</sup>, foi utilizado para o processo de captura de dados (Figura 3.9).

<sup>4</sup> Disponível em: <<http://www.spatium3d.com>>. Acesso em: 2010.



**Figura 3.9 – Escâner tridimensional utilizado para o processo de digitalização**



Fonte: O autor (2011).

Na Figura 3.10 pode-se observar uma etapa do processo de digitalização.

**Figura 3.10 – Captura de dados através de escâner 3D de luz estruturada**



Fonte: O autor (2011).

O processo de captura ocorreu em diversas tomadas, gerando diferentes nuvens de pontos que precisaram ser alinhadas em seguida para permitir a geração de uma única superfície em uma etapa posterior.

Para facilitar o alinhamento das diferentes nuvens de pontos, adesivos chamados de *targets* ou alvos foram aplicados à superfície a ser digitalizada, como pode ser observado na Figura 3.11.

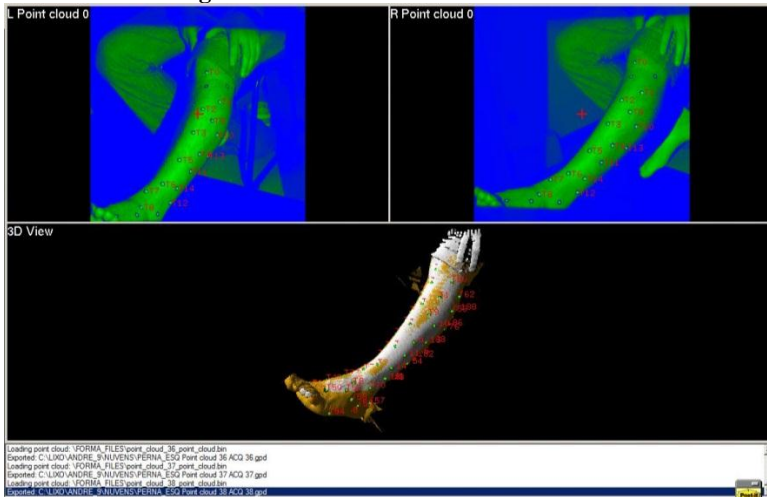
**Figura 3.11 – Targets utilizados para facilitar o processo de alinhamento de nuvens de pontos**



Fonte: O autor (2011).

O *software* Forma 4 (Figura 3.12), também desenvolvido pela empresa Spatium<sup>5</sup>, foi utilizado para o gerenciamento do processo de captura e para a fase inicial de tratamento de dados – eliminação de redundâncias e alinhamento das diferentes nuvens de pontos.

**Figura 3.12 – Tela do software Forma 4**



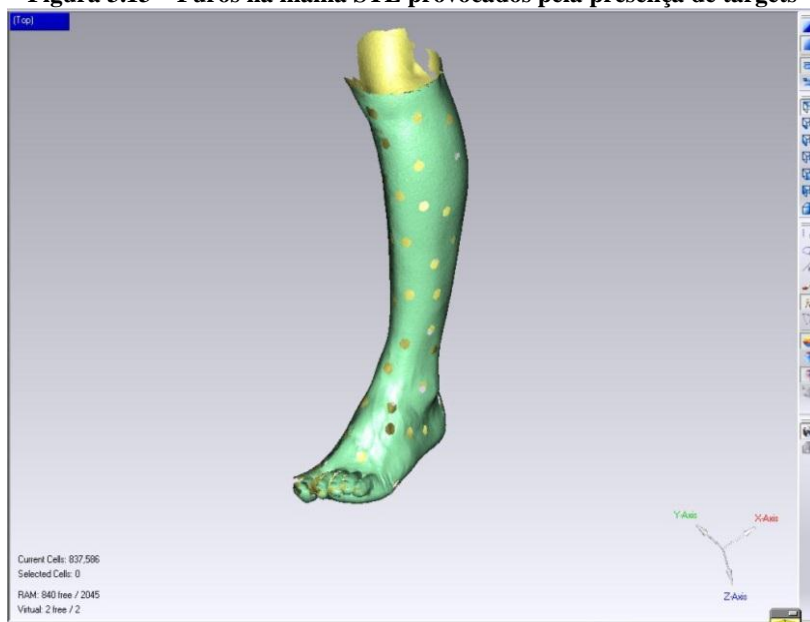
Fonte: O autor (2011).

<sup>5</sup> Disponível em: <<http://www.spatium3d.com>>. Acesso em: 2010.

O *software* Geomagic Studio, comercializado pela empresa Geomagic Inc.<sup>6</sup>, foi utilizado para o tratamento avançado de dados, geração de uma malha de triângulos no padrão STL e posterior geração de um modelo de superfícies no padrão NURBS (do inglês *Non Uniform Rational B-Splines*).

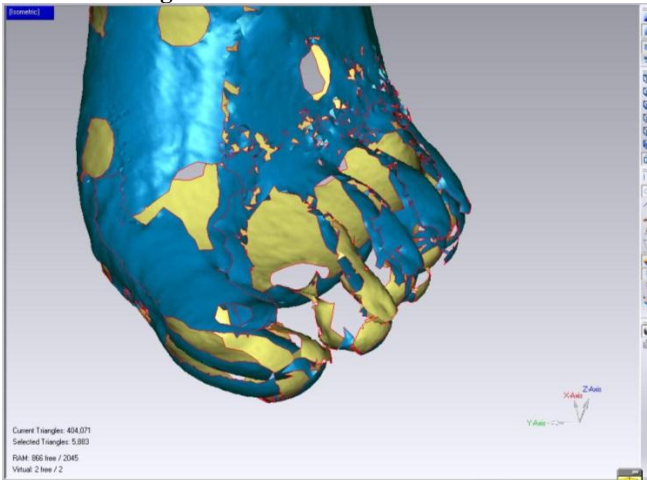
Durante os processos de captura e de tratamento de dados, alguns defeitos podem surgir e precisam ser corrigidos manualmente, como os furos mostrados na Figura 3.13, provocados pela presença dos *targets*, e as falhas mostradas na Figura 3.14, provocadas por pequenos movimentos da superfície durante o processo de captura.

**Figura 3.13 – Furos na malha STL provocados pela presença de targets**



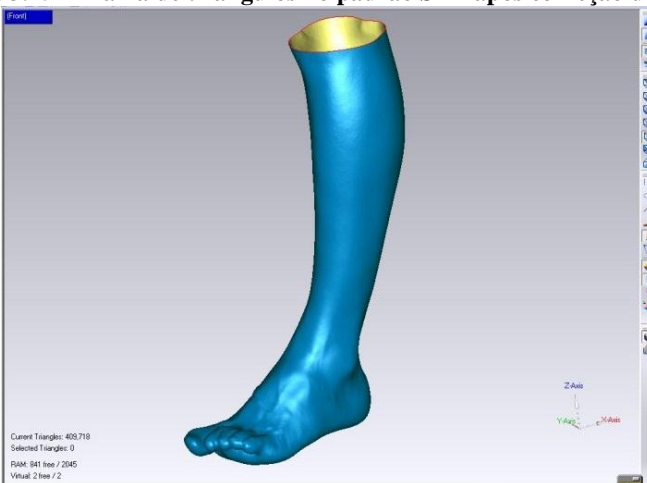
Fonte: O autor (2011).

<sup>6</sup> Disponível em: <<http://www.geomagic.com>>. Acesso em: 2011.

**Figura 3.14 – Falhas na malha STL**

Fonte: O autor (2011).

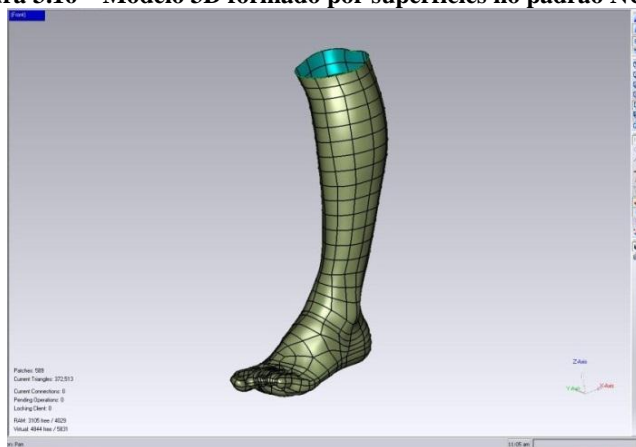
Na Figura 3.15 pode-se observar a malha STL após correção das falhas.

**Figura 3.15 – Malha de triângulos no padrão STL após correção de falhas**

Fonte: O autor (2011).

Na Figura 3.16 pode-se observar o modelo 3D de superfícies.

**Figura 3.16 – Modelo 3D formado por superfícies no padrão NURBS**



Fonte: O autor (2011).

### ***Leiaute***

A modelagem ou geração do leiaute da carcaça teve como ponto de partida o modelo 3D da superfície da perna criado na etapa anterior (Figura 3.17). O *software* Catia<sup>7</sup> (CAD 3D), comercializado pela empresa Dassault Systemes, foi utilizado para a modelagem.

**Figura 3.17 – Modelo de perna**



Fonte: O autor (2011).

A superfície interna da carcaça foi criada através de uma projeção da superfície da perna com um *offset* de 2,0 mm. Essa folga foi

<sup>7</sup> Site do software disponível em: <<http://www.3ds.com/products-services/catia>>. Acesso em: 2011.

deixada para acomodar o acolchoado entre a superfície da perna e o sistema de imobilização. O próximo passo consistiu em determinar a espessura de parede da carcaça. Foi adotado um valor de 3,0 mm, usando como referência uma bota imobilizadora disponível no mercado. Aqui, novamente uma nova superfície foi criada através da projeção de uma superfície existente – nesse caso, a superfície que forma o interior do sistema de imobilização. Posteriormente, a parte frontal do sistema de imobilização foi remodelada para deixar espaço para a movimentação dos dedos – conforme a literatura médica, a movimentação dos dedos é benéfica para a recuperação do paciente, exceto quando eles estão lesionados. Em seguida, foram feitas aberturas na bota para permitir que ela fosse calçada com facilidade. Aqui, optou-se por modelar uma peça única, que possa ser calçada e retirada aplicando uma pequena força para abri-la. Posteriormente, foram feitos alívios na região do tornozelo, para permitir a movimentação dessa articulação. O próximo passo foi criar furos para permitir a circulação de ar e vapor d'água. Na sequência, foram criados castelos para fixação das cintas e fivelas. E, por último, foi criada uma base para prover estabilidade ao caminhar e permitir a fixação do solado. O resultado final pode ser visto nas Figura 3.18 e Figura 3.19.

**Figura 3.18 – Modelo 3D da bota visto de diferentes ângulos**



Fonte: O autor (2011).

**Figura 3.19 – Modelo 3D da bota sobre a perna**



Fonte: O autor (2011).

### ***Seleção de material***

A metodologia de seleção de materiais desenvolvida por Ashby (Ashby, 2010) foi utilizada nesta etapa. Ashby recomenda a utilização de materiais com altos valores para o índice de mérito  $M_3$  (equação 3.1) para a fabricação de produtos sujeitos a grandes deformações dentro do limite elástico.

$$M_3 = \frac{K_{1C}}{E} \quad (3.1)$$

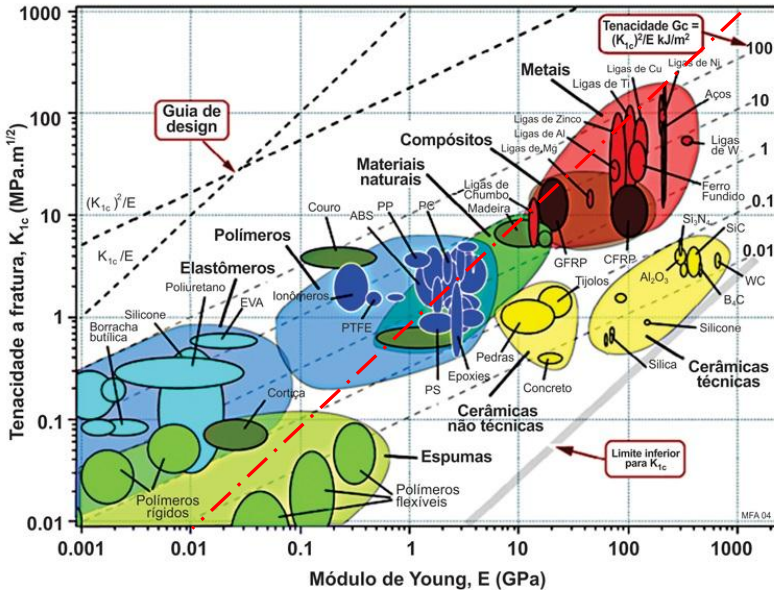
Onde:

$K_{1C}$  representa a Tenacidade à Fratura, uma medida da dificuldade da propagação de fraturas de um material;

$E$  representa o Módulo de Elasticidade do material.

Através do gráfico de Tenacidade à Fratura versus Módulo de Young (Figura 3.20) é possível selecionar diferentes grupos e classes de materiais utilizando o índice  $M_3$ .

Figura 3.20 – Tenacidade a Fratura versus Módulo de Young



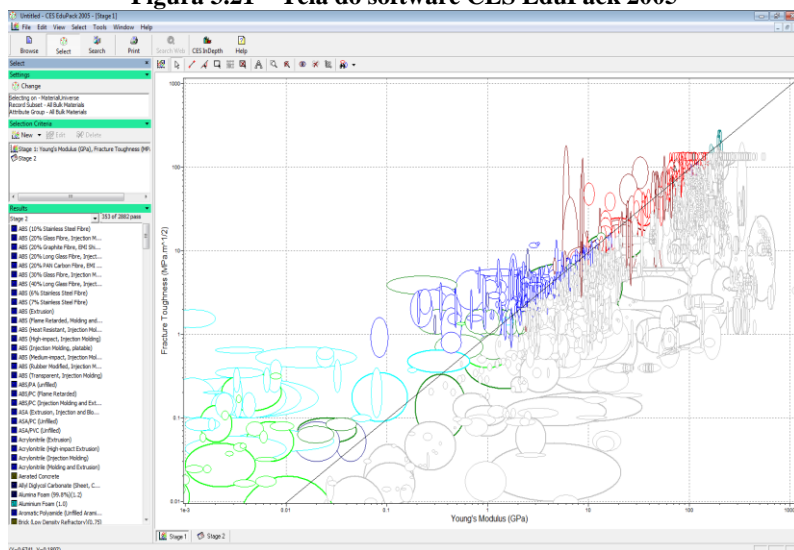
Fonte: Ashby (2010)

Plotando o índice  $M_3$  no gráfico de Tenacidade a fratura versus módulo de Young, obtém-se uma linha – chamada de guia de *design* – com coeficiente angular igual a 1. Ashby recomenda plotar essa linha a partir de  $E = 0,01$  GPa e  $K_{Ic} = 0$  MPa.m<sup>1/2</sup>, como mostrado no gráfico (fig. 51) – linha traço e ponto –, para separar os materiais apropriados para fabricação de produtos sujeitos a altas deformações. Os materiais à esquerda dessa linha são considerados os mais adequados para essa finalidade. Como se pode observar no gráfico, algumas ligas metálicas, certos tipos de compósitos, alguns materiais naturais, determinadas espumas e diversos tipos de polímeros termoplásticos e elastômeros são alternativas viáveis tecnicamente em princípio. Dentro das opções do grupo dos metais, estão ligas baseadas em titânio e em zinco. Essas alternativas foram descartadas devido a sua alta densidade e o seu alto custo. Os elastômeros e espumas foram descartados por possuírem baixo módulo de elasticidade. Os compósitos e materiais naturais foram excluídos por não serem processáveis por métodos aditivos. Restou, portanto, o grupo de polímeros termoplásticos.



O uso de gráficos de propriedades para a seleção de materiais, como o da Figura 3.20, permite uma rápida escolha de grupos (metais, cerâmicas, polímeros) e até mesmo de determinadas classes de materiais (poliamidas, poliolefinas, etc.) de interesse. Entretanto, o nível de detalhes oferecido por esses gráficos não permite identificar todas as classes e graus específicos de materiais dentro de um grupo pré-selecionado. Para contornar esse problema, foi utilizado o *software* CES EduPack 2005<sup>8</sup> (Figura 3.21), comercializado pela empresa Granta Design, que permite a seleção computadorizada de diferentes graus de materiais utilizando o método proposto por Ashby.

