



**UNIVERSIDADE**  
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



**ESCOLA DE DESIGN**

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

**A IMPRESSÃO 3D NO MEIO PRODUTIVO E O DESIGN:  
um estudo na fabricação de joias**

**MARCO TÚLIO FERREIRA MONTEIRO**

Belo Horizonte  
Universidade Do Estado De Minas Gerais - UEMG  
2015

**MARCO TÚLIO FERREIRA MONTEIRO**

**A IMPRESSÃO 3D NO MEIO PRODUTIVO E O DESIGN:  
um estudo na fabricação de joias**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em Design, na área de concentração: Design, Inovação e Sustentabilidade.

Orientadora:

Prof.<sup>a</sup> Sebastiana Luiza Bragança Lana, Dr.<sup>a</sup>.  
(Universidade do Estado de Minas Gerais)

Coorientador:

Prof. Carlos Alberto Silva de Miranda, Dr.  
(Universidade do Estado de Minas Gerais)

Belo Horizonte  
2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,  
por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa,  
desde que citada a fonte.

M775i Monteiro, Marco Túlio Ferreira.  
A impressão 3d no meio produtivo e o design [manuscrito]: um  
estudo na fabricação de joias / Marco Túlio Ferreira Monteiro. - 2015.

129 f. : il. color. grafs. tabs. ; 31 cm.

Orientadora: Sebastiana Luiza Bragança Lana  
Coorientador: Carlos Alberto Silva de Miranda  
Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Design.

Bibliografia: f. 124-129

1. Desenho Industrial - Processos de Fabricação - Minas Gerais -  
Teses. 2. Desenho (Projetos) - Impressão 3D - Joalheria - Teses. 3.  
Universidade do Estado de Minas Gerais. Escola de Design - Design e  
Manufatura Aditiva - Teses. I. Lana, Sebastiana Luiza Bragança. II.  
Miranda, Carlos Alberto Silva de. III. Universidade do Estado de Minas  
Gerais. Escola de Design. IV. Título.

CDU: 7.05:62-5



UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

## A IMPRESSÃO 3D NO MEIO PRODUTIVO E O DESIGN: UM ESTUDO NA FABRICAÇÃO DE JOIAS.

Autor: Marco Túlio Ferreira Monteiro

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 19 de junho de 2015.

*Rita de Castro Engler*  
Coordenação Doutorado e Mestrado  
MASP: 1160198-6  
ESCOLA DE DESIGN - UEMG

Prof<sup>ª</sup>. Rita de Castro Engler  
Coordenadora do PPGD

BANCA EXAMINADORA

Prof<sup>ª</sup>. Sebastiana Uiza Bragança Lana, Dr<sup>ª</sup>.  
Orientadora  
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof. Carlos Alberto Silva de Miranda, Dr.  
Coorientador  
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof<sup>ª</sup>. Rachel Zuanon Dias, Dr<sup>ª</sup>.

Anhembi-Morumbi SP

Prof. Jairo José Drummond Câmara, Dr.

Universidade do Estado de Minas Gerais

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora professora Sebastiana Lana, pela confiança depositada em mim. Ao meu coorientador professor Carlos Miranda pela condução, paciência, sinceridade e disponibilidade nos principais momentos do trabalho.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-graduação da Escola de Design, em especial à professora Regina Álvares pela gentileza, disponibilidade, atenção e todas as conversas que ajudaram muito no desenvolvimento do trabalho.

Ao apoio recebido por todos no Centro de Gemas e Joias, ao colega de longa data Henrique Lana pelas suas dicas e sugestões e em especial à Mara Guerra por toda gentileza e atenção sempre oferecidos nas horas mais difíceis.

Ao Rodrigo Stenner, funcionário da secretaria a quem sou muito grato pela receptividade e apoio sempre que foi necessário.

E um agradecimento especial a toda minha família, especialmente aos meus pais e minhas filhas por toda paciência e compreensão.

## RESUMO

MONTEIRO, Marco Túlio Ferreira. **A Impressão 3D no Meio Produtivo e o Design: um estudo na fabricação de joias**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

A impressão tridimensional, apesar da grande exposição dos últimos anos, surgiu por volta de 1970 a partir da junção dos campos de estudo da topografia e da foto-escultura. Sua primeira utilização comercial voltada para a construção de modelos e protótipos, etapa do processo de desenvolvimento de produtos para fabricação em série.

Desde então ela veio se desenvolvendo, a princípio particularmente em aplicações médicas e, posteriormente, foi se diversificando e ganhando espaço em diferentes segmentos. Nos últimos anos, e em função da redução dos custos e popularização pela qual as tecnologias de impressão 3D vêm passando, pode se observar uma intensificação e diversificação na sua utilização, inclusive aplicada como ferramenta de fabricação em função de seu grande benefício de redução e simplificação das etapas de fabricação.

A joalheria foi um dos primeiros segmentos a aplicar a impressão tridimensional regularmente como uma etapa do processo de fabricação da joia. Hoje é comum se encontrar impressoras utilizadas como ferramenta de construção de modelos, primeira etapa do processo de fundição de metais por cera perdida, trabalho anteriormente realizado manualmente por um modelador.

Já existem tecnologias para aplicação em etapas mais avançadas do processo, porém elas ainda não se popularizaram para uso comercial no segmento. Uma clara tendência de redução de custos, especialização e ampliação da utilização das impressoras pode ser observada, levando a uma popularização das técnicas e uma tendência de eliminação de muitas etapas, simplificando assim os processos de fabricação.

Este estudo abordou as características das tecnologias disponíveis e sua possibilidade de aplicação na fabricação de joias sob a perspectiva do design. Também foi abordada a questão do processo de design com a interferência das tecnologias de fabricação digital direta, bem como novos métodos que tratem estes novos aspectos.

As metodologias de design precisam ser repensadas devido a aplicação de novas tecnologias no contexto do desenvolvimento de produtos, não apenas as tecnologias de fabricação, mas também as novas ferramentas digitais desenvolvidas. Os métodos precisam ser repensados com o objetivo de melhor representar as novas formas de abordagem do projeto.

As mudanças no cenário industrial tradicional, no qual o design como conhecemos foi formatado, dentre elas com destaque para o crescente acesso e facilidade de fabricação revelam a necessidade de avaliar novas possibilidades de atuação, sendo fundamental discutir novos modelos e papéis para o designer de produto.

**Palavras-chave:** design, manufatura aditiva, processos, impressão 3D, joalheria, fundição por cera perdida.

## ABSTRACT

MONTEIRO, Marco Túlio Ferreira. **3D Printing in Productive Environment and Design: a study in the jewel manufacture.** 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

*Three-dimensional printing, although its great evidence over the past few years, arose around 1970 from the joining of topography and photo-sculpture study fields, in which its concept was inspired. Its first commercial use consisted of building models and prototypes, which means a stage of product development process for mass production.*

*Since then, it has been developed, at first especially in medical applications, and then diversified and conquered other segments. In recent years, due to cost-cutting and popularization which 3D printing techniques have been through, an intensification and diversification of its use can be observed, including applied as manufacturing tool for its great benefit of reduction and simplification of production stages.*

*The jewelry segment was of the first to regularly apply three-dimensional printing as a stage in the jewel manufacturing process. Today, it is common to find printers used as model building tool, the first stage in the lost-wax casting process, a work previously performed manually by a modeler.*

*Nowadays, there are technologies for application in more advanced stages of the process, but they have not been popularized for commercial use in the segment yet. A clear cost-cutting trend, specialization and expansion of the printers use can be observed, leading to the techniques popularization and to the elimination of stages, which simplifies the manufacturing process.*

*This study approaches the features of available technologies and their possible application in the jewel manufacturing from the perspective of design. Furthermore, the issue of design process with the interference of direct digital manufacturing technologies was approached, as well as new methods that refer to such new aspects.*

*Design methods need to be rethought due to the application of new technologies regarding product development, not only the manufacturing technologies, but also the new digital tools for product development. Methods must be rethought in order to represent new ways of approaching the project.*

*The self-production issue also reveals the need of discussing new possibilities concerning the designer's activity as a result of the growing change of the traditional industrial scenario in which the design as we know was created. Thus, it is essential to find new roles for the designer.*

**Key words:** design, additive manufacturing, process, 3D Printing, jewelry, lost-wax casting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa .....	20
Figura 2 - Linha do tempo das patentes referentes à impressão 3D .....	23
Figura 3 e 4 - Foto-escultura de Willème .....	24
Figura 5 - Ilustração da patente do método de Blather .....	25
Figura 6 - Ilustração da patente do método de Swainson .....	25
Figura 7 - Ilustração da patente do método de Hull .....	26
Figura 8 - Imagem de uma xícara mostrando as camadas construtivas .....	27
Figura 9 - Modelo arquitetônico ilustrando a utilização das camadas construtivas.....	28
Figura 10 - Classificação das técnicas de Manufatura Aditiva baseadas no tipo de matéria-prima.....	32
Figura 11 - Processos gerais da manufatura aditiva .....	36
Figura 12 - Volume de produção versus custos: Fabricação tradicional versus Impressão 3D .....	41
Figura 13 - Esquema geral de integração de uma impressora 3D .....	43
Figura 14 - Dispositivo de interface de modelagem Geomatic Touch .....	46
Figura 15 - Sequência de imagens de vídeo demonstrativo de modelagem no aplicativo True2Form	47
Figura 16 - Esquema geral do processo STL .....	52
Figura 17 - Esquema geral do processo FDM .....	53
Figura 18 - Esquema geral do processo SLS .....	54
Figura 19 - Esquema geral do processo 3DP .....	55
Figura 20 - Esquema geral do processo IJP .....	56
Figura 21 - Esquema geral do processo LENS.....	57
Figura 22 - Esquema geral do processo LOM .....	58
Figura 23 - Evolução do mercado de impressão 3D .....	59
Figura 24 - Exemplos de aplicação da impressão 3D .....	65
Figura 25 - “The Jewel Mandala” Diagrama de segmentação das joias .....	69
Figura 26 - Parte do mapa de Classificação dos Joalheiros “A Polarized convocation of Jewelers” .....	71
Figura 27 - Esquema de corte de molde de fundição .....	75
Figura 28 - Diagrama das etapas do processo de fundição por cera perdida.....	77
Figura 29 - Macrofluxo de Fundição por Cera Perdida .....	79
Figura 30- Esquemas de funcionamento de impressoras DLP e SLA .....	86
Figura 31 - Foto ampliada de anéis fabricados em processo DLP .....	87
Figura 32 - Imagens de modelagem de anel feita em cera .....	88
Figura 33 - Anel fabricado em resina por manufatura aditiva .....	88
Figura 34 - Bracelete em cera fabricado em manufatura aditiva e posteriormente fundido em prata	90
Figura 35 - Anéis feitos em cera para fundição fabricados em manufatura aditiva .....	90

Figura 36 - Etapas e técnica de construção de molde de borracha e injeção de peças em cera.....	91
Figura 37 - Etapas e técnicas para construção do molde, fundição, separação e limpeza das joias. ...	92
Figura 38 - Peças em ouro fabricadas em manufatura aditiva sendo retiradas da máquina .....	93
Figura 39- Peças fabricadas em ouro por manufatura aditiva .....	93
Figura 40 - Pingente do designer Lionel T. Dean feito em AM com ouro 18 quilates .....	96
Figura 41 - Imagens de esculturas com geometria complexa fabricadas em manufatura aditiva .....	97
Figura 42: Sequência de imagens de processo de otimização topológica do software OptiStruct .....	98
Figura 43: Componentes aeroespaciais topologicamente otimizados, pela Universidade de Loughborough, fabricada pelo processo SLM em liga de titânio (Ti/6Al/4V). .....	98
Figura 44: 40 anéis em metal precioso feitos simultaneamente em uma só etapa à esquerda, e anéis mais complexos em lotes menores, porém com menos suportes de material à direita. ....	99
Figura 45: Colar em liga de titânio criado pelo designer Carrie Dickens feito em uma única etapa por manufatura aditiva.....	100
Figura 46: brincos e anel fabricados por manufatura aditiva. ....	101
Figura 47 - Processo de design na fabricação tradicional e na fabricação com Prototipagem Rápida	104
Figura 48 - Sistema Amplo de Projeto para Manufatura Aditiva e Ferramentas.....	104
Figura 49 - Metodologia de Design para Manufatura Aditiva (DFAM) proposta.....	105
Figura 50 - Macrofluxo do processo de Fundição por Cera Perdida com interferência da Impressão 3D .....	114
Figura 51 - Integração do design nas considerações dos universos “Computer Aided” .....	116
Figura 52 - Novo fluxo de atuação do designer dentro do processo de fabricação digital direta de joias .....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de classificação de alguns processos de transformação.....	30
Tabela 2 - Classificação de processos de impressão 3D por tipo de material e canais de adição. ....	32
Tabela 3 - Oportunidades globais decorrentes da impressão 3D em diferentes setores.....	60
Tabela 4 - Princípios Operacionais da AM e Principais Fornecedores de maquinário.....	63
Tabela 5 - Classificação de processos 3DP por tipo de material e meio de transformação. ....	108
Tabela 6 - Quadro simplificado dos passos e intenções do processo de fundição por cera perdida .	113
Tabela 7 - Quadro síntese da influência da Impressão 3D nos estágios da fundição por cera perdida na fabricação e no design .....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i> (Aparelho de Estereolitografia)
STL	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
SL	<i>Selective Laser</i> (Laser Seletivo)
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> (Sinterização por Laser Seletivo)
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> (Derretimento por Laser Seletivo)
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por deposição de material fundido)
3DP	<i>Three Dimensional Printing</i> (Impressão tridimensional)
IJP	<i>Ink Jet Printing</i> (Impressão por jato de tinta)
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i> (Modelagem por Laser de Engenharia)
LOM	<i>Laminated Object Modeling</i> (Modelagem de Objeto por Laminação)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Associação Americana para testes e materiais)
AM	<i>Additive Manufacturing</i> (Manufatura Aditiva)
RP	<i>Rapid Prototyping</i> (Prototipagem Rápida)
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i> (Especificação de troca de gráficos iniciais)
GUI	<i>Graphic User interface</i> (Interface gráfica de uso)
NURBS	<i>Non-Uniform Rational Basis-Splines</i> (Splines racionais não uniformes)
CAD	<i>Computer-aided Design</i> (Design auxiliado por computador)
CAE	<i>Computer-aided Engineering</i> (Engenharia auxiliada por computador)
CAM	<i>Computer-aided Manufacturing</i> (Manufatura auxiliada por computador)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controle numérico computadorizado)
RE	<i>Reverse Engineering</i> (Engenharia Reversa)
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise de elementos finitos)
UV	Ultra Violeta
ABS	<i>Acrilonitrila Butadieno Estireno</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
FDD	Fabricação Digital Direta
DIY	<i>Do It Yourself</i> (faça você mesmo)
DFAM	<i>Design for Additive Manufacturing</i> (Design para Manufatura Aditiva)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1. Contextualização .....	14
1.2. Objetivos .....	18
1.2.1. Objetivo Geral.....	18
1.2.2. Objetivos Específicos .....	18
1.3. Metodologia .....	18
1.4. Estrutura do Documento.....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1. A impressão 3D.....	23
2.1.1. Impressão 3D, origens e desenvolvimento .....	23
2.1.2. Impressão 3D dentre os Processos de Transformação .....	29
2.1.3. Princípios Básicos da Manufatura aditiva.....	35
2.1.4. Tecnologias Associadas - Sistemas de assistidos por computador.....	41
2.1.4.1. Computer-aided Design (Design auxiliado por computador) .....	43
2.1.4.2. Reverse Engineering (Engenharia Reversa).....	48
2.1.4.3. Computer-aided Engineering (Engenharia auxiliada por computador) .....	49
2.1.4.4. Computer-aided Manufacturing (manufatura auxiliada por computador) .....	50
2.1.5. Principais Sistemas de impressão tridimensional.....	51
2.1.5.1. Stereolithography (STL) - Estereolitografia .....	51
2.1.5.2. Fused Deposition Modeling (FDM) - Deposição por Material Fundido .....	52
2.1.5.3. Selective Laser Sintering (SLS) - Sinterização por Laser Seletivo.....	54
2.1.5.4. Three Dimensional Printing (3DP) - Impressão Tridimensional .....	55
2.1.5.5. Ink Jet Printing (IJP) - Impressão por Jato de Tinta .....	56
2.1.5.6. Laser Engineered Net Shaping (LENS) - Modelagem por Laser de Engenharia.....	57
2.1.5.7. Laminated Object Modeling (LOM) - Modelagem de Objeto por Laminação.....	58
2.1.6. Evolução e principais aplicações da impressão 3D.....	58
2.2. A joia.....	66
2.2.1. Tipos de fabricação de Joias .....	70
2.2.2. Técnicas artesanais de trabalho com metais.....	71
2.2.3. Processos industriais de fabricação.....	73
2.2.4. Design na joalheria .....	80
<b>3. IMPRESSÃO 3D E A JOALHERIA .....</b>	<b>83</b>
3.1. Manufatura aditiva aplicada como Ferramenta de Prototipagem .....	83
3.2. Manufatura aditiva aplicada na Construção da Peça Modelo .....	85
3.3. Manufatura aditiva aplicada na Construção das Peças em Cera .....	89

3.4. Manufatura aditiva aplicada na Fabricação de Peças em Metal.....	91
3.4.1. Forma e Geometria.....	96
3.4.2. Topologia .....	97
3.4.3. Área de Impressão .....	99
3.4.4. Mercado Pós Metálicos .....	100
3.4.5. Vantagens da Fabricação Digital Direta (FDD).....	101
3.5. O processo Design com a Manufatura Aditiva .....	103
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>108</b>
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>122</b>

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Contextualização**

### **1.2 Objetivos**

### **1.3 Metodologia**

### **1.4 Estrutura do Documento**

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

O processo da impressão 3D consiste basicamente na fabricação de uma peça a partir da deposição de um determinado material em camadas sobrepostas repetidas vezes até que se tenha a peça completa.