Figura 3.21 – Tela do software CES EduPack 2005



Fonte: O autor (2011).

Utilizando os mesmos critérios descritos anteriormente, obteve-se uma lista de 353 candidatos, de um total de mais de 2800 graus de materiais disponíveis na base de dados do programa. Entretanto, a base de dados do CES EduPack não possui opções de materiais específicos para Manufatura Aditiva. Os materiais candidatos à aplicação pré-selecionados são termoplásticos processáveis por tecnologias

<sup>8</sup> Site do *software* disponível em:

<<http://www.grantadesign.com/education/edupack/index.htm>>. Acesso em: 2011.

convencionais, como moldagem por injeção ou extrusão. Todavia, determinados graus de termoplásticos para processamento por métodos aditivos pertencem às mesmas famílias de materiais recomendadas pelo *software* – são elas: Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS), Poliamida 11 (PA 11), Poliamida 12 (PA 12), Policarbonato (PC), Poliéter-éter-cetona (PEEK), Poliéter-imida (PEI), Poliestireno (PS) e Polissulfona (PSU). Portanto, essas famílias foram utilizadas como referência para a seleção dos graus de materiais para Manufatura Aditiva. Duas tecnologias de Manufatura Aditiva podem ser utilizadas para processar tais materiais – FDM e LS (Hopkinson, Hague e Dickens, 2006). No Quadro 3.10 esses materiais são relacionados às tecnologias de AM.

**Quadro 3.10 – Tecnologias AM versus materiais**

<b>Material</b>	<b>FDM</b>	<b>LS</b>
Acrilonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)	X	
Poliamida 11 (PA 11)		X
Poliamida 12 (PA 12)		X
Policarbonato (PC)	X	
Poliéter-éter-cetona (PEEK)		X
Poliéter-Imida (PEI)	X	
Poliestireno (PS)		X
Polissulfona (PSU)	X	

Fonte: Hopkinson, Hague e Dickens (2006).

Optou-se por utilizar a tecnologia LS e descartar a FDM pelas seguintes razões:

- O tempo de fabricação com a tecnologia FDM é, no geral, consideravelmente mais longo que com a tecnologia LS;
- A tecnologia FDM requer o uso de suportes para fabricação de partes em balanço, o que implica em uso de material extra que não pode ser reaproveitado no mesmo processo;
- As propriedades mecânicas das peças fabricadas com a tecnologia FDM em geral são inferiores as das peças fabricadas com a tecnologia LS;
- A tecnologia LS mostrou-se capaz de fabricar produtos com elevada resistência mecânica, incluindo produtos utilizados em condições similares ao produto em desenvolvimento aqui, como soquetes de próteses e calçados femininos, conforme ilustrado na seção de revisão bibliográfica e nos apêndices.

Com isso, restaram quatro grupos de materiais: PA 11, PA12, PEEK e PS. A família dos Poliestirenos (PS) foi imediatamente eliminada das opções, uma vez que esses materiais, quando processados por métodos aditivos, produzem peças com propriedades mecânicas muito baixas. Os graus de PS normalmente são utilizados na Manufatura Aditiva para a fabricação de modelos para o processo de fundição, que não requerem alta resistência mecânica. O grupo PEEK foi excluído devido ao custo elevado. Os grupos restantes – PA 11 e PA 12 – foram analisados em relação aos principais requisitos e especificações de projeto. Dois graus de PA sem reforço foram pré-selecionados com base nos casos relatados na revisão de literatura – PrimePart DC PA 12 e PrimePart PA 11, ambos materiais para LS e fabricados pela empresa alemã EOS<sup>9</sup>. O **PrimePart DC PA 12** é um material baseado em poliamida 12 com excelentes propriedades, como alta resistência mecânica e rigidez e boa resistência química. Além disso, possui uma granulometria bastante fina, o que permite a fabricação de peças com pequenos detalhes, e é biocompatível, de acordo com a norma norte americana USP (do inglês *United States Pharmacopoeia*) classe VI, o que permite que seja utilizado em aplicações em contato permanente com o corpo humano. O **PrimePart PA 11** é um material baseado em poliamida 11 e possui excelentes propriedades físicas: Alta elasticidade, elevada resistência ao impacto e excelente resistência química. Esse material é frequentemente utilizado em peças sujeitas a altos esforços e deformações, para trabalho em temperaturas entre -40°C e +130°C. As propriedades mecânicas desses dois materiais são apresentadas no Quadro 3.11.

**Quadro 3.11 – Propriedades mecânicas de dois graus de PA para LS**

Propriedade	Norma	Unidade	Prime Part DC PA12	Prime Part PA11
Módulo de Elasticidade (tração)	ISO 527	MPa	1700	1550
Resistência à Tração	ISO 527	MPa	50	50
Alongamento (ruptura)	ISO 527	%	24	48
Resistência ao Impacto Charpy	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	53	NB
Resistência ao Impacto Charpy c/ entalhe	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	4.8	8.9
Módulo de Elasticidade (flexão)	ISO 178	MPa	1500	1420
Resistência à flexão	ISO 178	MPa	58	55
Resistência ao Impacto c/ entalhe	ISO 180	kJ/m <sup>2</sup>	4.4	8.9
Dureza Shore D (15s)	ISO 868	-	75	68

Fonte: Disponível no site <<http://www.eos.info/en>>. Acesso em: 2011.

<sup>9</sup> Site da empresa disponível em: <<http://www.eos.info/en>>. Acesso em: 2011.

A seguir esses materiais são avaliados em relação aos requisitos de projeto relacionados ao material de construção, utilizando o método de Pugh (Quadro 3.12).

**Quadro 3.12 – Matriz de Pugh utilizada para a seleção do material para a carcaça**

<b>Requisito de Projeto</b>	<b>PA 11</b>	<b>PA 12</b>	<b>Comentários</b>
Rigidez do conjunto	0	+	Avaliação feita com base no módulo de elasticidade dos dois materiais
Tenacidade	0	-	Avaliação feita com base na resistência ao impacto dos dois materiais
Custos de fabricação e distribuição	0	0	
Resistência Mecânica (curto e longo prazo)	0	-	Avaliação feita com base na resistência a flexão dos dois materiais
Solubilidade em água dos materiais de construção	0	0	
Peso do Conjunto	0	0	
Absorção de água dos materiais de construção	0	0	As poliamidas 11 e 12 são conhecidas por absorverem pequenas quantidades de água
Graus de liberdade/amp. de mov. no tornozelo	0	-	Avaliação feita com base no alongamento dos dois materiais
Alergenicidade dos materiais de construção	0	+	A PA12 tem um desempenho superior ao da PA11 neste ponto, porém, isso não desclassifica a PA11, pois a carcaça não estará em contato direto com a pele
Resistência a proliferação de fungos e bactérias	0	0	As poliamidas 11 e 12 são conhecidas por possuírem resistência a proliferação de fungos e bactérias
Rugosidade da superfície externa	0	0	A rugosidade de superfícies de produtos fabricados com PAs utilizando a tecnologia LS é alta, mas pode ser reduzida através de polimento e do uso de um revestimento
Energia superficial livre da região externa	0	0	É conhecido que produtos fabricados com esses materiais são suscetíveis ao acúmulo de sujeira. Este problema pode ser solucionado com o uso de um revestimento
Radiolucência dos materiais de construção	0	0	As poliamidas 11 e 12 são radiopacas. Decidiu-se que esse problema poderia ser contornado com um design que permita a fácil e rápida colocação e retirada da bota
Reciclabilidade	0	0	Ambos materiais são termoplásticos e podem ser reutilizados após o descarte
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	

Fonte: O autor (2011).

Com base nos resultados da análise através do método de Pugh, conclui-se que o grau de material que possui o melhor perfil de propriedades para a fabricação da carcaça é o **PrimePart PA 11**, sendo, portanto, o material selecionado.

### *Processo de fabricação da carcaça*

A carcaça da bota foi produzida utilizando um equipamento de Sinterização a Laser de alto desempenho, modelo HiQ, fabricado pela empresa 3D Systems<sup>10</sup>, ilustrado na Figura 3.22, de propriedade do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, do Ministério da Ciência e Tecnologia. Esse equipamento foi concebido para a fabricação de produtos – plásticos e metálicos – em escala industrial e não somente protótipos. A seguir são listadas as principais características desse sistema:

- Tipo e potência do laser: CO<sub>2</sub>/30 W;
- Velocidade máxima de varredura: 5m/s;
- Dimensões da câmara de construção: 381 x 330 x 457 mm (L x P x H).

**Figura 3.22 – Equipamento de Sinterização a Laser modelo HiQ**



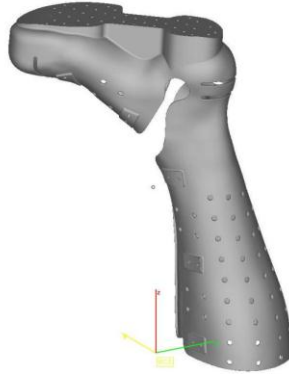
Fonte: Disponível em: <<http://www.3dsystems.com>>. Acesso em: 2011.

<sup>10</sup> Ficha técnica do equipamento disponível em: <[http://www.3dsystems.com/products/datafiles/sinterstation\\_hiq/datasheets/D\\_S\\_Sinterstation\\_HiQ\\_rev0606.pdf](http://www.3dsystems.com/products/datafiles/sinterstation_hiq/datasheets/D_S_Sinterstation_HiQ_rev0606.pdf)>. Acesso em: 2011.

As dimensões da câmara de construção do equipamento permitiram a fabricação da carcaça da bota em uma só etapa.

Na Figura 3.23 pode-se observar a orientação do modelo na câmara de construção.

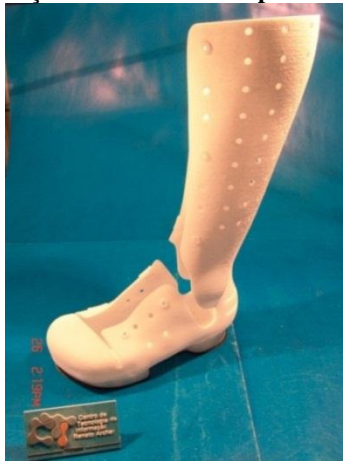
**Figura 3.23 – Orientação do produto na câmara de construção**



Fonte: O autor (2011).

Na Figura 3.24 pode-se observar a carcaça fabricada por meio da tecnologia LS.

**Figura 3.24 – Carcaça da bota fabricada por meio da tecnologia LS**



Fonte: O autor (2011).

### 3.4.4 Solado

O solado foi concebido como uma peça que segue o contorno da base da bota, com espessura uniforme de 4mm. Foram aplicados furos ao solado, assim como em outras partes da bota, para permitir o escoamento de água e para facilitar a circulação de ar e de oxigênio, como pode ser observado na Figura 3.25

Figura 3.25 – Detalhes da base da bota e do solado



Fonte: O autor (2011).

### *Seleção de material*

A seleção do material para o solado seguiu o mesmo procedimento utilizado para a carcaça – o método de Ashby. Ao final do processo, o material escolhido foi um Elastômero Termoplástico chamado DuraForm Flex Plastic para Sinterização a Laser<sup>11</sup>, fabricado pela empresa norte americana 3D Systems. O DuraForm Flex Plastic tem propriedades similares as das borrachas convencionais, como alta

---

<sup>11</sup> Ficha técnica do produto disponível em: [http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/DS\\_DuraForm\\_Flex\\_US.pdf](http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/DS_DuraForm_Flex_US.pdf). Acesso em: 2011.

flexibilidade e alta resistência ao rasgo. Aplicações típicas desse material incluem vedações, tubos, calçados e equipamentos esportivos.

As propriedades do material DuraForm Flex Plastic são listadas no Quadro 3.13.

**Quadro 3.13 – Propriedades físicas do material DuraForm Flex Plastic**

Propriedade	Norma	Valor
Resistência a tração (ruptura)	ASTM D638	1,8 Mpa
Módulo de Elasticidade (tração)	ASTM D638	7,4 Mpa
Alongamento (ruptura)	ASTM D638	110%
Módulo de Elasticidade (flexão)	ASTM D790	5,9 Mpa
Resistência ao rasgo (Cond. C)	ASTM D624	15,1 kN/m
Resistência a abrasão	ASTM D4060	83,5 mg
Dureza Shore A	ASTM D2240	45-75

Fonte: Disponível em <<http://www.3dsystems.com>>. Acesso em: 2011.

### ***Fabricação***

O material Duraform Flex Plastic, escolhido para a fabricação da sola durante a etapa de seleção de materiais, não estava disponível no momento da fabricação. Como alternativa utilizou-se um material flexível disponível no estoque do CTI – Tangoblack, fabricado pela empresa israelense Objet<sup>12</sup>, parte do grupo Stratasys. Como o objetivo do estudo de caso é o levantamento de dados para a geração de um procedimento de personalização, acredita-se que essa alteração não afete negativamente o projeto.

A sola foi fabricada utilizando um equipamento de impressão 3D modelo Connex 350 (Figura 3.26), também produzido pela empresa Objet, do grupo Stratasys<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Ficha técnica do produto disponível em: <[http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/PolyJet-Material-Specs/PolyJet\\_Materials\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/PolyJet-Material-Specs/PolyJet_Materials_Data_Sheet.pdf)>. Acesso em: 2011.

<sup>13</sup> Ficha técnica do produto disponível em: <<http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/precision/objet-connex350>>. Acesso em: 2011.



**Figura 3.26 – Equipamento de impressão 3D modelo Connex 350**



Fonte: Disponível em: <<http://www.stratasys.com>>. Acesso em: 2011.

Na Figura 3.27 pode-se observar a sola, fabricada com o material Tangoblack.

**Figura 3.27 – Sola fabricada em material elastomérico utilizando a tecnologia 3DP**



Fonte: O autor (2011).

Na Figura 3.28 é ilustrada a bota calçada por uma pessoa, ainda sem o acolchoado e o sistema de fixação e ajuste de pressão.

**Figura 3.28 – Bota calçada por uma pessoa**



Fonte: O autor (2011).

O sistema de imobilização desenvolvido tem um peso de aproximadamente 800g, já somados os pesos de todos os componentes. Esse valor é cerca de 500g mais baixo que o de uma bota imobilizadora disponível no mercado, da marca Ortofly<sup>14</sup>, que parece ser representativa desse tipo de sistema. Embora o *design* da bota desenvolvido aqui não seja definitivo, essa redução de peso é bastante promissora.

#### **3.4.5 Considerações finais sobre o estudo de caso**

A realização do estudo de caso permitiu a obtenção de uma visão detalhada das etapas, atividades e tarefas relacionadas ao processo de personalização de ajuste e conforto de um produto por meio de tecnologias de Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva. Analisando os métodos de trabalho utilizados pela empresa Technosim, na etapa de RE, e pelo CTI Renato Archer, na etapa de AM, foi possível concluir,

---

<sup>14</sup> Mais informações sobre a bota imobilizadora Ortofly estão disponíveis em: <http://www.sitedospes.com.br/index.php/bota-imobilizadora-plus-com-base-de-polimero-curta-ortofly.html>. Acesso em: 2011.

como esperado, que o número de atividades e, em especial, de tarefas envolvidas na personalização de ajuste e conforto de um produto utilizando tecnologias de RE e AM é significativamente maior do que descrito nos procedimentos avaliados no Capítulo 2, tópico 2.5. É importante notar que os métodos de trabalho utilizados pela Technosim e pelo CTI não estão documentados – eles são executados livremente por profissionais com um alto nível de preparação e experiência. Do que se pôde observar, a falta de um padrão nos métodos de trabalho dá margem para obtenção de resultados diferentes, dependendo de quem está executando o projeto. Esta constatação reforça a afirmação feita no Capítulo 2 de que um procedimento para personalização de ajuste e conforto mais abrangente e detalhado seria de valor para empresas que atuam ou pretendem atuar nesse segmento. Desta forma, um procedimento para personalização que avance em relação aqueles avaliados no Capítulo 2, incluindo os detalhes das atividades e tarefas observados durante a execução do estudo de caso, é proposto a seguir, no Capítulo 4.



## **4 PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA PERSONALIZAÇÃO DE AJUSTE E CONFORTO**

Com base na revisão bibliográfica, relatada no Capítulo 2, e no estudo de caso, relatado no Capítulo 3, é proposto nesta seção um procedimento para personalização de produtos utilizando Engenharia Reversa e Manufatura Aditiva. Mais especificamente, a proposta apresentada aqui se refere ao tipo de personalização de “ajuste e conforto”, ou seja, fabricação de produtos sob medida para um determinado usuário, de acordo com a classificação de processos de personalização proposta por Piller (2004), descrita no Capítulo 2, Tópico 2.3.

Este procedimento visa endereçar as questões orientativas de pesquisas apresentadas no Capítulo 1, além de promover avanços em relação aos procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e da universidade de Loughborough, conforme descrito no Capítulo 2.

É importante ressaltar que essa proposta tem por objetivo a padronização das atividades e tarefas relacionadas tão somente à personalização de um produto desenvolvido previamente e concebido para ser fabricado por meio de um método aditivo. Portanto, estão fora do seu escopo todas e quaisquer atividades e tarefas relacionadas ao desenvolvimento do produto em si que, idealmente, deveria ser feito utilizando uma metodologia de Desenvolvimento Integrado de Produto, como a metodologia PRODIP ou outra. O processo de personalização aqui proposto tem início com a coleta de dados de um indivíduo para o qual o produto será personalizado e é concluído com a fabricação do produto, seguida de operações de controle de qualidade e de redução do impacto ambiental.

O procedimento proposto é composto de fases, etapas, atividades, tarefas, entradas e saídas (de dados e/ou materiais), seguindo a nomenclatura da metodologia PRODIP. As tarefas, entradas e saídas estão sempre vinculadas a uma atividade. Atividades diretamente relacionadas umas as outras são agrupadas em etapas, e etapas relacionadas às mesmas tecnologias, como RE e AM, são agrupadas em fases.

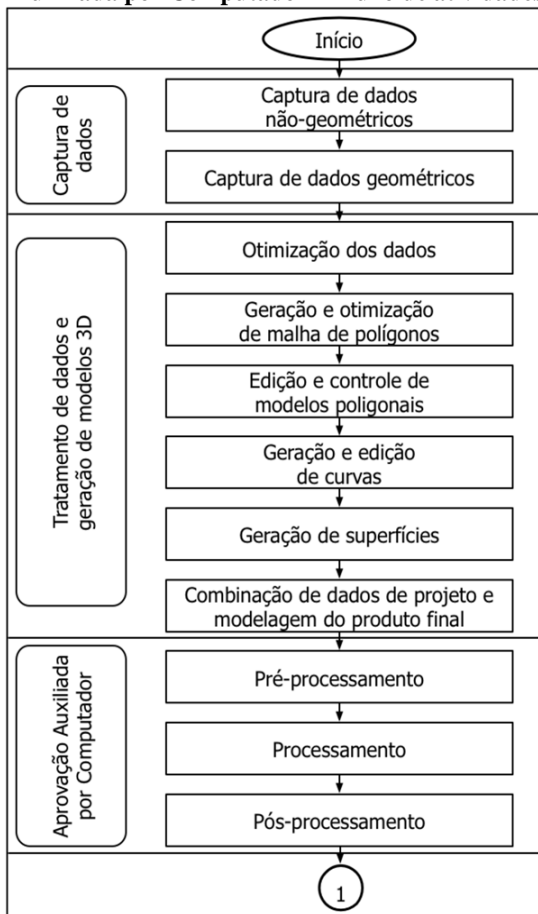
Os procedimentos avaliados no Capítulo 2 consistiam basicamente de etapas e atividades, com informações limitadas a respeito de tarefas e de fluxos de dados e materiais. Além da inclusão e detalhamento de tarefas e de fluxos de dados e de materiais, optou-se por acrescentar também fases, com o objetivo de melhorar a sua

representação. As atividades também foram ligeiramente alteradas em relação aos procedimentos descritos no Capítulo 2, para maior clareza.

A estruturação e o detalhamento das atividades e tarefas foram baseados nos trabalhos de outros pesquisadores (citados ao longo deste capítulo) e na experiência adquirida durante a realização do estudo de caso, relatado no Capítulo 3.

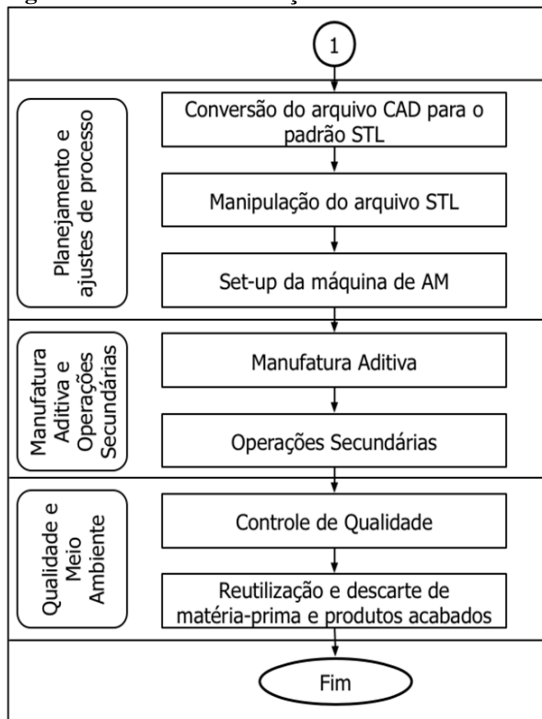
As fases, etapas e o fluxo de atividades do procedimento aqui proposto são ilustradas nas Figuras 4.1 e 4.2.

**Figura 4.1 – Fase: Engenharia Reversa e Aprovação Auxiliada por Computador – Fluxo de atividades**



Fonte: O autor (2011).

**Figura 4.2 – Fase: Fabricação - Fluxo de atividades**



Fonte: O autor (2011).

O procedimento de personalização desenvolvido ao longo deste trabalho de pesquisa é detalhado a seguir, nos quadros 4.1 e 4.2, onde são apresentados os seus componentes adicionais – Entradas, tarefas e saídas.

**Quadro 4.1 – Fase: Engenharia Reversa e  
Aprovação Auxiliada por Computador**

<b>Etapas</b>	<b>Entradas</b>	<b>Atividades</b>	<b>Tarefas</b>	<b>Saídas</b>	
Captura de dados	Cliente	Captura de dados não-geométricos	Entrevista com o cliente Medição e análise de características físicas do cliente e de sua interação com objetos físicos	Preferências do cliente; Características físicas do cliente e dados da sua interação com objetos físicos	
	Cliente	Captura de dados geométricos	Escaneamento Registro dos dados	Nuvem de pontos	
Tratamento de dados e geração de modelo 3D	Nuvem de pontos	Otimização dos dados	Redução de ruídos e de redundância de pontos Amostragem de pontos Identificação de primitivas	Nuvem de pontos otimizada	
	Nuvem de pontos otimizada	Geração e otimização de malha de polígonos	Geração de malha de polígonos Redução de ruídos Limpeza Refinamento da malha poligonal Dizimação	Malha de polígonos otimizada	
	Malha de polígonos otimizada	Edição e controle de modelos poligonais	Preenchimento de furos Eliminação de features Detecção e controle de arestas Ajuste de primitivas Edição de polígonos e recriação de malha Controle e edição de contornos Modificações na geometria do modelo	Modelo poligonal acabado	
	Modelo poligonal acabado	Geração e edição de curvas	Criação de curvas Modificação de curvas	Malha de curvas	
	Malha de curvas	Geração de superfícies	Criação de patches Geração de superfícies	Modelo 3D de superfície	
	Dados não geométricos; Modelo 3D de superfície; Modelo(s) CAD preexistente(s)	Combinação de dados de projeto e modelagem do produto final	Importação dos diferentes componentes Edição do modelo	Modelo 3D do produto	
	Aprovação Auxiliada por Computador	Modelo 3D do produto; Propriedades físicas do material; Carregamentos; Condições de contorno	Pré-processamento	Escolha dos modelos matemáticos Escolha do tipo de elemento Geração da malha Aplicação de carregamentos Aplicação de condições de contorno Escolha do método computacional	Modelo discretizado; Propriedades físicas do material; Carregamentos e condições de contorno aplicadas ao modelo
		Modelo discretizado; Propriedades físicas do material; Carregamentos e condições de contorno aplicadas ao modelo	Processamento	Simulação	Resultados da simulação
		Resultados da simulação	Pós-processamento	Análise dos resultados e comparação com especificações de projeto	Modelo 3D do produto aprovado ou reprovado

Fonte: O autor (2011).



**Quadro 4.2 – Fase: Fabricação**

<b>Etapas</b>	<b>Entradas</b>	<b>Atividades</b>	<b>Tarefas</b>	<b>Saídas</b>
Planejamento e ajustes de processo	Modelo 3D do produto	Conversão do arquivo CAD para o padrão STL	Ajuste dos parâmetros de controle	Arquivo STL
			Geração de malha triangular no padrão STL	
			Inspeção e reparo do modelo STL	
	Arquivo STL	Manipulação do arquivo STL	Definição da orientação da(s) peça(s)	Arranjo espacial do(s) modelo(s) na câmara do equipamento de AM;
			Otimização do volume de trabalho	Leiaute dos suportes (quando aplicável)
	Arranjo espacial do(s) modelo(s) na câmara do equipamento de AM; Leiaute dos suportes (quando aplicável)	Set-up da máquina de AM	Ajuste de parâmetros de processo	Parâmetros de processo
Manufatura Aditiva e Operações Secundárias	Parâmetros de processo; Matéria-prima	Manufatura Aditiva	Processo automatizado	Produto(s) semi-acabado(s); Suportes (quando aplicável); Matéria-prima não processada (quando aplicável)
			Operações Secundárias	Remoção e limpeza
	Remoção de suportes (quando aplicável)			
	Pós-cura (quando aplicável)			
	Infiltração de materiais secundários (quando aplicável)			
Produto(s) semi-acabado(s); Suporte (quando aplicável); Matéria-prima não processada		Acabamento		
		Montagem (quando aplicável)		
Qualidade e Meio-Ambiente	Produto(s) acabado(s); Plano de controle	Controle de Qualidade	Testes, medições e análises de acordo com plano de controle	Produto(s) acabado(s) aprovado(s) ou reprovado(s)
	Matéria-prima não processada; Produto(s) fora de especificação	Reutilização e descarte de matéria-prima e produtos acabados	Reutilização de matéria-prima não processada (quando aplicável) Descarte de matéria-prima e de produtos fora de especificação	Matéria-prima reutilizável; Refugo

Fonte: O autor (2011).

Os principais componentes do procedimento proposto aqui são explorados – com um nível ainda maior de detalhes – nos tópicos apresentados a seguir.

## 4.1 PRIMEIRA FASE: ENGENHARIA REVERSA E APROVAÇÃO AUXILIADA POR COMPUTADOR

### 4.1.1 *Etapa 1.1: Captura de dados*

Nessa etapa são coletados dados sobre o cliente considerados críticos para o processo de personalização.

#### *Atividade 1.1.1: Captura de dados não geométricos*

Esta atividade tem por objetivo a captura de dados do cliente não relacionados à sua anatomia. Ela tem como entrada o cliente e como saídas as preferências e as características físicas do cliente e dados da sua interação com objetos físicos.

##### *- Tarefa 1.1.1.a: Entrevista com o cliente*

Aqui, o objetivo é coletar informações sobre o cliente, como preferências com relação ao acabamento do produto (ex. cor, brilho, textura, etc.), eventuais problemas enfrentados pelo cliente (ex. problemas de locomoção, dores, etc.), dentre outros. Para cada produto a ser fabricado será elaborado um questionário específico.

##### *- Tarefa 1.1.1.b: Medição e análise de características físicas do cliente e de sua interação com objetos físicos*

Aqui são coletadas desde características físicas do cliente, como seu peso e altura, ou medidas de membros do corpo, até interações do cliente com objetos físicos, como bancos ou capacetes, para, por exemplo, determinar parâmetros de conforto.

#### *Atividade 1.1.2: Captura de dados geométricos*

Aqui são capturados dados geométricos de partes do corpo do cliente para a geração de modelos 3D que serão utilizados como base para a personalização de ajuste e conforto do produto.

Esta atividade tem como entrada o cliente e como saída uma nuvem de pontos.

- *Tarefa 1.1.2.a: Escaneamento*

A parte do corpo a ser digitalizada deve ser posicionada de modo que possa ser escaneada de vários ângulos diferentes, para que toda a superfície possa ser capturada. Dependendo da região a ser escaneada – ex. pé e tornozelo – deverá ser utilizado um apoio e uma fixação, para evitar movimentos que poderiam interferir no processo de escaneamento. O suporte e fixação devem ter a menor área de contato com o corpo possível, para minimizar “pontos cegos” durante o escaneamento. Determinadas tecnologias de escaneamento requerem a aplicação de alvos sobre a superfície a ser digitalizada, para facilitar o processo de registro dos dados. Uma vez concluída a preparação da região do corpo humano a ser digitalizada, é possível iniciar o escaneamento efetivamente. O processo consiste basicamente em fazer várias tomadas de diferentes ângulos da região a ser digitalizada (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; TRELEAVEN e WELLS, 2007; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.1.2.b: Registro dos Dados*

Ainda que a maior parte dos escâneres permita a captura de coordenadas da superfície de um objeto de diferentes ângulos com certa liberdade, normalmente várias tomadas são necessárias para capturar toda a geometria ou para evitar qualquer oclusão. Quando utilizando dados de várias tomadas, as diferentes nuvens de pontos geradas não possuem a mesma orientação. O processo de registro de dados é necessário para combinar, alinhar ou fundir essas nuvens de modo que todas estejam alinhadas em um sistema de coordenadas comum. O registro dos dados é fundamental para a digitalização de uma superfície. Por esse motivo, é importante verificar os dados de saída cuidadosamente. Se o número de nuvens de pontos não for suficiente para cobrir a geometria inteira de um objeto ou se as tolerâncias esperadas não forem atingidas, novas tomadas serão necessárias (Boehler *et al.*, 2002; Boehler e Marbs, 2002; Pham e Hieu, 2008).

Duas abordagens para o registro dos dados são utilizadas normalmente: alinhamento manual e automático. No alinhamento manual, pontos de referência designados arbitrariamente são utilizados para o alinhamento de diferentes nuvens. No processo de alinhamento automático, a tolerância entre diferentes nuvens de pontos é utilizada como restrição para o alinhamento (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

#### **4.1.2 Etapa 1.2: Tratamento de dados e geração de modelo 3D**

Nessa etapa, os dados coletados por meio do escaneamento são tratados objetivando a sua estruturação e minimização.

##### **Atividade 1.2.1: Otimização dos dados**

A atividade de otimização dos dados tem por objetivo estruturar os dados e de minimizar o tamanho do arquivo gerado após o escaneamento. Esta atividade tem como entrada uma nuvem de pontos e como saída uma nuvem de pontos otimizada.

##### **- Tarefa 1.2.1.a: Redução de ruídos e de redundância de pontos**

Uma certa quantidade de erros normalmente é introduzida nos dados obtidos por meio de escaneamento e pontos podem ser alocados em regiões indesejáveis ou podem se sobrepor a outros pontos obtidos em diferentes tomadas. Ferramentas de redução de ruídos são utilizadas para a remoção automática de ruídos nos dados coletados durante o escaneamento. A operação de remoção de ruídos determina onde os pontos deveriam estar, então os move para essas localizações com base em dados estatísticos. Se o conjunto de pontos representa uma forma livre, a operação reduz o ruído com respeito a curvatura da superfície. Quando trabalhando com formas prismáticas, a operação ajuda a manter *features*, como bordas e cantos vivos (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

A ferramenta de redução de redundância é utilizada para diminuir o número de pontos na nuvem quando determinados pontos estão muito próximos ou se sobrepõem (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

##### **- Tarefa 1.2.1.b: Amostragem de pontos**

A função de amostragem é utilizada para minimizar o número de pontos na nuvem e para estruturar os dados, para que possam ser manuseados mais facilmente. Os métodos de amostragem podem ser classificados em: curvatura, aleatório e uniforme. No método de curvatura, um número menor de pontos é deletado em uma região de alta curvatura em relação a uma região de baixa curvatura, de modo a manter a precisão da superfície. No método aleatório é feita uma

amostragem de pontos de uma determinada região, ou de todo o modelo, com base em um percentual arbitrário. No método proporcional, a nuvem de pontos é dividida em células cúbicas com as mesmas dimensões e todos os pontos de uma célula, exceto um, são apagados (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.1.c: Identificação de primitivas*

Nessa operação são inseridas primitivas básicas (como planos, cilindros e esferas) em um modelo. Essa operação é muito importante para o processo de RE, especialmente quando se digitalizam peças prismáticas. Isso ajuda a corrigir imperfeições nos dados escaneados (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

***Atividade 1.2.2: Geração e otimização de malha de polígonos***

O objetivo dessa atividade é produzir uma malha de polígonos otimizada. Ela tem como entrada uma nuvem de pontos otimizada e como saída uma malha de polígonos otimizada.