Essa tecnologia se originou fundamentalmente de dois campos de estudos até então separados, a topografia e a foto-escultura, quando Wyn Kelly Swainson propõe a fabricação direta de uma peça através da catalisação seletiva de um polímero na interseção de dois feixes de laser (BOURELL, *et al.*, 2009).

A primeira aplicação comercial da tecnologia de impressão 3D surge em 1987 pela empresa 3D Systems, que utilizava o sistema de estereolitografia, *Stereolitografy* (SL), no qual uma resina fotossensível era solidificada ao ser exposta à luz ultravioleta (TAKAGAKI, 2012).

No campo do design esta tecnologia foi aplicada pela primeira vez com o objetivo de confeccionar modelos e protótipos, devido ao ganho de tempo e velocidade na construção de modelos funcionais em relação aos tradicionalmente feitos à mão. Hoje ela se encontra consolidada como ferramenta do processo de desenvolvimento de produtos (DIMITROV, SCHREVE e DE BEER, 2006).

A impressão 3D vem ganhando espaço a cada dia, e sua aplicação já pode ser vista nos mais variados segmentos como mobiliário, iluminação, presentes, calçados, vestuário, alimentos, construção, na área médica como próteses, órteses, talas e bioimpressão, instrumentos musicais, aeronáutica, restauração, construção e reformas dentre outros.

Um dos segmentos que já conseguiu aplicar a tecnologia de forma consistente e regular em parte dos processos de fabricação foi a joalheria. A impressão 3D já é realidade na fabricação dos modelos iniciais para a fundição, tarefa antes realizada manualmente e que agora foi incumbida à impressora 3D.

Mesmo com todo avanço tecnológico percebido nos últimos anos, alguns pontos dificultam sua aplicação em algumas etapas, pois as impressoras ainda são lentas e o custo das matérias-

primas elevado se comparados aos métodos tradicionais de produção e seus materiais (HOPKINSON e DIKENS, 2001).

Apesar desse cenário, a redução de custos é uma realidade crescente na impressão 3D, propiciando uma maior utilização nas etapas de fabricação da joia. Já existem tecnologias destinadas a aplicação da impressão 3D nas etapas mais avançadas do processo de fabricação, prometendo gerar grandes mudanças na maneira de se produzir da joalheria.

Esta tendência observada no desenvolvimento da impressão 3D leva em direção a uma fabricação direta dos produtos, ou seja, a gradativa eliminação das etapas intermediárias entre o projeto e o produto acabado, influenciando diretamente o design que passa a tratar em seus métodos, boa parte das considerações técnicas antes distribuídas pelas etapas posteriores de fabricação. Algumas vantagens como flexibilidade produtiva e simplificação dos processos, trazem muitas expectativas sobre o seu futuro e possibilidades de mudar radicalmente a forma como os produtos serão fabricados.

Segundo a Wohlers Associates Inc., a aplicação mais comum ainda se encontra na produção de modelos funcionais, protótipos de componentes e algumas aplicações estéticas, no entanto, o mercado para a indústria de manufatura aditiva tem se mostrado muito promissor e cresce substancialmente a cada ano, partindo de um crescimento de 24,1% e um montante de US\$ 1,325 bilhões em 2010, para 29,4% e US\$ 1,714 bilhões em 2011. Existem hoje alguns modelos de impressora de boa qualidade destinados à utilização em casa que custam em torno de US\$ 2.000, e, só em 2011, este tipo de equipamento teve um incremento de 289% nas vendas, chegando a 23.265 unidades comercializadas (WOHLERS, 2012).

Este crescimento se deve à evolução da tecnologia e vem proporcionando diminuição dos custos das matérias primas bem como do maquinário. Em 2001 a impressora profissional mais barata do mercado custava aproximadamente US\$ 45.000, caindo para US\$ 22.900 em 2005, para menos de US\$ 10.000 em 2011, hoje com preços ainda menores e com tendência de cair ainda mais nos próximos anos. (IGOE e MOTA, 2011).

Alguns estudiosos consideram a impressão 3D uma tecnologia divisora de águas, pois tende a mudar a forma como a fabricação será feita nos próximos anos. Observa-se uma clara tendência de a tecnologia ser o veículo de fabricação direta do produto destinado ao mercado.

Segundo Chris Anderson, a descentralização da produção e dispersão da atividade produtiva, tende a ser intensificada com a progressão tecnológica e, fatalmente causará mudanças significativas na atual conjuntura mercadológica (GUSTIN, 2012).

A impressão 3D levanta diversas possibilidades de mudanças nos processos relativos à fabricação, distribuição e comercialização presentes no mercado. Um exemplo é a aplicação da tecnologia na fabricação de peças de reposição. Os fabricantes poderiam evitar a manutenção de grandes volumes de estoque de peças e utilizar a impressão sob demanda em centros de serviço de impressão licenciados localizados próximo ao usuário (DAY, 2011).

Outro ponto é a diminuição do ciclo de vida dos produtos, que traz à tona questões sobre o impacto ambiental causado pelo descarte desses produtos de forma prematura e não controlada. Porém, também deve ser considerada a redução de desperdício de matéria-prima que a impressão 3D proporciona em comparação com alguns processos de produção (DRIZO e PEGNA, 2006). Os processos de fabricação baseados em plano de corte, como no caso das chapas de madeira para a fabricação de móveis, naturalmente geram perdas e não conseguem aproveitar totalmente a matéria prima, diferentemente da impressão 3D que não gera perdas por processar o material somente onde é necessário.

Questões éticas também são parte da discussão, as aplicações e arquivos disponíveis na internet, os chamados “*open source*”<sup>1</sup>, passam a ser alvo de debates sobre direitos autorais e questões morais, como no caso do site Defcad.com (2012), que tinha como objetivo o livre compartilhamento de arquivos de peças de armas para cidadãos que reivindicam o direito de portá-las e, teve o acesso público removido pelo governo dos Estados Unidos por questões de segurança (BBC, 2013).

Apesar de ainda haver restrições em muitas das aplicações possíveis, a impressão 3D vem sendo utilizada como meio de produção de produtos de consumo como pode ser observado nos sites i.materialise (2013), Cubify (2013), Shapeways (2013) e Imprima3D (2013), que estão apostando na exploração comercial da tecnologia pelas suas capacidades de gerar das formas

---

<sup>1</sup> *Open Source* ou Fonte aberta é um termo utilizado pelo segmento de softwares empregado na identificação de programas que possuem seu código fonte aberto para que possa ser modificado, ou seja o programa não é domínio exclusivo do criador e cria vida ao ser modificado por usuários que identificam possibilidades de melhoria. No caso de arquivos 3D esse termo se refere à capacidade de se modificar um objeto em ambiente virtual sem o consentimento de seu criador (OPEN SOURCE, 2014)

complexas e possibilidade de customização dos produtos, difíceis de serem executadas em outras técnicas (IGOE e MOTA, 2011).

No entanto, apesar de já existirem tecnologias muito avançadas e desenvolvidas, a maior parte delas ainda possui restrições que impedem sua aplicação com finalidade comercial, como custos elevados, preço do maquinário, lentidão na fabricação, qualidade superficial, etc.

As mudanças no cenário produtivo provenientes da impressão 3D, podem ser comparadas com as ocorridas em outros segmentos como no caso da indústria gráfica, que também sofreu mudanças similares baseadas no desenvolvimento de tecnologias de automatização da impressão em papel que conduziram a uma diminuição dos custos levando à sua popularização, massificação e conseqüente mudança no cenário mercadológico.