- *Tarefa 1.2.2.a: Geração de malha de polígonos*

Aqui, uma malha de polígonos, normalmente no padrão STL, é gerada com base nos dados geométricos coletados anteriormente (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.2.b: Redução de ruídos*

Nessa tarefa ocorre a redução de ruídos com respeito à curvatura da superfície e auxilia na manutenção de bordas e cantos vivos. Normalmente níveis diferentes de redução de ruído podem ser adotados, de forma a controlar a qualidade da malha. Essa operação utiliza técnicas estatísticas como distância máxima, distância média e desvio padrão dos pontos em relação as suas posições originais (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.2.c: Limpeza*

As operações de limpeza são utilizadas para remover eventuais irregularidades surgidas durante a geração da malha poligonal, de forma a garantir a conformidade da superfície gerada à forma designada pela nuvem de pontos (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.2.d: Refinamento da malha poligonal*

A operação de refinamento da malha poligonal aprimora a superfície de um modelo por meio da adição de novos vértices e do ajuste de coordenadas de vértices existentes, resultando em um maior número de triângulos na região selecionada e uma superfície e uma superfície mais suave. A operação subdivide os triângulos selecionados, produzindo três ou quatro novos triângulos a partir deles (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.2.e: Dizimação*

A operação de dizimação reduz o número de triângulos sem comprometer a integridade da superfície (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

### ***Atividade 1.2.3: Edição e controle de modelos poligonais***

O principal objetivo dessas operações é modificar os triângulos e adicionar novos *features* à malha poligonal. Esta atividade tem como entrada uma malha de polígonos otimizada e como saída um modelo poligonal acabado.

- *Tarefa 1.2.3.a: Preenchimento de furos*

Essa operação preenche furos originados durante o escaneamento ou durante a conversão da nuvem de pontos em modelo poligonal. Uma estrutura poligonal é utilizada para preencher um furo; após o preenchimento, a malha nessa região é refeita de forma que o leiaute poligonal seja organizado e contínuo (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.3.b: Eliminação de features*

Esta operação permite recriar a malha de polígonos utilizando um método baseado em curvatura. *Features* na região selecionada são removidas. Esta operação é bastante útil para refinar e alisar uma região da peça (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1..3.c: Detecção e controle de arestas*

Dispositivos de escaneamento frequentemente são incapazes de capturar arestas ou detalhes finos adequadamente. Durante a geração do modelo poligonal, esses detalhes normalmente são filetados ou arredondados. Essa operação reproduz uma aresta redefinindo-a matematicamente (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.3.d: Ajuste de primitivas*

A operação de ajuste de primitivas insere primitivas, como planos, cilindros e esferas, em determinadas regiões do modelo. Essa operação é especialmente útil para peças prismáticas (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.3.e: Edição de polígonos e recriação da malha*

A operação de edição de polígonos e recriação de malha permite um controle preciso da malha no nível de triângulos. A seguir são listadas alternativas de comandos utilizados para essa finalidade (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008):

- Divisão de aresta – divide uma aresta em duas partes, adicionando dois triângulos de cada lado da aresta selecionada;
- Movimentação de aresta – move uma aresta para outra localidade no *patch* quadrangular;
- Contração de aresta – remove triângulos individuais pela contração entre dois vértices;

- Adição de triângulo – insere outro triângulo na malha baseado em 3 pontos de inserção;
- Recriação de malha – uma malha ideal seria formada por triângulos equiláteros; esse recurso visa otimizar a malha, tentando aproximar todos os elementos que a constituem de triângulos equiláteros.

- *Tarefa 1.2.3.f: Controle e edição de contornos*

A operação de controle e edição de contornos é necessária quando se trabalha com superfícies poligonais abertas. Essa operação é utilizada para reparar as bordas no contorno de um modelo. Normalmente a nova borda criada pode ser editada e modificada por meio de alterações no número e na localização de pontos de controle ou ajustando a curvatura do contorno (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

As opções de edição e modificação de contornos incluem a retificação, alisamento, ajuste a primitivas e projeção em planos definidos pelo usuário. Essas operações movem o contorno além das bordas dos triângulos; posteriormente a estrutura poligonal é reajustada de acordo (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

- *Tarefa 1.2.3.g: Modificações na geometria do modelo*

Modificações na geometria do modelo poligonal podem ser feitas por meio de operações similares às utilizadas em programas CAD, como as listadas a seguir (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008):

- Operações booleanas – união, subtração e intersecção de modelos poligonais;
- *Trim* – remove a região selecionada definida por curvas geradas pelo usuário;
- *Shell* – aumenta a largura de um modelo ao longo de uma trajetória;
- *Offset* – cria uma nova superfície com base em outra existente (com as mesmas dimensões) deslocada em uma distância definida pelo usuário;
- *Thicken* – converte uma casca aberta em um modelo volumétrico com espessura constante;



- *Cut* – permite a separação de polígonos selecionados;
- *Mirror* – cria polígonos espelhados;
- *Rotate* e *Move* – permitem o reposicionamento de modelos no sistema global ou local de coordenadas.

#### ***Atividade 1.2.4: Geração e edição de curvas***

Uma superfície é definida por uma malha de curvas. Nuvens de pontos e modelos poligonais normalmente são utilizados para a criação de curvas, especialmente no caso de peças com superfícies de formas livres. Entidades geométricas, como círculos, retângulos e linhas, podem ser facilmente criadas baseadas em pontos de referência. Esta atividade tem como entrada um modelo poligonal acabado e como saída uma malha de curvas. As seguintes operações são as mais importantes nessa atividade.

##### *- Tarefa 1.2.4.a: Criação de curvas*

Duas abordagens normalmente são utilizadas para a geração de curvas a partir de um modelo poligonal (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008):

- *Cross sectioning* – cria curvas por meio da intersecção entre planos e o modelo;
- *3D curve fitting from points* – permite a criação de uma curva a partir de um conjunto de pontos.

##### *- Tarefa 1.2.4.b: Modificação de curvas*

Permite o controle de uma curva para atingir os requerimentos de modelagem. Os recursos mais comuns para modificação de curvas são listados a seguir (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008):

- *Reparametrização* – altera o número ou redistribui os pontos de controle ao longo de uma curva;
- *Alteração de ângulo* – altera o ângulo de uma curva dentro de uma tolerância especificada;
- *Alisamento e limpeza* – permite o alisamento de uma curva, e a limpeza e remoção de pontos de controle desnecessários;

- Edição de pontos de controle – permite a modificação de pontos de controle manualmente; os pontos de controle são movidos para posições especificadas para modificar a forma da curva;
- Geração de pontos – permite a criação de um número especificado de pontos a partir de uma curva com distribuição aleatória ou uniforme;
- Redirecionamento, Transição e extensão – permitem a mudança de direção de curvas, a união de duas curvas e a extensão de uma curva até um ponto ou distância pré-determinada com continuidade.

### ***Atividade 1.2.5: Geração de superfícies***

O principal objetivo dessa atividade é preparar uma estrutura de *patches* quadrangulares para suportar a construção de superfícies. Esta atividade tem como entrada um modelo poligonal acabado e como saída uma malha de curvas.

#### *- Tarefa 1.2.5.a: Criação de patches*

Os *patches* podem ser desenhados sobre o modelo poligonal manualmente, semi-automaticamente ou automaticamente, baseando-se numa quantidade de *patches* definida pelo usuário e na curvatura do modelo. Ainda que a maioria dos pacotes de *software* de RE disponibilizem um método automático, a organização manual de *patches* normalmente é necessária, já que muitas vezes *features* como arestas e primitivas não podem ser reconhecidas e, por isso, os *patches* não definem a superfície corretamente (BOEHLER *et al.*, 2002; BOEHLER e MARBS, 2002; PHAM e HIEU, 2008).

#### *- Tarefa 1.2.5.b: Geração de superfícies*

Aqui, superfícies são geradas automaticamente, com base nos *patches* criados anteriormente.

### ***Atividade 1.2.6: Combinação de dados de projeto e modelagem do produto final***

Nesta atividade, dados coletados e gerados nas etapas anteriores são combinados com dados preexistentes para formar o modelo 3D do produto a ser produzido por AM. Esta atividade tem como entradas dados não geométricos, o modelo 3D de superfície e um ou mais modelos CAD preexistentes e como saída o modelo 3D do produto.

#### ***- Tarefa 1.2.6.a: Importação dos diferentes componentes***

Modelos geométricos contendo componentes e *features* do produto, como estruturas, castelos, roscas, fixações, etc., são importados para a pasta do projeto no sistema de CAD.

#### ***- Tarefa 1.2.6.b: Edição do modelo***

Nessa tarefa, os diferentes modelos geométricos são combinados com o modelo da superfície escaneada para formar o produto final. Alterações adicionais no modelo podem ser feitas com base nos dados não geométricos. Ex.: alterações na densidade da espuma de um assento com base na distribuição do peso de uma pessoa quando sentada.

### ***4.1.3 Etapa 1.3: Aprovação Auxiliada por Computador***

Como os produtos personalizados frequentemente são únicos, a realização de ensaios destrutivos para aprovação e liberação do produto acabado normalmente não é viável. Para solucionar este problema, propõe-se a simulação computacional de testes físicos por meio do Método dos Elementos Finitos.

#### ***Atividade 1.3.1: Pré-processamento***

Neste estágio são realizadas as operações preliminares à simulação. Esta atividade tem como entradas o modelo 3D do produto, as propriedades físicas do material, os carregamentos e as condições de contorno, e como saídas o modelo discretizado, as propriedades físicas do material, além dos carregamentos e condições de contorno aplicadas ao modelo.

- *Tarefa 1.3.1.a: Escolha dos modelos matemáticos*

Existe uma hierarquia de modelos matemáticos que podem ser utilizados para representar o comportamento mecânico de uma estrutura. De um modo geral, quanto mais abrangente o modelo – que inclui mais efeitos ou é mais realista –, maior o custo computacional. A escolha de um modelo matemático é influenciada pela geometria da estrutura, o tipo de material a ser utilizado, os carregamentos a que a estrutura será submetida, o modo como a estrutura será suportada ou fixada, a maneira como a estrutura irá interagir com outras estruturas e o ambiente e, finalmente, pelos recursos disponíveis para o analista (COOK, 1995; DONALD, 2011):

Os modelos matemáticos utilizados para análises estruturais podem ser divididos em dois grupos – geométricos e constitutivos.

Os modelos geométricos podem ser classificados como: 1D – longarina ou treliça, 2D – Longarina ou treliça, 3D – longarina ou treliça, 2D – Viga, 2D – Tensões no plano, 2D – Deformação no plano, 2D – Axissimétrico, 2D – Axissimétrico com torção, 3D – Casca, 3D – Viga e 3D – Sólido (COOK, 1995; DONALD, 2011). Considerando-se que os produtos a serem fabricados terão, no geral, uma geometria complexa, espera-se que somente dois desses modelos venham ser utilizados – de casca 3D e sólido 3D. Esses modelos são descritos em detalhes a seguir.

O modelo 3D – Casca é útil para painéis de paredes finas ou superfícies curvas. Um modelo de casca inclui tanto flexão quanto efeito membrana ou estiramento e assume que as tensões ao longo da espessura não são significativas. Aplicações típicas desse tipo de modelo matemático incluem análises de vasos de pressão de paredes finas, processos de conformação de metais, estruturas de aeronaves, navios, painéis automotivos, dentre outras (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Um modelo 3D – Sólido é utilizado para problemas de alta complexidade. O uso desse tipo de modelo implica em alto custo computacional (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Os modelos constitutivos representam o comportamento de diferentes grupos de materiais quando submetidos a esforços. Podem ser classificados em:

Elástico linear isotrópico

Esse é o modelo constitutivo mais simples. Assume que a lei de Hooke é válida em todas as direções, que as tensões são linearmente

proporcionais às deformações, e que a direção do carregamento não afeta esse relacionamento (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Elástico linear ortotrópico

Assume que a lei de Hooke é válida em todas as direções, mas permite a atribuição de diferentes valores para o módulo de Young em dois eixos. É útil para modelar o comportamento de madeira, ossos e compósitos, onde o escoamento ou a falha não são esperados (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Elástico linear anisotrópico

Esse modelo é um aperfeiçoamento do anterior e assume, novamente, que a lei de Hooke é válida em todas as direções. Entretanto, nesse caso, pode ser atribuído um valor diferente para o módulo de Young para cada eixo (x, y e z). Esse modelo é útil para representar materiais altamente anisotrópicos, como determinados tipos de ossos e compósitos. Aqui também é assumido que os carregamentos não serão suficientes para provocar escoamento ou falha do material (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Elástico não-linear

Modelos constitutivos elásticos e não lineares são úteis para a representação do comportamento de materiais como borracha, espumas, tecidos biológicos e certos polímeros (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Visco-elástico

Um modelo visco-elástico permite a análise de materiais com comportamento viscoso e elástico, como o nome sugere. A viscosidade de um material com este comportamento resulta em uma taxa de deformação dependente do tempo. Materiais elásticos não dissipam energia quando um carregamento é aplicado e posteriormente removido. Um material visco-elástico, entretanto, irá perder energia quando submetido à mesma condição. Consequentemente, histerese pode ser observada na curva tensão-deformação (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Elasto-plástico, independente da taxa de deformação

Os modelos constitutivos desse grupo permitem escoamento e deformação plástica subsequente do material devido ao carregamento aplicado. Nesse caso, assume-se uma deformação plástica independente da taxa de deformação, de forma que a velocidade com que ocorre a

deformação não irá afetar a resposta da estrutura (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Elasto-plástico, dependente da taxa de deformação

Em contraste ao modelo anterior, aqui a velocidade da deformação é levada em consideração. Modelos nessa categoria requerem a definição da taxa de deformação  $\dot{\epsilon}$  (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Plasticidade especial

Os modelos de plasticidade especial foram desenvolvidos para descrever o comportamento de materiais que não se adequam aos modelos regulares de plasticidade. Exemplos de tais materiais incluem ferro fundido, concreto, solo, rochas, materiais com alto *creep*, etc (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Dano ou avaria

Modelos utilizados para analisar danos provocados por impacto a materiais como compósitos ou concreto reforçado. Esses modelos são bastante complexos e tipicamente requerem a atribuição de várias constantes obtidas por meio de testes físicos nos materiais, como rigidez e tensões em três direções (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Especiais

Modelos desenvolvidos para materiais que exibem um comportamento particular, como os materiais com memória de forma – Ex. Nitinol (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Uma vez definido o modelo constitutivo, deve-se alimentar o *software* com valores de determinadas propriedades do material a ser utilizado para a simulação. As propriedades requeridas irão variar em função do modelo escolhido, mas normalmente incluem módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, dados de tensão-deformação em diferentes temperaturas, *creep* (escoamento a frio), dentre outras (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### - Tarefa 1.3.1.b: Escolha do tipo de elemento

A definição do tipo de elemento para modelar o problema em questão deve ser feita com base nas escolhas feitas anteriormente – do modelo geométrico e do modelo constitutivo –, e no tipo de

carregamento e condições de contorno a serem aplicadas. Os tipos de elementos disponíveis para análises estruturais na maioria dos pacotes de *software* de elementos finitos normalmente são classificados como: Ponto, linha, área plana, área curva e volume (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Os elementos dos grupos ponto, linha e área plana são utilizados em simulações relativamente simples e não se espera que venham a ser utilizados na análise dos produtos a serem fabricados seguindo a metodologia proposta aqui. Por esse motivo, não serão discutidos nesse trabalho. Os grupos de elementos restantes são detalhados a seguir.

### Elementos de área curvos

Estes elementos são basicamente elementos 3D sem atributo de espessura. Podem ser agrupados em: Elementos de casca, elementos 3D de contato e elementos 3D para efeitos de superfície.

Os elementos de casca são elementos do tipo *plate* que permitem a previsão de flexão e efeitos de membrana ou estiramento, e são adequados para a modelagem de estruturas 3D de paredes finas, como vasos de pressão e análises de processos de conformação de chapas. Esses elementos podem deformar nas direções x, y e z, e a espessura do elemento normalmente é atribuída durante a escolha do elemento (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Os elementos 3D de contato são utilizados para definir contato entre duas estruturas ou uma folga entre duas partes de uma estrutura. Elementos de contato 3D de superfície-a-superfície são utilizados para modelar contato e deslizamentos entre duas estruturas 3D (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Os elementos 3D para efeitos de superfície são sobrepostos a uma face formada por elementos sólidos ou de casca e são utilizados para a aplicação de carregamentos e de efeitos superficiais (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Elementos de volume – Sólidos 3D

Estes elementos são utilizados para a modelagem de estruturas tridimensionais sólidas, como o nome sugere. Estão disponíveis em duas formas básicas – hexaedros e tetraedros (COOK, 1995; DONALD, 2011).

- *Tarefa 1.3.1.c: Geração da malha*

Uma vez definidos os modelos geométrico e constitutivo, e o tipo de elemento a ser utilizado, pode-se então dar início ao processo de geração da malha (discretização ou divisão do modelo em elementos finitos). O processo de geração de malha é automático na maioria dos programas de Análise por Elementos Finitos (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*). Determinados programas irão solicitar que o usuário entre com valores para determinados parâmetros para concluir essa tarefa, como o comprimento médio da aresta do elemento, enquanto outros a realizarão completamente de forma automática, utilizando algoritmos que buscam o melhor compromisso entre a qualidade da malha e o tamanho do arquivo gerado. Normalmente, após a geração automática da malha, alguns ajustes precisam ser feitos manualmente, como o refinamento da malha em regiões críticas do modelo. Os comandos necessários para esse tipo de operação irão variar de um programa para outro (COOK, 1995; DONALD, 2011).

- *Tarefa 1.3.1.d: Aplicação de carregamentos*

Os carregamentos podem ser classificados em: Força pontual estática, força estática distribuída, pressão estática, inércia estática, força pontual dependente do tempo, força distribuída dependente do tempo, pressão dependente do tempo, velocidade e aceleração. Estes conceitos são detalhados a seguir:

Força pontual estática

O método mais simples de modelar um carregamento é assumir que ele é aplicado em um ponto específico e que só age através desse local. Um carregamento estático é um carregamento que é aplicado tão lentamente que não introduz efeitos dinâmicos no sistema. Assumindo que o carregamento é estático, pode-se ignorar os termos velocidade e aceleração nas análises, o que simplifica consideravelmente o processo (COOK, 1995; DONALD, 2011).

Força estática distribuída

Este tipo de carregamento assume que a força é aplicada e distribuída em um determinado comprimento da geometria, de forma linear ou não-linear (COOK, 1995; DONALD, 2011).



### Pressão estática

Um carregamento na forma de pressão assume que uma força aplicada é distribuída sobre uma área da geometria. A forma de distribuição pode variar de uma pressão constante a uma não-linear (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Inércia estática

Esta categoria se refere a carregamentos que não irão resultar em movimento da estrutura sob investigação mas irão afetar as tensões e deformações. O principal tipo de carregamento que se enquadra nessa categoria é o peso da própria estrutura, devido à gravidade (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Força pontual dependente do tempo

Força pontual aplicada com velocidade e que varia com o tempo. A variação da força em função do tempo será descrita através de funções matemáticas (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Força distribuída dependente do tempo

Força distribuída que varia com o tempo. Duas funções matemáticas podem ser necessárias para a modelagem deste tipo de carregamento – uma para descrever a distribuição do carregamento e outra para descrever a sua variação com o tempo (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Pressão dependente do tempo

Forças distribuídas sobre áreas específicas do modelo que variam com o tempo. Múltiplas funções matemáticas podem ser necessárias para descrever o regime de carregamento. Uma análise dinâmica será necessária (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Velocidade

Velocidade pode ser aplicada a um modelo como um todo ou a uma certa parte dele. Quando uma velocidade é aplicada ao modelo como um todo, análises em componentes como pás de turbinas ou partes de máquinas rotantes podem ser realizadas. Um exemplo de aplicação de velocidade a somente uma parte do modelo inclui análises de impacto em que a velocidade é aplicada a um projétil (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Aceleração

De forma similar a velocidade, aceleração pode ser aplicada a um modelo por inteiro ou a somente uma de suas partes. O uso de acelerações é muito útil em análises de veículos espaciais e aeronaves (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### *- Tarefa 1.3.1.e: Aplicação de condições de contorno*

Condições de contorno são utilizadas para representar qualquer coisa no problema que não esteja explicitamente definido no modelo (COOK, 1995; DONALD, 2011). Vários tipos de condições de contorno estão disponíveis:

#### Regiões fixas em todos os graus de liberdade

O tipo mais comum de condição de contorno é fixar uma certa região do problema em todos os graus de liberdade (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Regiões fixas em determinados graus de liberdade

Movimentos de translação são permitidos em pelo menos uma direção ou movimentos de rotação são permitidos em torno de pelo menos um eixo (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Deslocamentos prescritos em graus de liberdade específicos

Permite a movimentação de uma parte da estrutura, em uma determinada distância, em uma direção em particular (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Superfícies em contato 2D

Superfícies em contato bidimensional são utilizadas quando duas partes separadas do modelo entram em contato durante uma análise 2D (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### Superfícies em contato 3D

Problemas que requerem um modelo 3D frequentemente irão envolver contato entre corpos tridimensionais e, portanto, irão requerer condições de contorno com superfícies em contato 3D. A diferença desse tipo de condição de contorno em relação a anterior é que aqui a superfície de contato será uma área enquanto que na anterior será uma linha (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Condições de contorno dependentes do tempo

Em certos casos, será necessário modelar condições de contorno que possam ser ativadas durante um determinado estágio da análise (COOK, 1995; DONALD, 2011).

#### *- Tarefa 1.3.1.f: Escolha do método computacional*

Os métodos computacionais mais comuns oferecidos pelos programas de FEA disponíveis no mercado são:

### Análise estática

Esse tipo de análise assume que não há efeitos dinâmicos no sistema (os carregamentos são aplicados lentamente de modo a não introduzir efeitos dinâmicos). Análises estáticas podem ser tanto lineares quanto não-lineares. Exemplos de não linearidades permitidas em análises estáticas incluem: grandes deformações, contato, plasticidade, fluência, hiper-elasticidade, dentre outras (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Análise modal

Uma análise modal é utilizada para determinar as frequências naturais e os modos de vibração associados de uma estrutura. Vários métodos matemáticos estão disponíveis para resolver diferentes tipos de problemas (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Análise harmônica

Uma estrutura exposta a um carregamento cíclico retornará respostas cíclicas ou harmônicas. Uma análise de resposta harmônica permite analisar o comportamento dinâmico de uma estrutura e, portanto, prever se suportará ressonância, fadiga e outros efeitos negativos de vibrações forçadas. A estrutura a ser analisada é geralmente submetida a carregamentos que variam de forma sinusoidal (harmonicamente) com o tempo. A resposta da estrutura é examinada em várias frequências. Normalmente os resultados são apresentados na forma de gráficos de grandezas físicas – como deslocamentos – em função da frequência. Os picos das respostas nos gráficos são identificados e as tensões são verificadas nas respectivas frequências. Normalmente há uma série de métodos de solução disponíveis, os quais permitem solucionar diferentes tipos de problemas (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Análise dinâmica transiente

Este tipo de análise permite determinar deslocamentos, deformações e tensões ao longo do tempo em uma estrutura submetida a combinações de carregamentos estáticos, transientes e harmônicos. Vários métodos de solução podem ser utilizados, dependendo do tipo de estrutura e de problema a ser resolvido (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Análise dinâmica explícita

Análises dinâmicas explícitas são utilizadas para obter soluções rápidas para problemas dinâmicos envolvendo grandes deformações em curtos períodos, problemas quase-estáticos com grandes deformações e múltiplas não-linearidades, além de problemas envolvendo contato e impacto. Essencialmente, este tipo de análise é utilizada para problemas complexos que são muito difíceis de resolver por meio de análises dinâmicas transientes (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### Análises especiais

**Análise espectral** – Os resultados de uma análise modal são utilizados com um espectro conhecido para calcular deslocamentos e tensões no modelo. Utilizada no lugar de uma análise dinâmica transiente para determinar a resposta de estruturas a carregamentos aleatórios ou dependentes do tempo, como terremotos, vento, vibrações em foguetes, etc (COOK, 1995; DONALD, 2011).

**Análise de flambagem** – Utilizada para determinar a carga de flambagem e forma da estrutura após aplicação do carregamento (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### ***Atividade 1.3.2: Processamento***

Nesse estágio ocorre a simulação efetivamente. Esta atividade tem como entradas o modelo discretizado, as propriedades físicas do material, além dos carregamentos e condições de contorno aplicadas ao modelo, e como saída os resultados da simulação.

#### ***- Tarefa 1.3.2.a: Simulação***

Embora seja um processo conduzido automaticamente pelo *solver* do programa de FEA, determinados métodos computacionais exigem o monitoramento durante a solução e requerem que certos

parâmetros sejam ajustados para garantir estabilidade e convergência (COOK, 1995; DONALD, 2011).

### ***Atividade 1.3.3: Pós-processamento***

Aqui são avaliados os resultados da simulação. Esta atividade tem como entrada os resultados da simulação e como saída o modelo 3D do produto aprovado ou reprovado.

- *Tarefa 1.3.3.a: Análise dos resultados e comparação com especificações de projeto*

Nesse estágio ocorre a revisão dos resultados da simulação e a comparação com as especificações de projeto. Produtos não aprovados devem ter o seu *design* revisado. Produtos aprovados seguem para a fase de fabricação.

## **4.2 SEGUNDA FASE: FABRICAÇÃO**

### ***4.2.1 Etapa 2.1: Planejamento e Ajustes de Processo***

Nesta etapa são realizadas as operações relacionadas à preparação para a etapa de Manufatura Aditiva.

#### ***Atividade 2.1.1: Conversão do arquivo CAD para STL***

Neste estágio são realizadas as operações necessárias para a geração de um arquivo que possa ser utilizado para a fabricação do produto por um método aditivo. Esta atividade tem como entrada o modelo 3D do produto e como saída um arquivo STL.

- *Tarefa 2.1.1.a: Ajuste dos parâmetros de controle*

Como o formato STL tem sido considerado um padrão de fato para a troca de dados entre programas CAD e equipamentos de AM, os principais pacotes de *software* CAD dispõem de um módulo para conversão do padrão nativo para STL. Determinados sistemas CAD atribuem por *default* parâmetros otimizados para a geração de malhas considerando uma solução de compromisso entre qualidade e tamanho do arquivo, o que funciona bem na maioria dos casos. No entanto, isso não é regra e, por isso, é possível a atribuição pelo usuário dos parâmetros de controle e da tolerância de adjacência previamente a

conversão. Existem vários parâmetros que poderiam ser utilizados para o controle da malha gerada, porém os mais comumente utilizados são o comprimento da corda ou flecha e o ângulo de controle (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

O comprimento da flecha determina a máxima distância entre a superfície do modelo 3D e a superfície do triângulo que compõe a malha STL. Quanto menor o valor estabelecido para o comprimento da corda, maior será a precisão do modelo em STL e, conseqüentemente, maior será o tamanho do arquivo gerado (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

O ângulo de controle é utilizado para especificar uma tolerância para curvas com raios pequenos e os detalhes de pequenas dimensões do modelo. Para estes detalhes de pequenas dimensões o comprimento da corda não é suficiente para manter a integridade da geometria, mesmo especificando valores muito baixos para esse parâmetro. Os sistemas CAD normalmente utilizam estes valores que variam entre 0 e 1, conforme a equação 4.1, para definir um valor de corda efetivo a ser aplicado aos pequenos detalhes do modelo (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

$$C_e = \left[ \frac{r}{(D/10)} \right]^\alpha \cdot C \quad (4.1)$$

Onde:

$C_e$  – Comprimento efetivo da corda a ser aplicado nos pequenos detalhes do modelo

$R$  – Raio do menor detalhe do modelo

$D$  – Maior diagonal do paralelepípedo que envolve completamente o modelo (maior dimensão do modelo)

$\alpha$  – Ângulo de controle

$C$  – Comprimento da corda

Ângulos de controle iguais a zero implicam em comprimento efetivo da corda aplicada aos pequenos detalhes igual ao comprimento original da corda, o que significa que não há qualquer melhoria na representação de curvas com pequenos detalhes (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.1.1.b: Geração de malha triangular no padrão STL*

Uma vez definidos os parâmetros de controle e ajustada a tolerância de adjacência, procede-se a geração de malha. Esta operação é realizada automaticamente pelo programa de CAD ou por programas específicos para tal fim (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.1.1.c: Inspeção e reparo do modelo STL*

Durante o processo de geração de malha há a possibilidade de ocorrência de erros. Uma vez que o padrão STL é essencialmente uma descrição da superfície, os triângulos correspondentes devem apontar na direção correta; em outras palavras, o vetor normal à superfície do triângulo indica o seu lado externo. A secção que corresponde às camadas de uma região próxima de um vetor normal invertido pode, portanto, ser o inverso do que se deseja. Adicionalmente, geometrias complexas com altos graus de descontinuidade podem resultar em vértices de triângulos que não se alinham corretamente, gerando superfícies incompletas ou falhadas. As várias tecnologias de AM podem reagir a estes problemas de diferentes maneiras. Determinadas máquinas podem processar os dados do arquivo STL de forma que as falhas sejam preenchidas. Entretanto, as superfícies corrigidas automaticamente pelo *software* do equipamento poderão não representar corretamente as superfícies equivalentes no modelo CAD e, em alguns casos, poderá ser adicionado material desnecessariamente durante a etapa de fabricação, caso o problema não seja detectado a tempo. Programas especializados estão disponíveis comercialmente para auxiliar na detecção e correção de tais erros (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

***Atividade 2.1.2: Manipulação do arquivo STL***

Uma vez que o arquivo STL foi carregado no *software* da máquina, ainda pode ser necessário realizar tarefas adicionais, como a definição da orientação da(s) peça(s), a otimização do volume de trabalho ou a geração de suportes. Esta atividade tem como entrada um arquivo STL e como saídas o arranjo espacial do(s) modelo(s) na câmara do equipamento de AM e o leiaute dos suportes (quando aplicável).

- *Tarefa 2.1.2.a: Definição da orientação da(s) peça(s)*

O usuário pode alterar a orientação, para melhorar a resistência mecânica ou o acabamento da peça, ou para reduzir o tempo de processamento. Além disso, também pode reposicionar a peça para permitir a construção em uma determinada localização dentro da câmara da máquina de forma a obter uma melhor distribuição do calor (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.1.2.b: Otimização do volume de trabalho*

Com o objetivo de otimizar os custos de produção, é possível fabricar várias peças simultaneamente – peças idênticas ou diferentes – o que pode requerer a replicação de um modelo ou o posicionamento de diferentes peças no volume de construção (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.1.2.c: Geração de suportes*

Determinados processos de AM geram estruturas de suporte para evitar o colapso da peça ou a sua deformação, especialmente quando da presença de regiões desconectadas ou em balanço. As ferramentas de planejamento de processo permitem a geração de suportes segundo vários parâmetros, como a geometria do suporte, altura, tamanho dos dentes do suporte e vários outros que dependem do processo de AM utilizado. Note que a quantidade de material utilizado para a construção de suportes pode variar significativamente em função da orientação da peça. Também vale lembrar que os suportes podem afetar significativamente o acabamento superficial das peças. Caso seja detectada uma utilização excessiva de material para fabricação de suportes ou a presença de suportes em áreas críticas da peça nesse estágio, deve-se rever a orientação da peça definida anteriormente (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

***Atividade 2.1.3: Set-up da máquina de AM***

Neste estágio são feitos os ajustes dos parâmetros de processo do equipamento de manufatura aditiva. Esta atividade tem como entradas o arranjo espacial do(s) modelo(s) na câmara do equipamento de AM e o leiaute dos suportes (quando aplicável), e como saída os parâmetros de processo.