Algumas aplicações da impressão 3D encontram-se assimiladas em alguns segmentos, como na joalheria, que já tem consolidada a utilização da tecnologia especificamente em algumas das etapas do processo produtivo da joia e, a cada dia, mais espaços vêm sendo ocupados, progressivamente se tornando viável para a fabricação da joia comercial. A etapa de modelagem feita através das impressoras 3D já é parte assimilada e empregada comercialmente dentro do processo de fundição por cera perdida da indústria joalheira, nesta etapa o trabalho manual dividiu espaço com o automatizado com algumas vantagens e custos aparentemente equivalentes.

O design também vem sentindo as mudanças provenientes da aplicação da impressão 3D em função do seu impacto nos processos produtivos, aqui especificamente os da joalheria. A impressão 3D tende a encurtar e diminuir as etapas produtivas, aproximando o produto final do processo de concepção, que pode inclusive ir diretamente do projeto em meio digital para o produto físico.

Desta forma, o design, que antes podia ser encarado como uma ferramenta para melhorar as qualidades estéticas ao produto, agora tende a estar mais integrado com a fabricação incorporando aspectos relativos a questões técnicas, produtivas, estruturais, dentre outras, passando a ser um meio pelo qual a produção é pensada e problemas de fabricação são equacionados.

As tecnologias de manufatura aditiva estão impactando na maneira como se fabrica, gerando novos contextos mercadológicos, afetando assim o design de produtos. É, portanto, fundamental que o design entenda este novo contexto produtivo/mercadológico e suas influências na sua atividade projetual bem como o seu posicionamento frente à novas dinâmicas mercadológicas que vem se apresentando.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral é estudar as mudanças na fabricação de bens de consumo pela inserção das tecnologias de impressão tridimensional, tomando como base o segmento da joalheria para conhecimento das relações entre as mudanças promovidas por esta tecnologia nos processos tradicionais e nas metodologias de design de produtos para a manufatura de joias em metais preciosos.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Contextualizar as diferentes tecnologias de impressão tridimensional, suas origens, classificações, processos, aplicações e benefícios.
- Descrever, a partir de levantamento bibliográfico e do estado da técnica a joalheria, suas técnicas, processos de fabricação e características gerais, de forma a substanciar a análise proposta.
- Identificar características relevantes da utilização da impressão tridimensional na joalheria, seus benefícios e limitações.
- Desenvolver e descrever um panorama sobre a fabricação de joias antes e depois da inserção da impressão tridimensional e reflexão sobre o papel do design e do designer.

## **1.3. Metodologia**

Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa pode ser enquadrada segundo diferentes classificações, pela sua natureza, pela abordagem do problema, pelos seus objetivos e pelos seus procedimentos técnicos.

Assim, segundo as classificações descritas pelos autores, a pesquisa atual pode ser enquadrada como de natureza aplicada, de abordagem qualitativa, com objetivos exploratórios e descritivos e com procedimentos técnicos de pesquisa bibliográfica e de levantamento.

A pesquisa atual é de natureza aplicada por produzir conhecimentos dirigidos à solução de problemas específicos, pois visa gerar conhecimentos relativos à relação da aplicação das tecnologias de impressão tridimensional nos processos de design.

A abordagem pode ser considerada qualitativa pois se propõe a compreender as influências sofridas pelo processo de design no contexto da manufatura aditiva, baseado na interpretação dos fenômenos e na atribuição de significados.

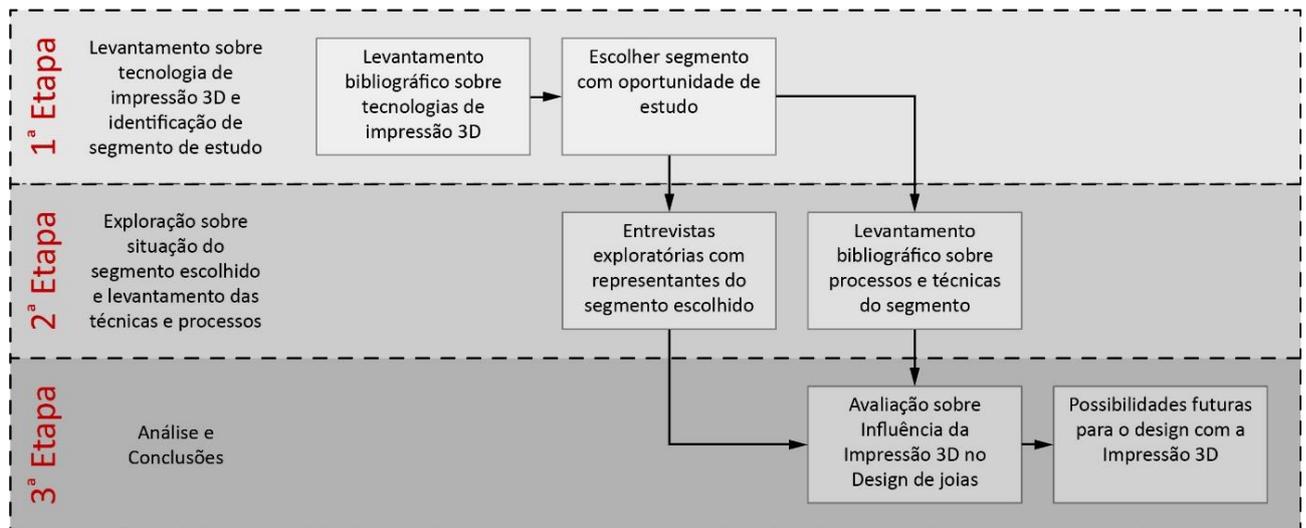
Já do ponto de vista de objetivo, ela pode ser classificada como exploratória pois visa explorar um tema relativamente novo da utilização da manufatura aditiva nos processos de fabricação e com seus conceitos ainda em desenvolvimento, bem como a sua relação com os processos de design.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, inicialmente foi adotada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de contextualizar os conteúdos a serem explorados na pesquisa, iniciando com o tema Impressão tridimensional para contextualização da tecnologia na atualidade e identificação dos potenciais segmentos de interesse de estudo. Depois, com a escolha do segmento joalheiro, passou-se a uma pesquisa bibliográfica para aprofundar nos conceitos relativos ao segmento, bem como estudar suas técnicas e processos de fabricação.

A partir desse ponto foi realizado uma pesquisa bibliográfica sobre a impressão 3D aplicada no processo de fundição por cera perdida na joalheria, bem como um levantamento onde foram feitas entrevistas com empresas prestadoras e serviço de impressão 3D para o segmento de joalheria em belo horizonte com o objetivo delinear o potencial de estudo para o segmento específico dentro da joalheria, levantando as questões relativas ao setor, situação de mercado, aplicação da tecnologia, métodos e técnicas mais utilizadas, viabilidade de desenvolvimento, dentre outras.

Análise do processo de design no contexto da utilização da manufatura aditiva como ferramenta de fabricação e possibilidades e direções futuras para a atividade.

Abaixo segue a Figura 1 de um fluxograma da metodologia de pesquisa contendo as etapas e tarefas executadas.



**Figura 1 - Fluxograma da metodologia utilizada na pesquisa**  
**Fonte: do Autor**

#### 1.4. Estrutura do Documento

O documento se encontra dividido em cinco capítulos. No primeiro são apresentados a introdução da pesquisa, sua contextualização, justificativa, objetivos, metodologia aplicada e estrutura do documento.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, e é subdividido em dois grandes tópicos, o primeiro no qual é apresentado o universo da impressão tridimensional, surgimento, classificação, princípios básicos, tecnologias associadas, principais sistemas e a evolução da impressão 3D. O segundo tópico aborda o universo da joalheria, sua origem, evolução, diversificação, tipos de fabricação, técnicas artesanais e industriais e o design no segmento.

O terceiro capítulo trata da impressão tridimensional utilizada no segmento da joalheria, abordando os quatro distintos momentos de aplicação, inicialmente como ferramenta de prototipagem, depois utilizada para a construção da peça modelo, depois para a construção

das peças em cera, e por último, na construção da peça diretamente em metal, além de tratar do avanço das técnicas na fabricação e o Design de joias com a presença da impressão 3D.

O quarto capítulo traz os resultados e discussões da pesquisa e o último capítulo aborda as considerações e conclusões para o design no contexto da utilização das tecnologias de fabricação digital direta.

Ao final do documento são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A impressão 3D**

**2.1.1 Impressão 3D, origens e desenvolvimento**

**2.1.2 Impressão 3D dentre os Processos de Transformação**

**2.1.3 Princípios Básicos da Manufatura aditiva**

**2.1.4 Tecnologias Associadas - Sistemas de assistidos por computador**

**2.1.5 Principais Sistemas de impressão tridimensional**

**2.1.6 Evolução e principais aplicações da impressão 3D**

### **2.2 A joia**

**2.2.1 Tipos de fabricação de Joias**

**2.2.2 Técnicas artesanais de trabalho com metais**

**2.2.3 Processos industriais de fabricação**

**2.2.4 Design na joalheria**

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A impressão 3D

#### 2.1.1. Impressão 3D, origens e desenvolvimento

A tecnologia empregada na impressão 3D é baseada em dois conceitos claramente definidos e presentes na maioria das impressoras atuais, a fabricação através da deposição de camadas que vão sendo fabricadas sucessivamente até que se obtenha a geometria completa da peça e o conceito da representação de uma geometria tridimensional por um suporte qualquer, no caso atual nos referimos à construção da geometria através de parâmetros dentro de um software digital. Diversas patentes foram depositadas durante o desenvolvimento da impressão tridimensional (USPTO, 2014).

A Figura 2 mostra uma linha do tempo com os anos de depósito das patentes dos campos de estudo que deram origem aos conceitos da impressão tridimensional, a topografia e a fotoescultura, o momento que eles se unem, quando as patentes passam a ter os conceitos abordando os dois campos de estudo originários, até o momento do depósito da patente de Charles Hull, que originou o primeiro sistema comercial de impressão 3D do mercado (BOURELL, *et al.*, 2009).

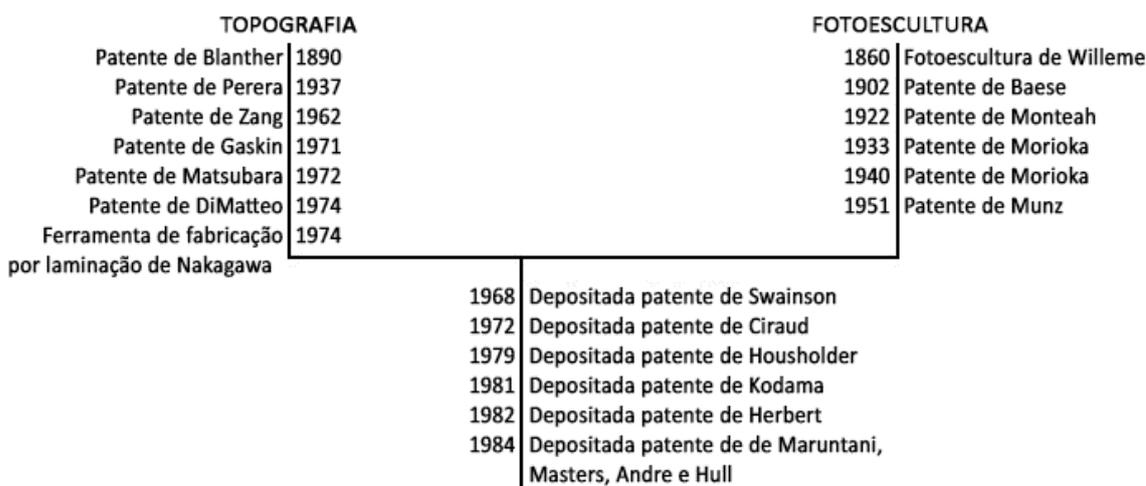
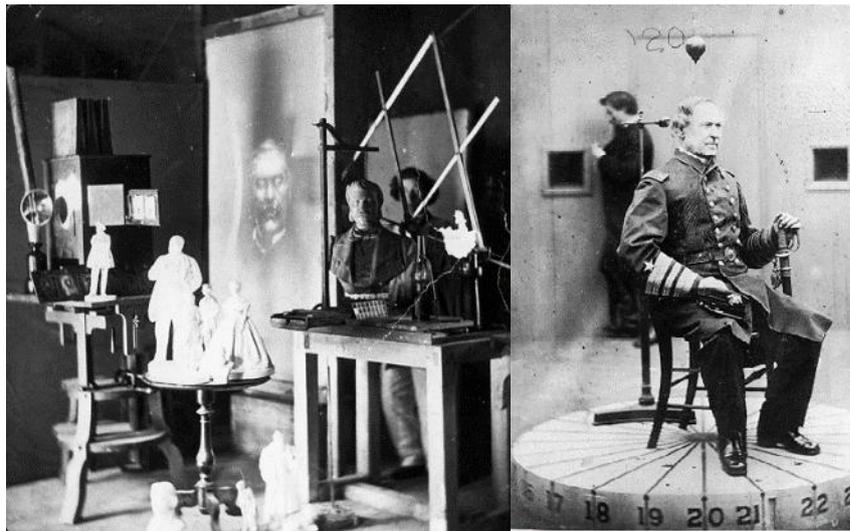


Figura 2 - Linha do tempo das patentes referentes à impressão 3D  
Fonte: (BOURELL, *et al.*, 2009, p. 2)

A foto-escultura se inicia ainda no século XIX, com o objetivo de reproduzir formas humanas e de objetos com maior exatidão do que era possível na época.

Dentre as várias tentativas, uma que se destaca é a técnica desenvolvida por Willème em 1860, que consistia basicamente em reproduzir um objeto a partir de várias fotografias de sua silhueta, especificamente ele posicionava 24 câmeras fotográficas distribuídas igualmente em torno do objeto, para que posteriormente um artista esculpisse cada um desses 24 avos da porção cilíndrica do objeto, conforme visto nas Figura 3 e 4, (VOLPATO, 2007) (BOURELL, *et al.*, 2009).



**Figura 3 e 4 - Foto-escultura de Willème**  
**Fonte: (BOURELL, *et al.*, 2009)**

A partir desta técnica são desenvolvidas outras como a que consta na patente de Morioka (1935), que mistura conceitos da foto-escultura e da topografia, utilizando uma luz negra para captar as linhas de contorno, que então eram cortadas e empilhadas em folhas para serem projetadas no material a ser esculpido.

A patente de Munz (1951), demonstra uma técnica que vem a ser a precursora da estereolitografia, ela consistia basicamente na exposição seletiva de uma luz em uma emulsão transparente que, ao terminar de solidificar uma camada, um pistão era acionado abaixando a plataforma suporte, para que sucessivamente mais uma camada fosse criada, gerando ao final a peça tridimensional completa.

Da topografia, a impressão 3D se apropria do conceito da patente de Blather (1890), da representação da forma tridimensional por camadas de níveis variados, Figura 5.

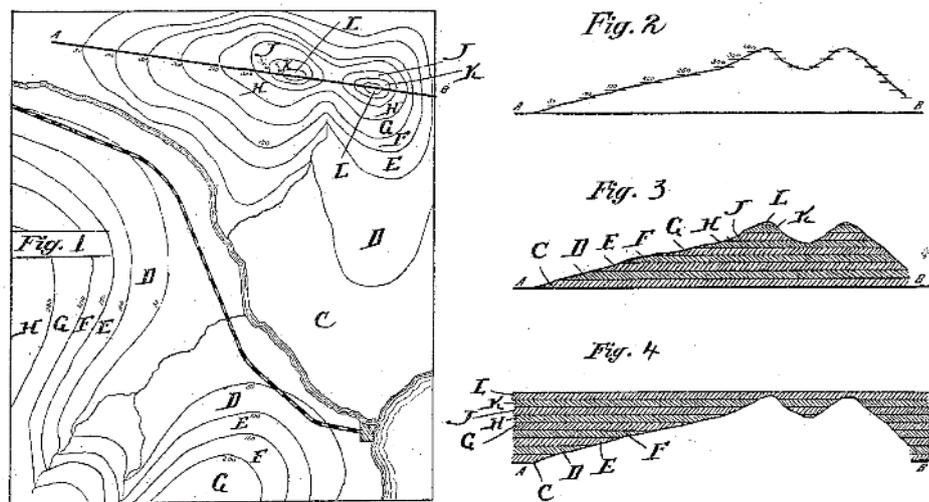


Figura 5 - Ilustração da patente do método de Blather  
 Fonte: (BLANTHER, 1890)

O método proposto por Blather, foi trabalhado com vários refinamentos, sendo desenvolvido nos anos seguintes, técnicas variadas, porém com o mesmo princípio utilizando outros materiais como papel ou placas transparentes, até que Wyn Kelly Swainson (1971) une os conceitos da topografia e da fotoescultura, propondo a fabricação direta de uma peça através da catalisação seletiva de um polímero na interseção de dois feixes de laser (BOURELL, et al., 2009), conforme pode ser visto na Figura 6.