- *Tarefa 2.1.3.a: Ajuste dos parâmetros de processo*

Exceto pela espessura de camada, os parâmetros de processo a serem ajustados irão variar de uma tecnologia de AM para outra. Para o correto ajuste desses parâmetros, deve-se consultar o manual de operação do equipamento a ser utilizado (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

#### **4.2.2 Etapa 2.2: Manufatura Aditiva e Operações Secundárias**

##### **Atividade 2.2.1: Manufatura Aditiva**

Uma vez definidos todos os parâmetros de processo, tem início uma fase totalmente controlada pelo computador. Cada tecnologia de AM utilizará uma abordagem diferente para geração de camada, porém todas seguirão uma sequência similar de construção – uma vez gerada uma camada, com base na seção transversal do modelo, uma plataforma se desloca verticalmente e o processo se repete até que o produto esteja completo (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

Esta atividade tem como entradas os parâmetros de processo e a matéria-prima e como saídas o(s) produto(s) semi-acabado(s), suportes (quando aplicável) e matéria-prima não processada (quando aplicável).

##### **Atividade 2.2.2: Operações secundárias**

Nesse estágio as peças recém construídas passam por outras etapas de processo antes que possam ser utilizadas. Esta atividade tem como entrada o(s) produto(s) semi-acabado(s), suportes (quando aplicável) e matéria-prima não processada (quando aplicável), e como saídas produto(s) acabado(s) e matéria-prima não processada (quando aplicável).

- *Tarefa 2.2.2.a: Remoção e limpeza*

A remoção da peça do equipamento irá variar em função do tipo de tecnologia utilizada. Para determinadas tecnologias, deve-se separar a peça da plataforma de construção do equipamento. Para outras, deve-se separar a peça do material presente na câmara de construção e não utilizado na sua fabricação. As peças fabricadas por meio de tecnologias AM que utilizam materiais na forma de pó normalmente carregam uma

quantidade de material particulado em sua superfície após a remoção da câmara de construção. A remoção deste material pode ser feita com pincéis e escovas ou por meio de jato de ar (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.2.2.b: Remoção de suportes*

Nessa etapa são removidos os suportes construídos em determinadas técnicas, como FDM ou SLA. Os suportes fabricados com materiais convencionais são removidos manualmente. Determinados fornecedores de materiais para Manufatura Aditiva, entretanto, disponibilizam resinas hidrossolúveis que permitem a remoção dos suportes através de jatos de água, o que facilita significativamente esta operação (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.2.2.c: Pós-cura*

As tecnologias de AM que utilizam materiais fotossensíveis, como SLA e Projeção de Máscara, normalmente requerem uma etapa secundária de cura, chamada de pós-cura, para melhorar as propriedades mecânicas do produto. Essa etapa é feita em uma estufa, com temperatura e tempo pré-determinados de acordo com o tipo de resina em uso (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.2.2.d: Infiltração de materiais secundários*

Tecnologias de AM que trabalham com a aplicação de aglutinantes sobre materiais na forma de pó, como certos modelos de equipamentos de 3DP, requerem a infiltração de produtos químicos, como cianoacrilatos, na peça para aumentar a sua resistência mecânica. Um procedimento similar é utilizado na fabricação de produtos por meio da tecnologia LS para metais, em que é infiltrado um metal com baixo ponto de fusão – normalmente uma liga de cobre – à peça metálica, para reduzir a porosidade e aumentar as propriedades mecânicas (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.2.2.e: Acabamento*

Uma vez que o acabamento das peças fabricadas por tecnologias AM é relativamente ruim, é bastante comum executar operações de acabamento nessas peças, que normalmente incluem jateamento com microesferas de vidro (ou de metais), lixamento e pintura (AHRENS *et al.*, 2007; GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2009).

- *Tarefa 2.2.2.f: Montagem*

Aqui, os produtos fabricados por meio de uma tecnologia AM recebem outros componentes, quando for o caso, para formar o produto acabado. Embora as tecnologias de AM permitam fabricar produtos com extrema complexidade, o que inclui partes móveis, o número limitado de materiais que podem ser processados não permite ainda eliminar essa etapa de montagem, quando componentes produzidos com outros materiais são necessários.

#### **4.2.3 Etapa 2.3: *Qualidade e meio-ambiente***

Neste estágio são realizadas as operações relacionadas ao controle de qualidade e de redução do impacto ambiental.

##### ***Atividade 2.3.1: Controle de qualidade***

Neste estágio são realizadas as operações necessárias para garantir a conformidade do produto acabado às especificações. Esta atividade tem como entradas o(s) produto(s) acabado(s) e um plano de controle, e como saídas o(s) produto(s) acabado(s) aprovado(s) ou reprovado(s).

- *Tarefa 2.3.1.a: Testes, medições e análises de acordo com plano de controle*

Aqui são conduzidos testes, análises e medições (ex. testes funcionais, análises de aparência, dimensionamentos, etc.) de acordo com plano de controle para verificação da adequação do produto aos requisitos de projeto.

Uma vez que os produtos a serem fabricados utilizando este procedimento serão únicos ou em pequenas séries, ensaios destrutivos ou que possam danificar o produto de qualquer maneira não podem ser

utilizados, como normalmente se faz na produção em massa. Por este motivo, a técnica de tomografia computadorizada industrial tem sido sugerida como uma ferramenta bastante útil para o controle de qualidade de produtos fabricados por AM. Esta técnica permite verificar defeitos em superfícies no interior do produto além de falhas na homogeneidade do material, como bolhas ou vazios, ou mesmo material não sinterizado ou fundido completamente (EFFENBERGER, 2008; BIBB, THOMPSON e WINDER, 2011).

### ***Atividade 2.3.2: Reutilização e descarte de matéria-prima e produtos acabados***

Neste estágio são realizadas as operações que visam reduzir o impacto ambiental do processo de fabricação. Esta atividade tem como entradas matéria-prima não processada e produto(s) fora de especificação, e como saídas matéria-prima reutilizável e refugo.

#### ***- Tarefa 2.3.2.a: Reutilização de matéria-prima não processada***

Nos processos de AM que trabalham com material na forma de pó, sempre há uma quantidade de material que não é processada e que sobra na câmara de construção do equipamento. Este material normalmente pode ser reutilizado quando misturado com matéria-prima virgem, sem perda significativa na qualidade do produto fabricado. Os percentuais máximos de utilização normalmente são sugeridos pelos fabricantes das matérias-primas. Entretanto, cada usuário deve definir, experimentalmente, os percentuais que são mais adequados para os produtos que fabrica. Algumas empresas optam por reutilizar 100% do material não processado de uma só vez para a fabricação de outros produtos com menores requisitos.

É uma prática comum peneirar o material a ser reutilizado para eliminar grumos – grãos que se uniram pelo calor recebido durante o processo de fabricação do produto – e contaminações que poderiam afetar negativamente a qualidade da peça se não eliminados.

#### ***- Tarefa 2.3.2.b: Descarte de matéria-prima e de produtos fora de especificação***

A cada vez que um lote de matéria-prima é reutilizado, há uma ligeira perda de propriedades. Depois de um certo número de reutilizações, passa a ser mais interessante descartar essa matéria-prima,

para evitar riscos de falha dos produtos fabricados. Produtos fora de especificação por qualquer motivo, normalmente não são reciclados, como ocorre com produtos plásticos injetados. Para seguir em frente com a reciclagem, seria necessário dispor de equipamento para micronização – processo de moagem que gera partículas com dimensões micrométricas – e para um controle muito preciso da granulometria, ou então de parceiros que pudessem realizar esse trabalho. A primeira opção exige investimentos muito altos e não se tem muitas informações a respeito de empresas que prestem esse tipo de serviço no Brasil. O descarte de matéria-prima e de produtos fora de especificação deve ser feito observando as normas e leis para descarte de resíduos sólidos do país.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCEDIMENTO PROPOSTO

O procedimento aqui proposto foi avaliado lado a lado com os procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough através de uma versão adaptada da metodologia criada por Vernadat (1996) – a mesma metodologia utilizada para avaliação dos procedimentos apresentados no Capítulo 2.

Recapitulando, a seguinte escala foi utilizada para a avaliação:

- 4 (quatro) – atende totalmente;
- 3 (três) – atende em muitos aspectos;
- 2 (dois) – atende parcialmente;
- 1 (um) – atende poucos aspectos;
- 0 (zero) – não atende.

O resultado da avaliação foi resumido no Quadro 4.3, onde o procedimento aqui proposto é referido como “novo procedimento”.

**Quadro 4.3 – Resumo da avaliação**

Critério	Questão	Custom-fit	Loughborough	Novo Procedim.
Abrangência	O procedimento abrange as áreas de conhecimento necessárias ao processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	3	3	4
Representação	A forma de representação do procedimento é de fácil compreensão?	3	4	4
Profundidade	O nível de detalhamento do procedimento é adequado para orientar o processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	2	2	3
Clareza	O procedimento apresenta-se logicamente estruturado para o processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	3	3	3
Consistência	O fluxo de informações entre as etapas encontra-se adequadamente especificado?	3	3	4
Aplicabilidade	O procedimento pode ser empregado para o processo de personalização de diferentes tipos de produtos por meio de RE e AM?	4	4	4
Conteúdo	O procedimento possui conteúdo suficiente para suportar a realização de todas as atividades e tarefas do processo de personalização de produtos por meio de RE e AM?	2	2	4
Flexibilidade	O procedimento permite modificações para inserir outras etapas, atividades, tarefas, ferramentas, etc. para atender objetivos não previamente definidos?	4	4	4
Benefícios	O procedimento poderá auxiliar no cumprimento dos prazos de entrega dos produtos feitos sob medida por meio de RE e AM?	3	3	4
	O procedimento poderá auxiliar no atendimento das especificações de qualidade dos produtos feitos sob medida por meio de RE e AM?	3	3	4

Fonte: O autor (2011).

A seguir são feitas considerações sobre o nível de atendimento dos procedimentos em questão aos critérios de avaliação.

### ***Abrangência***

Os procedimentos dos grupos de pesquisas Custom Fit e de Loughborough não contemplam o controle de qualidade no produto

físico após o processo de fabricação, para checar eventuais problemas que não podem ser detectados nas simulações computacionais, como problemas de aparência superficial, dimensões e forma. No procedimento aqui proposto esta área do conhecimento é contemplada.

### ***Representação***

Embora a descrição do procedimento desenvolvido pelos pesquisadores do grupo Custom-fit para personalização de ajuste e conforto de produtos seja muito clara, a sua representação gráfica poderia ser melhorada, por exemplo, utilizando fluxogramas e/ou tabelas. Já o procedimento desenvolvido pelo grupo de Loughborough é representado graficamente utilizando a metodologia IDEFO, que é de fácil compreensão. O procedimento aqui proposto é representado graficamente na forma de fluxogramas e tabelas, o que permite uma fácil e rápida visualização dos seus componentes (fases, etapas, atividades, tarefas e fluxos de dados e materiais).

### ***Profundidade***

As etapas e atividades estão bem descritas em ambos procedimentos avaliados previamente. Porém, o mesmo não pode ser dito sobre as tarefas, que não são claramente definidas nem detalhadas em nenhum deles. No procedimento aqui proposto, as tarefas são claramente definidas e detalhadas.

### ***Clareza***

As etapas e atividades estão logicamente estruturadas nos três procedimentos, porém, ainda existe um espaço para melhoria em todos eles – o encadeamento das atividades e tarefas de acordo com a metodologia de Engenharia Simultânea.

### ***Consistência***

Os fluxos de informações e de materiais não estão adequadamente especificados nos procedimentos analisados anteriormente. No procedimento aqui proposto estes fluxos são claramente definidos e detalhados.

### ***Aplicabilidade***

Os três procedimentos podem ser utilizados para o processo de personalização de diferentes tipos de produtos.

***Conteúdo***

O procedimento aqui proposto disponibiliza um conteúdo significativamente mais amplo e detalhado, o que será de grande utilidade para profissionais e empresas iniciando atividades relacionadas à personalização de ajuste e conforto de produtos por meio de RE e AM.

***Flexibilidade***

Os três procedimentos são bastante flexíveis e permitem modificações, caso necessário.

***Benefícios***

Os procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough podem auxiliar no cumprimento dos prazos de entrega e no atendimento das especificações de qualidade, em especial para equipes experientes e com profundos conhecimentos sobre engenharia em geral e, mais especificamente, sobre RE e AM. Os benefícios para equipes menos experientes e com menos conhecimentos sobre essas áreas tendem a ser menores, devido ao baixo nível de detalhamento e de conteúdo de ambos. O procedimento aqui proposto avança em diversos aspectos em relação a eles, oferecendo, em especial maior profundidade, clareza e conteúdo, o que oferece maiores benefícios para profissionais e empresas iniciando uma operação de personalização de ajuste e conforto de produtos utilizando RE e AM.



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

O procedimento para personalização de ajuste e conforto de produtos por meio de RE e AM aqui proposto, estabelecido com base na literatura científica e em um estudo de caso, promoveu avanços em relação a procedimentos similares desenvolvidos por dois grupos de pesquisas europeus em diversas áreas – Abrangência, profundidade, consistência, conteúdo e benefícios.

O procedimento desenvolvido ao longo deste trabalho incluiu uma etapa de controle de qualidade de produtos acabados após o processo de fabricação, para checar eventuais problemas que não podem ser detectados nas simulações computacionais, como problemas de aparência superficial, dimensões e forma, etapa esta ausente nos procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-Fit e de Loughborough.

No procedimento aqui apresentado, as tarefas são claramente definidas e detalhadas, o que não ocorre nos procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough, detalhados no nível de atividades.

Os fluxos de informações e de materiais não estão adequadamente especificados nos procedimentos analisados anteriormente. No procedimento aqui proposto estes fluxos são claramente definidos e detalhados.

O procedimento aqui proposto disponibiliza um conteúdo significativamente mais amplo e detalhado em relação aos anteriores.

Os procedimentos desenvolvidos pelos grupos de pesquisas Custom-fit e de Loughborough podem auxiliar no cumprimento dos prazos de entrega e no atendimento das especificações de qualidade, em especial para equipes experientes e com profundos conhecimentos sobre engenharia em geral e, mais especificamente, sobre RE e AM. Os benefícios para equipes menos experientes e com menos conhecimentos sobre essas áreas tendem a ser menores, devido ao baixo nível de detalhamento e de conteúdo de ambas. O procedimento aqui proposto avança em diversos aspectos em relação a elas, oferecendo, em especial, maior profundidade, clareza e conteúdo, o que oferece maiores

benefícios para profissionais e empresas iniciando uma operação de personalização de produtos utilizando RE e AM.

Com base no exposto, conclui-se que as questões orientativas de pesquisa foram endereçadas e o objetivo estabelecido para este trabalho foi atingido.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao término da pesquisa, são submetidas sugestões para trabalhos futuros com o objetivo de promover a ampliação do conhecimento sobre o tema:

- Desenvolvimento de um sistema inteligente para guiar a equipe de projetos no processo de personalização de ajuste e conforto de produtos;
- Avaliação da viabilidade técnica e econômica da fabricação de diferentes produtos sob medida por meio de tecnologias de manufatura aditiva;
- Desenvolvimento de rotinas computacionais para acelerar a conversão dos dados coletados durante a fase de Engenharia Reversa em um modelo geométrico 3D e também para acelerar a execução das tarefas da fase de Aprovação Auxiliada por Computador.

## REFERÊNCIAS

AHRENS, C. H. et al. **Prototipagem Rápida**: Tecnologias e Aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

ASHBY, M. F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 4th. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2010.

ASTM. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

BACK, N. et al. **Projeto Integrado de Produtos**: Planejamento, Concepção e Modelagem. Barueri: Manole, 2008.

BECKER, R.; GRZESIAK, A.; HENNING, A. *Rethink assembly design*. *Assembly Automation*, [S.I.], v. 25, n. 4, p. 262-266, 2005.

BERGER, C.; PILLER, F. *Customers as co-designers*. *Manufacturing Engineer*, v. 82, nº 4, p. 42-45: IEE, 2003.

BIBB, R.; THOMPSON, D.; WINDER, J. *Computed tomography characterisation of additive manufacturing materials*. *Medical Engineering & Physics*, [S.I.], v. 33, nº 5, p. 590-596, 2011.

BOEHLER, W. et al. *3D scanning software - An introduction*. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SCANNING FOR CULTURAL HERITAGE RECORDING. Corfu, Grécia, 2002.

BOEHLER, W.; MARBS, A. *3D scanning instruments*. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SCANNING FOR CULTURAL HERITAGE RECORDING. Corfu, Grécia, 2002.

BOËR, C. R.; DULIO, S. *Mass Customization and Footwear Mass Customization and Footwear: Myth, Salvation or Reality?* Londres: Springer, 2007.

BOYD, A. S.; BENJAMIN, H. J.; ASPLUND, C. *Splints and casts: Indications and methods*. *American Family Physician*, [S.I.], v. 80, nº 5, p. 491-499, 2009.

- BRAD, F. Rapid Manufacture in the Aeronautical Industry. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). ***Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age***. Chichester, London: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. p. 221-231.
- BUEDE, D. M. ***The engineering design of systems: models and methods***. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- BURHAN, D.; CRAWFORD, R. *Design and Manufacture of an Attachment Fitting for Transtibial Prosthetic Sockets Using Selective Laser Sintering*. In: FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM. Austin, Texas, 2004.
- CADDLE, A. Q. et al. ***Design of Patient-Specific Ankle-Foot Orthotics***. Boston, MA: Northeastern University, 2006.
- COHEN, L. ***Quality function deployment: how to make QFD work for you***. Harrisonburg, Virginia: Addison Wesley Longman, Inc., 1995.
- COLOMBO, G. et al. *A new design paradigm for the development of custom-fit soft sockets for lower limb prostheses*. ***Computers in Industry***, [S.I.], v. 61, n° 6, p. 513-523, 2010.
- COOK, R. D. ***Finite element modeling for stress analysis***. Wisconsin: Wiley, 1995.
- CUSTOM-FIT. *The Customised Helmets*. ***Custom-Fit Newsletter***, n° 03, 2007. p. 2.
- D'APUZZO, N. *3D body scanning technology for fashion and apparel industry*. ***SPIE-IS&T Electronic Imaging***, v. 6491, San Jose, CA, USA: SPIE, 2007.
- DELAMORE, P.; JUNIOR, V.; LEVER, G. *3D Direct Manufacturing and Decoration of Made-to-measure Performance Footwear*. In: WEARABLE FUTURES. South Wales, Reino Unido, 2005.
- DONALD, B. J. M. ***Practical Stress Analysis with Finite Elements***. Dublin: Glasnevin Publishing, 2011.

EFFENBERGER, I. *Computed Tomography for Quality Inspection in Rapid Manufacturing*. In: EURO-URAPID 2007: INTERNATIONAL USER'S CONFERENCE ON RAPID PROTOTYPING & RAPID TOOLING & RAPID MANUFACTURING, December 3-4, 2007. *Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)*, 2008.

FAUSTINI, M. C. *Modeling and fabrication of prosthetic sockets using selective laser sintering*. (2004). 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), The University of Texas, Austin, Texas, 2004.

FAUSTINI, M. C. et al. *An Experimental and Theoretical Framework for Manufacturing Prosthetic Sockets for Transtibial Amputees. Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **IEEE Transactions on** [S.I.], v. 14, nº 3, p. 304-310, 2006.

FAUSTINI, M. C. et al. *Finite Element Structural Analysis of Prosthesis Sockets for Below-the-Knee Amputees Manufactured by SLS*. In: SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM AUSTIN. Texas, EUA, 2001.

FAUSTINI, M. C. et al. *Manufacture of Passive Dynamic Ankle-Foot Orthoses Using Selective Laser Sintering. Biomedical Engineering*, **IEEE Transactions on** [S.I.], v. 55, nº 2, p. 784-790, 2008.

FETTERMANN, D. D. C.; ECHEVESTE, M. E. S. O Design for Mass Customization (DFMC) no PLM Sustentável. **Revista Gestão Organizacional**, [S.I.], v. 3, nº 2, p. 238 - 251, 2010.

FEY, N. P.; KLUTE, G. K.; NEPTUNE, R. R. *The influence of energy storage and return foot stiffness on walking mechanics and muscle activity in below-knee amputees. Clinical Biomechanics*, [S.I.], p. 10, 2011.

FEY, N. P. et al. *Topology Optimization and Freeform Fabrication Framework for Developing Prosthetic Feet*. In: SOLID FREEFORM FABRICATION. Universidade do Texas, Austin, Texas, 2009.

FREEMAN, D.; WONTORCIK, L. *Stereolithography and prosthetic test socket manufacture: a cost/benefit analysis. Journal of Prosthetics & Orthotics*, [S.I.], v. 10, n. 1, p. 17-20, 1998.

FU, P. *Reverse Engineering in the Medical Device Industry*. In: RAJA, V.; FERNANDES, K. J. (Ed.). ***Reverse Engineering - An Industrial Perspective***. Londres: Springer, 2008. p. 177-194.

FUH, J. Y. H.; FENG, W.; WONG, Y. S. *Modelling, Analysis and Fabrication of Below-knee Prosthetic Sockets Using Rapid Prototyping*. In: GIBSON, I. (Ed.). ***Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications***. Londres: John Wiley & Sons, 2006. p. 207-226.

GARRET, B. ***User Customisation in Rapid Manufactured Designs***. (2009). 88 f. Tese (Doutorado em Desenho Industrial), Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009.

GIBSON, I. ***Advanced manufacturing technology for medical applications: reverse engineering, software conversion, and rapid prototyping***. Londres: John Wiley & Sons, Ltd., 2005.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. ***Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing***. Nova Iorque: Springer, 2009.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. *Generalized Additive Manufacturing Process Chain*. In: GIBSON, I. et al (Ed.). ***Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing***. Nova Iorque: Springer, 2010. p. 41-59.

GODINHO FILHO, M.; FERNANDES, F. C. F. Manufatura ágil e customização em massa: conceitos, semelhanças e diferenças. ***Revista de Administração***, [S.I.], v. 41, p. 81-95, 2006.

HAGUE, R.; MANSOUR, S.; SALEH, N. *Design opportunities with rapid manufacturing*. ***Assembly Automation***, [S.I.], v. 23, n° 4, p. 346-356, 2003.

HAMBLÉN, D. ***Adams' Outline of fractures***. Edimburgo: Churchill Livingstone, 2007.

HARRIS, R.; SAVALANI, M. *Medical Applications*. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). ***Rapid Manufacturing: An Industrial***

***Revolution for the Digital Age***. Chichester, London: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. p. 175-194.

HEBERT, S. N. et al. **Ortopedia e traumatologia - princípios e prática**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

HERBERT, N. et al. *A preliminary investigation into the development of 3-D printing of prosthetic sockets*. ***Journal of Rehabilitation Research & Development***, [S.I.], v. 42, n. 2, p. 141-146, 2005.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P. *Emerging Rapid Manufacturing Processes*. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). ***Rapid Manufacturing: An industrial Revolution for the Digital Age***. Chichester, London: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. p. 55-80.

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

JANNE, K. *Rapid Manufacture for the Retail Industry*. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). ***Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age***. Chichester, London: John Wiley & Sons, 2006. p. 275-282.

JANSEN, A.; KNAAP, A. V. D.; POSTHUMA, A. *Certifying mass customised products*. In: WORLD CONFERENCE ON MASS CUSTOMIZATION & PERSONALIZATION. Cambridge, MA, EUA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2007a.

JANSEN, A.; KNAAP, A. V. D.; POSTHUMA, A. *Reliable CAE of layered manufacturing*. In: WORLD CONFERENCE ON MASS CUSTOMIZATION & PERSONALIZATION. Cambridge, MA, EUA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2007b.

JONES, C. L.; GUNNINK, J. ***Project Europe: Custom-Fit. Plastics Innovation***. Holanda: Laird Publishers BV, 2008.

JONES, C. L.; GUNNINK, J. W. *Europe's Flagship R&D Project for Rapid Manufacturing: Custom-Fit. Time-Compression Technologies*, Cheshire, p. 24-35, Rapid News Publications, september/october 2008.

- KEEFER, M. et al. *Effects of modified short-leg walkers on ground reaction force characteristics*. ***Clinical Biomechanics***, [S.I.], v. 23, nº 9, p. 1172-1177, 2008.
- LERCH, T.; MACGILLIVRAY, M.; DOMINA, T. *3D Laser Scanning: A Model of Multidisciplinary Research*. ***Journal of Textile And Apparel Technology and Management***, [S.I.], v. 5, n. 4, p. 1-22, 2006.
- MACHADO, A. G. C.; MORAES, W. F. A. D. Estratégias de customização em massa implementadas por empresas brasileiras. ***Produção***, [S.I.], v. 18, p. 170-183, 2008.
- MAJEWSKI, C. E. et al. *Tailoring the mechanical properties of Selective Laser Sintered parts*. In: BOURELL, D. L. (Ed.). INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM. Austin, Texas, EUA: University of Texas at Austin, 2008. p. 94-103.
- MASTERS, M.; VELDE, T.; MCBAGONLURI, F. *Rapid Manufacturing in the Hearing Industry*. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). ***Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age***. Chichester, London: John Wiley & Sons, 2006. p. 195-209.
- MAVROIDIS, C. et al. *Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping*. ***Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation***, [S.I.], v. 8, nº 1, p. 1-1, 2011.
- MILUSHEVA, S. M. et al. *Personalised Ankle-Foot Orthoses design based on Reverse Engineering*. In: VIRTUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT PRODUCTION MACHINES AND SYSTEMS, 5th. [S. I.], 2006.
- NG, P.; LEE, P. S. V.; GOH, J. C. H. *Prosthetic sockets fabrication using rapid prototyping technology*. ***Rapid Prototyping Journal***, [S.I.], v. 8, nº 1, p. 53-59, 2002.
- PALLARI, J. H. P. et al. *Design and additive fabrication of foot and ankle-foot orthoses*. In: ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM, 22nd. Austin, Texas, EUA 2010. p. 834-846.



PANDREMENOS, J.; CHRYSOLOURIS, G. *Modular product design and customization*. In: CIRP DESIGN CONFERENCE – COMPETITIVE DESIGN, 19th. Cranfield University: Cranfield University Press, 2009. p. 94-98.

PANDREMENOS, J. et al. *RM product development: design principles, simulation and tools*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADDITIVE TECHNOLOGIES (ICAT). Ptuj, Slovenia 2008.

PHAM, D. T.; HIEU, L. C. *Reverse Engineering – Hardware and Software*. In: RAJA, V.; FERNADES, K. J. (Ed.). **Reverse Engineering: An Industrial Perspective**. Londres: Springer, 2008. p. 33-70.

PILLER, F. *Mass Customization: Reflections on the State of the Concept*. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, [S.I.], v. 16, n° 4, p. 313-334, 2004.

PILLER, F. T.; MOESLEIN, K.; STOTKO, C. M. *Does mass customization pay? An economic approach to evaluate customer integration*. **Production Planning & Control** [S.I.], v. 15, n° 4, p. 435-444, 2004.

RAJA, V. *Introduction to Reverse Engineering*. In: RAJA, V.; FERNADES, K. J. (Ed.). **Reverse Engineering: An Industrial Perspective**. Londres: Springer, 2008. p. 1-9.

REEVES, P. **Rapid Manufacturing moving towards 2020**. Econolyst Ltd. Derbyshire: Econolyst, 2008. Disponível em: <<http://www.econolyst.co.uk/>>. Acesso em: 2011.

REEVES, P.; TUCK, C.; HAGUE, R. *Additive Manufacturing for Mass Customization*. In: FOGLIATTO, F. S.; DA SILVEIRA, G. J. C. (Ed.). **Mass Customization: Engineering and Managing Global Operations**. Londres: Springer, 2011. p. 275-289.

REICHWALD, R.; PILLER, F. T.; MÖSLEIN, K. *Information as a critical success factor for mass customization*. In: ASAC-IFSAM 2000 CONFERENCE. Montreal, Quebec, Canada, 2000.

ROGERS, B. et al. *Advanced trans-tibial socket fabrication using selective laser sintering*. ***Prosthetics and Orthotics International*** [S.I.], v. 31, nº 1, p. 88-100, 2007.

ROGERS, W. E. et al. *Fabrication of Prosthetic Sockets by Selective Laser Sintering*. In: MARCUS, H. L. et al (Ed.). In: SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM. Austin, Texas, EUA, 1991. p. 158-163.

SACCHELLI, C. M. **Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplásticos**. (2007). 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SALVADOR, F.; HOLAN, P. M. D.; PILLER, F. T. *Cracking the Code of Mass Customization*. ***MIT Sloan Management Review***, v. 50, nº 3, Cambridge, MA, EUA: Massachusetts Institute of Technology, 2009. p. 71-78.

SANTOS, E. C. et al. *Rapid manufacturing of metal components by laser forming*. ***International Journal of Machine Tools and Manufacture*** [S.I.], v. 46, nº 12-13, p. 1459-1468, 2006.

SARMIENTO et al. *Prefabricated functional braces for the treatment of fractures of the tibial diaphysis*. ***Journal of Bone and Joint Surgery Incorporated Boston***, (9), MA, ETATS-UNIS, 1984.

SCHRANK, E. S.; STANHOPE, S. J. *Dimensional accuracy of ankle-foot orthoses constructed by rapid customization and manufacturing framework*. ***The Journal of Rehabilitation Research and Development*** [S.I.], v. 48, nº 1, p. 31-31, 2011.

SOLOMON, L.; WARWICK, D.; NAYAGAM, S. ***Apley's System of Orthopaedics and Fractures***. 9. ed. Londres: Hodder Arnold, 2010.

SOUTH, B. J. et al. *Manufacture of Energy Storage and Return Prosthetic Feet Using Selective Laser Sintering*. ***Journal of Biomechanical Engineering*** [S.I.], v. 132, nº 1, 6 p., 2010.

TAY, F. E. H.; MANNA, M. A.; LIU, L. X. A CASD/CASM method for prosthetic socket fabrication using the FDM technology. **Rapid Prototyping Journal**, [S.I.], v. 8, n° 4, p. 258-262, 2002.

TOON, Dan; HOPKINSON, N.; CAINE, M. *Design and construction of a sprint shoe with a Selective Laser Sintered Nylon-12 sole unit*. In: FOOTWEAR BIOMECHANICS SYMPOSIUM, Taipei, 8th. 2007. p. 35-36.

TOON, Dan; MAJEWSK, Candice; ZARRINGHALAM, Hadi; HOPKINSON, Neil; CAINE, Mike. *A Novel Approach to Personalising the Mechanical Properties of Sprint Footwear*. In: ESTIVALET, Margaret; BRISSON, Pierre Brisson. **The Engineering of Sport 7**. [S.I.]: Springer, 2008. p. 207-213.

TOON, D. et al. *A methodology to investigate the relationship between lower-limb dynamics and shoe stiffness using custom-built footwear*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, [S.I.], v. 225, n° 1, p. 32-37, 2011.

TRELEAVEN, P.; WELLS, J. *3D Body Scanning and Healthcare Applications*. **Computer**, [S.I.], v. 40, n. 7, p. 28-34, 2007.

TUCK, C.; HAGUE, R. *Management and Implementation of Rapid Manufacturing*. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. Chichester, London: Wiley, 2006. p. 159-173.

TUCK, C.; HAGUE, R. *The pivotal role of rapid manufacturing in the production of cost-effective customised products*. **International Journal of Mass Customisation**, [S.I.], v. 1, n° 2, p. 360-373, 2006.

TUCK, C. et al. *Extreme Customization: Rapid Manufacturing Products that Enhance the Consumer*. In: WORLD CONFERENCE ON MASS CUSTOMIZATION & PERSONALIZATION. Cambridge, MA, EUA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2007.

TUCK, C. J. et al. *Rapid manufacturing facilitated customization*. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, [S.I.], v. 21, n° 3, p. 245-258, 2008.

VENTURA, J. D.; KLUTE, G. K.; NEPTUNE, R. R. *The effect of prosthetic ankle energy storage and return properties on muscle activity in below-knee amputee walking*. **Gait & Amp.** [S.I.], v. 33, n° 2, p. 220-226, 2011a.

VENTURA, J. D.; KLUTE, G. K.; NEPTUNE, R. R. *The effects of prosthetic ankle dorsiflexion and energy return on below-knee amputee leg loading*. **Clinical Biomechanics** [S.I.], v. 26, n° 3, p. 298-303, 2011b.

VERNADAT, F. B. **Enterprise Modeling and Integration**. [S. 1.]: Springer, 1996.

WAURZYNIAK, P. *Direct-Metal Processes*. **Manufacturing Engineering**, v. 136, n° 4. Dearborn, MI, EUA, 2006.