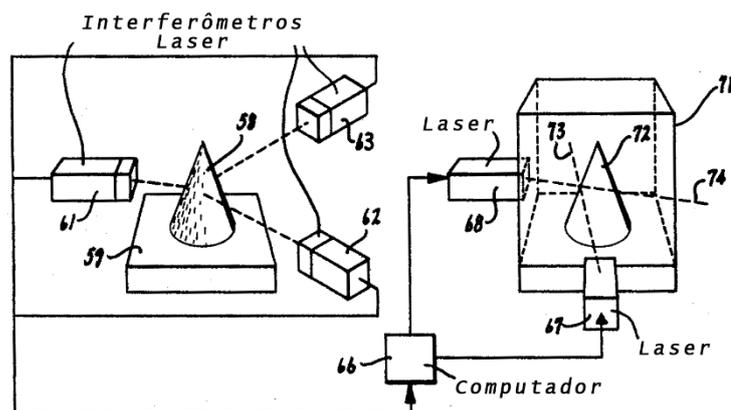


Figura 6 - Ilustração da patente do método de Swainson  
 Fonte: (SWAINSON, 1971)

Posteriormente, em 1972, uma técnica variada da polimerização seletiva é desenvolvida por Matsubara, que propõe uma lâmpada de vapor utilizada para a cura em áreas seletivas de

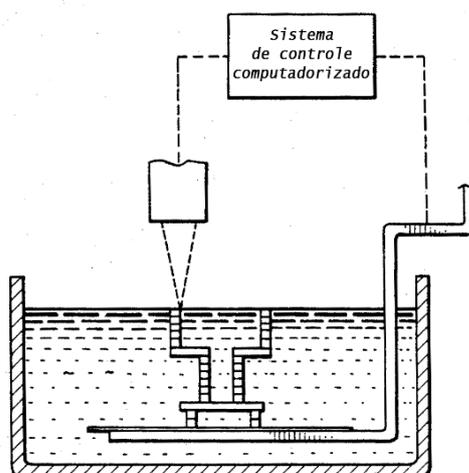
uma resina foto polimerizável, também em camadas construídas sucessivamente para a fabricação de um modelo destinado a fundição.

Segundo Volpato (2007), Ciraud também em 1972 propõe um sistema que se utiliza de um determinado material em pó, que é fundido através da exposição a feixes de laser ou plasma, essas partículas de pó são depositadas por gravidade ou força eletrostática, em uma plataforma que se abaixa a cada camada fabricada.

A construção de corpos sólidos de geometria complexa foi verificada por DiMatteo (1974) que, comparando esta técnica com as anteriores, observou a capacidade de se obter peças muito mais complexas do que as até então possíveis. Até que em 1979 uma técnica de fabricação por camadas foi aplicada na construção de moldes de injeção, através da laminação de chapas por Takeo Nakagawa.

Depois em 1982, a 3M desenvolve um sistema onde um feixe ultravioleta controlado por computador, que se movimentava nos eixos X e Y para seletivamente, polimerizar camadas sucessivas de um líquido foto-polimerizável.

A primeira aplicação comercial da tecnologia de impressão 3D surge em 1987 pela empresa 3D Systems, Figura 7, que desenvolve um sistema que utilizava uma resina fotossensível que era solidificada ao ser exposta a uma luz ultravioleta, chamada de estereolitografia ou *Stereolitografy Apparatus (SLA)* (TAKAGAKI, 2012).



**Figura 7 - Ilustração da patente do método de Hull**  
**Fonte: (HULL, 1984)**

A partir deste ponto as tecnologias e seus métodos construtivos vem sendo desenvolvidos e diversificados, com o emprego de um maior número e mais refinados processos, bem como materiais sofisticados.

As camadas construtivas são o princípio básico da impressão 3D, pois ela consiste na fabricação de uma peça a partir da deposição de um determinado material em camadas sobrepostas repetidas vezes até que se tenha a peça completa (TAKAGAKI, 2012).

O conceito chave que permite a fabricação de uma de uma peça neste tipo de sistema é a utilização das camadas como seções bidimensionais (2D) de um modelo tridimensional (3D), Figura 8. Praticamente todos os sistemas comerciais usam este conceito como forma de trabalho (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010).

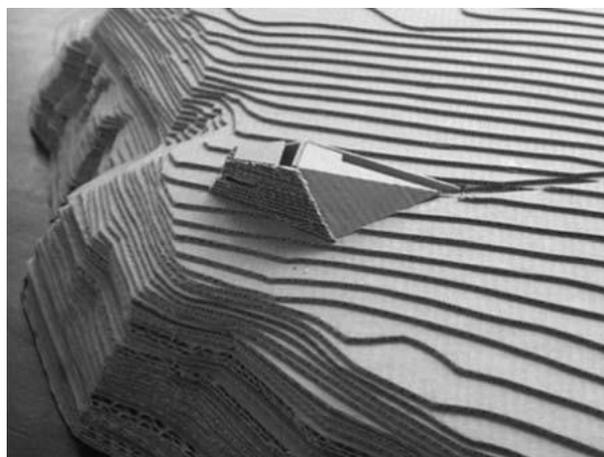


**Figura 8 - Imagem de uma xícara mostrando as camadas construtivas**  
**Fonte: (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010)**

Ao contrário do que muitos possam pensar e, apesar de ser uma tecnologia muito recente, os principais conceitos aplicados na tecnologia de impressão 3D, a construção em camadas e a deposição seletiva dos materiais, não foram desenvolvidos recentemente e remontam a aplicações bem antigas como pode ser observado na linha do tempo de patentes relacionadas à tecnologia.

O conceito da utilização de seções bidimensionais simples para a construção de objetos tridimensionais mais complexos não é novidade e já é utilizado em muitas aplicações. A mais

conhecida é na cartografia, que a partir das curvas de nível<sup>2</sup> criam-se os contornos das seções, que são empilhadas para formar a representação do relevo de regiões geográficas, conforme visto na Figura 9.



**Figura 9 - Modelo arquitetônico ilustrando a utilização das camadas construtivas**  
**Fonte: (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010)**

Outro exemplo para a abordagem da construção em camadas é na construção civil, ela o aplica desde seus primórdios, fato que pode ser observado nas pirâmides do Egito ou da América do Sul, e que deixa clara a abordagem construtiva por camadas.

Todas as técnicas e processos desenvolvidos ao longo da história da impressão 3D ainda continuam sendo progressivamente aprimorados, como a tecnologia de modelagem por deposição de material fundido, *fused deposition modeling* (FDM), que consiste na extrusão de um filamento plástico na composição da peça e a sinterização por laser seletivo, *Selective Laser Sintering* (SLS), que utiliza o calor de um laser para sinterizar vários tipos de pó.

Estas são as técnicas mais populares atualmente e, especificamente a FDM, vem promovendo uma grande popularização da impressão 3D por ser rápida e ter materiais mais baratos em relação aos outros processos (TAKAGAKI, 2012).

No início da comercialização dos sistemas de impressão 3D, estes foram basicamente utilizados nas etapas do desenvolvimento de produtos, principalmente em estudos, com o objetivo de aumentar a confiabilidade das decisões tomadas durante o processo de

---

<sup>2</sup> Curvas de nível são linhas imaginárias que unem todos os pontos de igual altitude de uma região a ser representada (SAMPAIO, 2005).

desenvolvimento. Em seguida começaram a ser empregados com a finalidade de testes, na engenharia, análise e planejamento. E finalmente na fabricação de ferramental, para testes, avaliação e melhorias de nos processos produtivos convencionais e, por último diretamente na produção de bens acabados para o mercado (VOLPATO, 2007).

No campo do design a tecnologia foi aplicada pela primeira vez com a função de confeccionar modelos e protótipos, devido ao ganho de tempo e velocidade na construção de modelos funcionais em relação aos tradicionalmente feitos à mão, hoje ela se encontra consolidada como ferramenta do processo de desenvolvimento de produtos (DIMITROV, SCHREVE e DE BEER, 2006).

Apesar do ganho conseguido com a utilização dessa tecnologia, inicialmente ela não causou grandes mudanças no processo de desenvolvimento de produtos, apenas melhorias incrementais que potencializaram a etapa de construção de modelos e testes. Agora, contudo, a tecnologia vem impactando o design de forma mais direta, pois ao ser empregada como ferramenta de fabricação de produtos, passa a ser o veículo pelo qual se projeta e se produz, aproximando assim essas duas extremidades dos processos produtivos.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2010), os modelos eram aplicados com três objetivos, chamados de “3 Fs” (*Form, Fit and Function*) (Forma, ajuste e função), na apreciação da forma e aspectos gerais o design do produto (Forma), no aprimoramento da precisão dos processos para adequação das tolerâncias de montagem dos componentes (Ajuste), e no desenvolvimento das propriedades dos materiais para que as peças pudessem ser manuseadas e expostas às condições de uso (Função). A impressão 3D ainda vem sendo utilizada no desenvolvimento de produtos, podendo criar uma cadeia de processos com o objetivo principal de reduzir o tempo e os custos inerentes aos processos de desenvolvimento.

### **2.1.2. Impressão 3D dentre os Processos de Transformação**

Os princípios para a fabricação de uma determinada peça podem ser classificados quanto à intenção da transformação, podendo ser subtração, conformação e adição de material.

Os processos de subtração são aqueles em que se parte de um bloco e vai se removendo material progressivamente até que se obtenha a peça desejada, como o torneamento, fresamento, furação, retífica, eletroerosão, usinagem química, eletroquímica, dentre outros.

Já nos processos de conformação, também se parte de um determinado formato, chegando-se à forma final da peça através da deformação plástica deste material, como nos processos de forjamento, conformação e estampagem de chapas, forjamento, laminação, metalurgia do pó, etc.

Na adição, geralmente o material é fundido e forçado dentro ou passado por um molde com a forma final da peça, como a fundição de metais em moldes permanentes ou não, moldagem por injeção de plástico, extrusão, etc.

Estas classificações citadas podem ser entendidas como a intenção da transformação, contudo, independente que seja subtração, conformação ou adição, existem os meios para que a transformação aconteça.

Segundo Volpato (2007), estes meios podem ser mecânicos, térmicos, químicos e elétricos, então podemos associar estas duas dimensões e organizando-as conforme a mostrado na Tabela 1.

	<b>Subtração</b>	<b>Conformação</b>	<b>Adição</b>
<b>Mecânico</b>	Fresamento Retífica Torneamento	Estampagem Laminação a frio	Cravamento Rebitamento
<b>Térmico</b>		Laminação a quente Forjamento	Soldagem Brasagem Injeção
<b>Químico</b>	Corrosão por soluções ácidas ou alcalinas		Colagem
<b>Elétrico</b>	Eletrocorrosão		Eletrodeposição

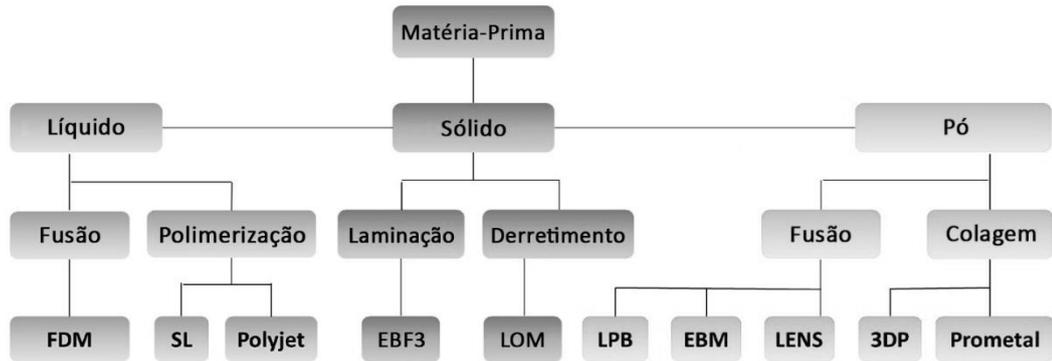
**Tabela 1 - Exemplos de classificação de alguns processos de transformação**  
**Fonte: Elaborada pelo autor com base em (VOLPATO, 2007)**

Neste sentido, a impressão tridimensional pode ser classificada como um processo de adição de material pela sua característica básica de depositar o material construtivo em camadas sucessivas.

Assim, como na tabela apresentada, a impressão 3D também pode ter seus meios, ou processos, classificados. Muitas tentativas vêm sendo feitas, uma delas é a partir do estado bruto da matéria prima base a ser carregada na máquina para a fabricação das peças (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010).

- Sistemas com Polímeros Líquidos: este tipo de líquido foi o utilizado no primeiro sistema comercial, a estereolitografia, e, apesar de existirem diversas formas de transformação, a mais empregada é a catalisação por uma luz, então nestes casos o material precisa ser um foto-polímero líquido.
- Sistemas com Partículas: utilizam o material construtivo em forma de pó, quanto mais fino esse pó, mais uniforme será a peça, contudo se for fino demais, problema em sua dispersão e distribuição começam a aparecer. A forma de transformação mais comum é uma fusão controlada e uniforme por um feixe de laser.
- Sistemas com Material Fundido: nestes sistemas os estados iniciais dos materiais podem ser vários, o mais comum é em forma de rolos de fios, o mais comum são os termoplásticos, que são transformados através de sua fusão em uma câmara quente, para então serem depositados por um bico extrusor.

A Figura 10 mostra uma classificação das técnicas de manufatura aditiva baseadas no tipo de materiais utilizados agrupados pelo estado da matéria prima.



LEGENDA:  
 LOM: Manufatura por Laminação de Objeto  
 EBF3: Fabricação Livre por Feixe de Eletrons  
 FDM: Modelagem por Deposição de Material Fundido  
 SL: Estereolitografia  
 3DP: Impressão 3D  
 LPB: Cama de Pó com Laser  
 EBM: Derretimento por Feixe de Eletrons  
 LENS: Modelagem por Laser de Engenharia

**Figura 10 - Classificação das técnicas de Manufatura Aditiva baseadas no tipo de matéria-prima**  
 Fonte: (ZHAI, LADOS e LAGOY, 2014)

Este tipo de classificação pode gerar o agrupamento de processos que aparentemente são muito distintos e também separar outros que produzem resultados muito similares. Por causa deste problema, algumas tentativas de aprimorar a classificação foram tentadas, conforme proposto por Pham e Gault (1998) e visto na Tabela 2.

	1 Canal	2 Canais	Arranjo de Canais em 1 dimensão	Arranjo de Canais em 2 dimensões
Polímero Líquido	SLA (3D Sys)	Dual beam SLA (3D Sys)	Objet	Envisiontech MicroTEC
Partículas	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	LST (EOS)	3D Printing	DPS
Material Fundido	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Lâminas Sólidas	Sólido PLT (KIRA)			

**Tabela 2 - Classificação de processos de impressão 3D por tipo de material e canais de adição.**  
 Fonte: (PHAM e GAULT, 1998)

Esta tabela mostra um agrupamento dos processos de impressão 3D combinando os materiais construtivos com a quantidade de canais de adição. Nela são citadas as siglas dos processos mais comuns junto com o fabricante, como SLA, da 3D Systems, Objet e Envisiontech, divisão que fica muito específica e praticamente enquadrando o equipamento do fabricante, e não um grupo com equipamentos diferentes de fabricantes diferentes com características similares.

No entanto, a mais popular forma de classificação é conforme o meio pelo qual a transformação ocorre, como laser, impressão, extrusão, etc. Segundo Wohlers (2012, p. 4), a norma ASTM<sup>3</sup> aprovou os termos para uma definição dos processos de fabricação da impressão tridimensional por adição de material conforme segue:

- Extrusão de material - processo de fabricação aditiva no qual o material é seletivamente depositado através da extrusão por um bico ou orifício, geralmente o material utilizado neste processo é algum tipo de termoplástico;
- Jato de material - processo de fabricação aditiva no qual gotículas do material construtivo são seletivamente depositadas e curadas com uma luz ultravioleta, neste caso o material é uma resina líquida;
- Jato colante - processo de fabricação aditiva no qual um agente líquido colante é seletivamente depositado para juntar materiais em pó, podendo-se utilizar diversos tipos de pó bem como também existem variações na resina aglutinante;
- Laminação em folhas - processo de fabricação aditiva no qual folhas de um determinado material, como por exemplo algum tipo de polímero, que são coladas para formar um objeto, como no caso anterior, este processo cria um material compósito, formado pela lâmina do material construtivo mais a cola;
- Polimerização em tanque - processo de fabricação aditiva no qual um polímero líquido em um recipiente é seletivamente curado por uma luz polimerizadora, para tanto se utiliza uma resina líquida foto-curável;
- Fusão em cama de pó - processo de fabricação aditiva no qual uma energia térmica funde seletivamente regiões de uma cama de material em pó, podendo-se também

---

<sup>3</sup> ASTM é a sigla para *American Society for Testing and Materials* ou Associação Americana para testes e materiais, comitê de desenvolvimento e entrega de normas de consenso internacional (ASTM, 1996).

utilizar diferentes tipos de pó, como por exemplo, de polímeros, metais, minerais, dentre outros;

- Deposição por energia dirigida - processo de fabricação aditiva no qual uma energia térmica focada é utilizada para fundir materiais pelo derretimento conforme o material em pó vai sendo depositado, aqui também existem muitos tipos diferentes de pó, especialmente ligas metálicas.