WAURZYNIAK, P. *Rapid Manufacturing*. **Manufacturing Engineering**, v. 138, n° 2. Dearborn, MI, EUA, 2007.

W. L. GORE & ASSOCIATES INC. *I. GORE PROCEL Cast Liner - Application Guide*. Newark, DE: Flagstaff 2001. 2 p.

W. L. GORE & ASSOCIATES INC. *I. GORE PROCEL® Cast Liner Form-Fit - a break from tradition*. Newark, DE: Flagstaff 2006. 2 p.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2009: state of the industry - annual worldwide progress report**. Fort Collins Colo.: Wohlers Associates, 2009.

WOOTEN, J. *Aeronautical Case Studies Using Rapid Manufacture*. In: HOPKINSON, N. et al (Ed.). **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. Chichester, London: John Wiley & Sons, 2006. p. 233-239.

ZANDE, M. V. D. et al. *Customization of Consumer Goods: First Steps to Fully Customizable Fashionable Ladies' Shoes*. In: WORLD CONFERENCE ON MASS CUSTOMIZATION & PERSONALIZATION. Cambridge, MA, EUA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2007.

## APÊNDICE A – EXEMPLOS DE PRODUTOS FABRICADOS POR MÉTODOS ADITIVOS

A seguir são apresentados exemplos de produtos fabricados por meio de tecnologias de AM em diferentes segmentos da indústria.

### *Indústria Aeroespacial*

Vários modelos de aeronaves não tripuladas (UAS, do inglês *Unmanned Aircraft Systems*) têm sido produzidos utilizando componentes fabricados através de tecnologias de AM. A empresa Paramount Industries produziu várias peças de um modelo de UAS para o governo americano utilizando a tecnologia LS. Mais de 150 UAS desse modelo foram fabricados (BRAD, 2006; WOOTEN, 2006; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

A fabricante de aviões Boeing foi pioneira no uso de tecnologias de AM para fabricação de componentes de aeronaves militares e civis. Um dos primeiros projetos foi a manufatura de dutos de ar do sistema de controle ambiental para o jato militar F-18. Usando a tecnologia LS para fabricar os dutos, a empresa pôde eliminar ferramental e operações de soldagem e montagem. Em um dos sistemas, o número de componentes foi reduzido de quinze para um. A habilidade de fornecer peças sob demanda reduziu os níveis de inventário significativamente. Atualmente, mais de 80 peças desse modelo de aeronave são fabricadas utilizando a tecnologia LS. O jato comercial Boeing 787 contém 32 peças fabricadas por LS – na maior parte, dutos de ar, como os ilustrados na Figura A.1. O material utilizado em todas essas aplicações é um grau de poliamida com retardante de chama, com excelentes propriedades físicas. Esses componentes foram os primeiros a serem utilizados em aeronaves de grande porta para transporte de passageiros (BRAD, 2006; WOOTEN, 2006; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

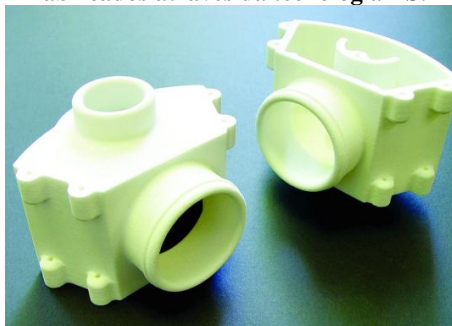
**Figura A.1 – Dutos de ar fabricados pela Boeing por meio da tecnologia LS**



Fonte: Wohlers (2009).

A empresa Paramount tem fabricado vários componentes para helicópteros corporativos, como partes do sistema de ventilação (Figura A.2) e carcaças de lâmpadas de leitura. Essas peças têm sido produzidas com um grau de poliamida com retardante de chama, utilizando a tecnologia de sinterização a laser. O material utilizado foi aprovado em testes de flamabilidade, geração de fumaça e de toxicidade, de acordo com normas da indústria aeroespacial (BRAD, 2006; WOOTEN, 2006; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

**Figura A.2 – Componentes de helicópteros fabricados através da tecnologia LS.**



Fonte: Wohlers (2009).

### ***Indústria automobilística***

A montadora de automóveis de luxo Bentley tem produzido, por meio da tecnologia LS, componentes personalizados para o interior de veículos de luxo (Figura A.3).

**Figura A.3 – Componente de painel automotivo utilizando a tecnologia LS**



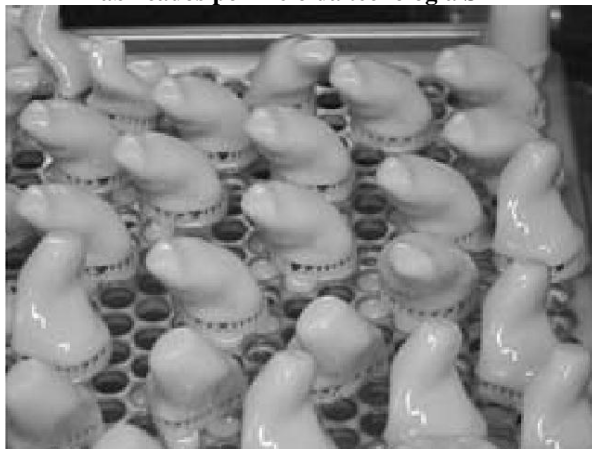
Fonte: Reeves (2008).

Tais componentes são recobertos com adesivos decorativos ou couro, em uma etapa posterior do processo de fabricação, para conferir um acabamento de alto padrão (REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

### ***Indústrias médica e odontológica***

As empresas Phonak Hearing Systems e Siemens Hearing Instruments, trabalhando em parceria, foram as pioneiras na utilização conjunta de tecnologias de Engenharia Reversa e de Manufatura Aditiva para a fabricação em escala comercial de carcaças de aparelhos auditivos personalizados. Estas empresas empregam a tecnologia SLA para a fabricação das carcaças (Figura A.4). Cada batelada pode produzir até 100 peças em cerca de 6 horas. Os aparelhos auditivos contendo carcaças fabricadas sob medida utilizando tecnologias de RE e AM resultaram em altos níveis de satisfação dos usuários. Clientes entrevistados responderam que sentem que os aparelhos se encaixam melhor ao ouvido, são mais confortáveis e mais eficientes em relação aos aparelhos tradicionais (HARRIS e SAVALANI, 2006; MASTERS, VELDE e MCBAGONLURI, 2006; FU, 2008; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

**Figura A.4 – Aparelhos auditivos fabricados por meio da tecnologia SLA**



Fonte: Fu (2008).

Posteriormente várias outras empresas deste segmento, como Widex, Sonic Innovations, GN ReSound, dentre outras, adotaram tecnologias de AM como parte do seu processo produtivo. Além da SLA, a tecnologia de Projeção de Máscaras também foi adotada como meio de fabricação deste tipo de produto em um segundo momento (HARRIS e SAVALANI, 2006; MASTERS, VELDE e MCBAGONLURI, 2006; FU, 2008; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

A empresa 3M lançou um sistema para a produção de componentes para restaurações dentais, como suportes para coroas e pontes (Figura A.5), batizado de Lava Scan ST System. O sistema consiste em um portal eletrônico que permite que laboratórios dentais enviem modelos de dentes ou arcadas dentárias em formato eletrônico. Tais modelos são analisados, manipulados e posteriormente enviados para *bureaus* de Manufatura Aditiva, como a empresa 3T RPD, baseada no Reino Unido, para fabricação dos componentes. As tecnologias DMLS e SLM têm sido aplicadas para fabricação destes tipos de produtos, que normalmente utilizam ligas de cromo-cobalto como material de fabricação. Os produtos acabados são entregues dentro de um prazo de três dias (HARRIS e SAVALANI, 2006; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

**Figura A.5 – Componentes para restaurações dentais fabricados em CoCr por meio da tecnologia DMLS**



Fonte: Wohlers (2009).

Em 2007 a empresa Ala Ortho, da Itália, lançou a sua primeira linha comercial de implantes ortopédicos utilizando a tecnologia EBM, da Arcam (Figura A.6). Os implantes são produzidos com uma liga baseada em titânio – Ti6-Al4-V. Até o ano de 2009, a Ala Orto e outro



fabricante de implantes haviam fabricado cerca de 10.000 implantes de quadril e 2.000 deles haviam sido implantados em pacientes. A empresa ConforMIS, baseada nos EUA, utiliza a tecnologia LS para produzir implantes de joelho e instrumentos cirúrgicos (HARRIS e SAVALANI, 2006; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

**Figura A.6 – Implante ortopédico fabricado por meio da tecnologia EBM**



Fonte: Wohlers (2009).

### ***Bens de consumo não duráveis***

A empresa FigurePrints fabrica bonecos dos personagens do *video game* World of Warcraft (Figura A.7) utilizando a tecnologia 3DP.

**Figura A.7 – Boneco de um personagem do jogo eletrônico World of Warcraft, fabricado por meio da tecnologia 3DP**



Fonte: Wohlers (2009).

Os bonecos são produzidos e comercializados sob licença da criadora do jogo, a empresa Blizzard Entertainment. O preço de um boneco fabricado por esse processo é de US\$ 130,00 nos EUA e de € 130,00 na Europa. O prazo de entrega é de cerca de 30 dias (REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

Seguindo o sucesso da FigurePrints, outras empresas de jogos eletrônicos passaram a ofertar a fabricação de bonecos utilizando tecnologias de AM. Em dezembro de 2008 as empresas Electronic Arts e Z Corp anunciaram uma parceria para a produção e comercialização de bonecos criados pelos usuários usando o jogo Spore. Esse jogo permite a criação de personagens em minutos, juntando partes de corpos de uma base de dados através do recurso “segurar e arrastar”. Os bonecos são comercializados por US\$ 49.50 nos EUA (REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

A empresa inglesa Prior 2 Lever (P2L) lançou comercialmente a primeira chuteira fabricada sob medida para atletas profissionais, chamada de Assassin (Figura A.8).

Suas solas são fabricadas em poliamida, utilizando a tecnologia LS. O par dessas chuteiras é vendido por £6.000,00. O projeto teve participação do grupo de pesquisas em AM da Universidade Loughborough, da Inglaterra, e da empresa Freedom of Creation, da Holanda (REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

**Figura A.8 – Chuteira Assassin, produzida pela empresa P2L utilizando a tecnologia LS para a fabricação da sola**



Fonte: Wohlers (2009).

## Arquitetura

Várias peças de móveis têm sido fabricadas utilizando tecnologias de AM. O *designer* Lionel Dean projetou o encosto de uma cadeira, chamada Holy Ghost, fabricada por meio da tecnologia LS pela empresa 3T RPD Ltd., da Inglaterra (REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

A MGX, uma subsidiária da empresa Materialise, fundada em 2004 na Bélgica, fabrica luminárias com diferentes *designs* em edições limitadas utilizando tecnologias de AM. A MGX teve faturamento de cerca de € 2 milhões (estimado) em 2009 (JANNE, 2006; REEVES, 2008; WOHLERS, 2009).

Na Figura A.9 é mostrado um modelo de luminária fabricado por meio de tecnologia de Manufatura Aditiva.

**Figura A.9 – Luminária fabricada pela empresa MGX utilizando tecnologia AM**



Fonte: Wohlers (2009).

## APÊNDICE B – TECNOLOGIAS DE IMOBILIZAÇÃO

A seguir são apresentadas as principais tecnologias de imobilização ortopédica disponíveis no mercado atualmente.

### *Imobilização com aparelho gessado*

A imobilização com aparelho gessado, ou imobilização gessada, pode ser feita com gesso natural ou sintético. Normalmente ela cobre um segmento do membro afetado e as articulações adjacentes (Solomon, Warwick e Nayagam, 2010). Essa técnica é considerada econômica, eficiente e suficientemente segura, desde que o gesso seja ajustado corretamente.

Na Figura B.1 é ilustrado um membro imobilizado por meio de gesso.

**Figura B.1 – Imobilização gessada de membro inferior**



Fonte: Boyd, Benjamin e Asplund (2009).

A imobilização não pode ficar muito justa, o que poderia gerar ferimentos na pele, afetar a circulação sanguínea e danificar nervos. Em casos extremos, isso pode causar um problema conhecido como síndrome compartimental, que pode, em última instância, levar a necessidade de amputação do membro afetado. Entretanto, mesmo o gesso sendo aplicado de forma correta, ainda podem ocorrer

complicações no caso de inchaço do membro afetado. Outro problema frequentemente encontrado com esse tipo de abordagem é o enrijecimento de articulações – efeito da adesão entre fibras musculares e fibras e ossos, durante o processo de regressão de hematomas – devido à falta de movimento. A falta de movimento também inibe a recuperação de defeitos em tecidos cartilaginosos. Outros problemas frequentemente encontrados com o gesso são: desconforto ao paciente, devido ao alto peso e baixa circulação de ar, irritações à pele e odor, devido a retenção de suor, e baixa resistência mecânica e à água, o que gera a necessidade de trocas da imobilização com certa frequência. O gesso sintético tem certas vantagens sobre o natural, como maior resistência mecânica e à água, menor peso, melhor circulação de ar e vapor (quando utilizado um acolchoado respirável), mas os principais problemas da imobilização com gesso convencional permanecem.

### ***Tutores***

Tutores são sistemas de imobilização formados por placas conformadas à anatomia do paciente e fixadas ao membro a ser imobilizado através de cintas e fivelas. Podem ser fabricadas em gesso ou materiais termoplásticos – sendo os últimos mais comuns. Na Figura B.2 é mostrado um tutor para imobilização de membro inferior.

**Figura B.2 – Tutor plástico para imobilização de membro inferior**



Fonte: Sarmiento *et al.* (1984).

Os tutores não imobilizam totalmente as articulações dos membros – comumente, o movimento de rotação em torno de um eixo é permitido –, portanto não provocam o problema de enrijecimento, comum aos aparelhos gessados. O tratamento de fraturas através de tutores é chamado de tratamento funcional, por permitir ambulação. Uma vez que os tutores não conferem a mesma rigidez que os aparelhos gessados, normalmente são aplicados somente após o início da união dos segmentos ósseos, o que frequentemente ocorre entre alguns dias e até seis semanas de imobilização gessada ou de tratamento através de tração. Essa técnica normalmente apresenta melhores resultados na imobilização de ossos grandes, como o fêmur ou a tíbia. Além da vantagem de não provocar enrijecimento de articulações, os tutores são considerados bastante seguros, pois a pressão pode ser aliviada no caso de inchaço, possuem baixo peso, podem ser colocados e retirados facilmente, permitem uma boa circulação de ar e vapor, possuem boa resistência mecânica e à água, podem ser fabricados sob medida e permitem a utilização de calçados convencionais. Apesar de apresentarem uma série de vantagens em relação aos aparelhos gessados, alguns pontos negativos também podem ser associados aos tutores, tais como: custo relativamente alto, não são aplicáveis a lesões nos tornozelos e nos pés e o processo de personalização é longo e trabalhoso (SOLOMON, WARWICK e NAYAGAM, 2010).

### ***Botas Imobilizadoras***

As botas imobilizadoras normalmente são compostas de quatro partes – uma carcaça rígida, fabricada com materiais termoplásticos; um acolchoado de poliuretano expandido revestido por tecido; um sistema de fechamento, frequentemente composto de cintas de velcro; e um solado de borracha (Figura B.3).

O uso de botas imobilizadoras para o tratamento de lesões nos membros inferiores tem crescido substancialmente por oferecer uma série de vantagens em relação ao gesso natural e sintético, como fácil colocação e remoção, o que permite a limpeza do membro em tratamento e a realização de exercícios de fisioterapia, fácil ajuste de pressão, baixo impacto no modo de caminhar, movimentação controlada na articulação do tornozelo (em modelos específicos), peso relativamente baixo, boa circulação de ar e vapor, resistência mecânica e resistência à água (embora não se recomende que sejam molhadas, pois o acolchoado absorve umidade e a libera lentamente, o que facilita

o crescimento de microrganismos). Entretanto, alguns pontos negativos também podem ser associados às botas imobilizadoras, como: custo relativamente alto e aplicação limitada a fraturas estáveis, somente após o início da sua consolidação (KEEFER *et al.*, 2008).

**Figura B.3 – Bota imobilizadora**



Fonte: Keefer *et al.* (2008).