Cada um dos termos definidos para classificação das tecnologias citadas determina apenas os princípios básicos dos materiais e processos utilizados pelas impressoras, para cada processo citado, existem inúmeras variações, delineando um universo muito mais amplo do que esta listagem, além do constante desenvolvimento de novos materiais e processos que vem aumentando drasticamente, impulsionado pela popularização e disseminação da tecnologia nos últimos tempos.

Outro ponto que ainda vem sendo aprimorado é a terminologia para nomear este novo tipo de tecnologia produtiva. Muitos termos já foram utilizados nesta intenção, e seguem as mais comuns conforme levantamento de Gibson, Rosen e Stucker (2010).

- *Automated Fabrication (Autofab)* ou Fabricação Automatizada: enfatiza a automação na fabricação de produtos, ou seja, diminuição ou remoção de tarefas manuais dos processos produtivos. Porém outras tecnologias como a usinagem por controle numérico computadorizado ou CNC, também tem essa abordagem automatizada.
- *Solid Freeform Fabrication* ou Fabricação Sólida de Forma Livre: aqui a referência está capacidade de fabricação de geometrias complexas sem afetar os processos produtivos, ou seja, na liberdade formal sem impactar em custos.
- *Additive Manufacturing* ou Manufatura Aditiva e *Layer-based Manufacturing* ou Manufatura baseada em camadas: aqui as referências são respectivamente à adição de material e a construção em camadas.
- *Rapid Prototyping (RP)* ou Prototipagem Rápida: termo muito popularizado e ainda muito usado em função do objetivo que motivou a criação da tecnologia, ela foi desenvolvida para substituir, a prototipagem, fase demorada, cara e trabalhosa do processo de desenvolvimento de produtos.

- *Stereolithography* (SL) ou Estereolitografia: termo utilizado pela empresa 3D Systems para batizar o primeiro equipamento disponível comercialmente, e como este sistema foi o pioneiro, seu nome foi bastante popularizado.
- *3D Printing* ou Impressão 3D: termo utilizado pelos pesquisadores do MIT, para nomear a tecnologia desenvolvida, esta tinha como base os princípios das impressoras por jato de tinta, porém em vez de imprimirem gráficos em papel, construíam peças volumétricas.

Os três últimos termos apresentados foram os mais comuns dentre todos os já mencionados, ainda podemos observar muitas publicações utilizando-os com frequência, no entanto, o termo prototipagem rápida já vem sendo considerado inadequado por fazer alusão apenas à etapa de construção de protótipos, pois constantes aprimoramentos vêm permitindo que as peças fabricadas possam ser utilizadas como produtos acabados.

O termo estereolitografia, da mesma maneira, não representa mais toda gama de processos existentes, pois está diretamente ligado à tecnologia para o qual foi designado e, atualmente é entendido apenas como um dos inúmeros processos. Já o termo Impressão 3D foi o que mais se popularizou talvez pela analogia que pode ser feita com as impressoras gráficas domésticas, tornando-o de fácil assimilação e adequado para a comunicação.

Contudo o comitê ASTM esteve debatendo sobre qual nomenclatura deveria ser empregada, e recentemente chegou-se a um consenso na utilização da sigla AM “*Additive Manufacturing*” ou Manufatura Aditiva e ela, desde então, vem ganhando espaço nas publicações (WOHLERS, 2012).

### **2.1.3. Princípios Básicos da Manufatura aditiva**

O conceito básico da manufatura aditiva é a fabricação através da adição de camadas sucessivamente depositadas através de um equipamento automatizado onde a intervenção humana é muito pequena ou até inexistente.

Um ponto comum a todas as tecnologias é a fabricação partindo de um modelo geométrico tridimensional virtual, seja ele construído manualmente através de um software específico para esta finalidade ou então capturado de um objeto já existente com o auxílio de um *scanner*, ou utilizando os dois meios combinados.

A geometria então é enviada para um software específico que a interpreta e a divide em seções muito finas que servem de referência para a determinação dos parâmetros de construção da peça, esta parte do processo pode ser feita de forma automática através dos parâmetros pré-estabelecidos de um software ou com a definição manual dos parâmetros.

A impressora então executa o trabalho de forma automatizada, adicionando camada por camada, sucessivamente, conforme os parâmetros construtivos determinados anteriormente, até que a peça esteja terminada.

O processo geral de impressão tridimensional, conforme demonstrado na Figura 11, possui as etapas comuns a todas variantes, tendo como ponto de partida um modelo virtual de uma peça a ser materializada, não importando qual máquina se utiliza para a construção (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010).



**Figura 11 - Processos gerais da manufatura aditiva**  
Fonte: (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010, p. 4)

- Etapa 1: Criação da geometria

É a etapa na qual os dados da geometria do objeto são gerados no meio virtual. Essa geometria pode ser construída utilizando-se um software do tipo CAD (*Computer-aided Design*) ou obtida

através de um escâner 3D, aparelho capaz de digitalizar a forma tridimensional de um objeto físico.

- Etapa 2: Conversão de arquivo

Todo equipamento de manufatura aditiva consegue ler determinados formatos de arquivos contendo os dados da geometria a ser produzida. Após a primeira etapa este arquivo deve ser convertido para o formato de trabalho da impressora 3D. alguns formatos são muito populares, como o STL (*Stereolithography*), IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*), dentre outros.

- Etapa 3: Transferência para a máquina

O arquivo, previamente convertido para o formato de trabalho do equipamento, deve então ser transferido para a máquina, o que pode ser feito através de conexão direta, rede ou mesmo uma unidade de memória flash (*Pen drive*). Após a transferência é necessário que sejam observados se o tamanho, posição, e orientação de construção da peça estão corretos.

- Etapa 4: Configuração de trabalho

A impressora precisa ter seus parâmetros de trabalho ajustados para a adequada construção da peça, neste ponto são consideradas restrições de materiais, fonte de energia, espessura da camada, tempos, velocidades, etc.

- Etapa 5: Fabricação

Esta etapa geralmente é bastante automatizada e não requer muita supervisão do processo, apenas um monitoramento superficial para captar erros assim que aconteçam, como defeitos na geometria, funcionar sem material, dentre outros.

- Etapa 6: Remoção

Uma vez que a impressora terminou a construção, algumas partes precisam ser removidas. Isto requer uma interação com a máquina, portanto, é necessário que alguns cuidados tenham sido tomados na etapa de criação da geometria. Um exemplo é a construção de travamentos internos para garantir que não fiquem partes móveis ou pontos frágeis na peça.

- Etapa 7: Pós-processamento

Após ser removida da máquina, a peça pode requerer um trabalho de limpeza antes de estarem prontas para o uso, também podem ter suportes de material a serem removidos além de estar frágil, necessitando ainda de cuidados e habilidade manual

- Etapa 8: Aplicação

Apesar de estarem disponíveis para o uso, ainda pode ser necessário dar acabamento nas peças antes de estarem aceitáveis para o consumidor, por exemplo, aplicação de primer e pintura para melhorar o acabamento superficial. Estes processos de acabamento ou ajustes podem ser necessários quando houver encaixe entre duas peças ou mesmo em um conjunto mecânico ou eletrônico.

As tecnologias de impressão 3D apresentam muitas vantagens se comparadas com as técnicas tradicionais de fabricação. Muitos estudiosos a descrevem como sendo revolucionária no desenvolvimento de produtos e agora, especialmente na manufatura, alguns deles inclusive afirmam que a produção de bens da forma que conhecemos hoje pode mudar drasticamente se o caminho da manufatura aditiva for seguido.

Lipson e Kurman (2013), citam alguns benefícios proporcionados pelas tecnologias de impressão 3D

- Princípio 1: Liberdade na complexidade. A complexidade da forma da peça não impacta no custo.
- Princípio 2: Liberdade na variedade. Uma impressora 3D pode fabricar peças com formas diferentes pois não utiliza moldes.
- Princípio 3: Montagem não necessária. Impressoras 3D podem fabricar conjuntos de peças montadas.
- Princípio 4: Entrega imediata. Uma impressora 3D pode imprimir sobre demanda e próximo ao cliente.
- Princípio 5: Liberdade projetual. A impressão 3D é mais livre em termos de possibilidades formais e não tem tantas limitações técnicas para a fabricação de formas complexas como processos tradicionais.
- Princípio 6: Menos habilidade técnica. Impressão 3D requer menos conhecimento técnico e experiência que os processos de fabricação tradicionais.

- Princípio 7: Manufatura compacta. As impressoras 3D têm melhor capacidade produtiva por área, ocupando menos espaço que as máquinas tradicionais.
- Princípio 8: Menos desperdício. As impressoras tendem a produzir com menos desperdício que em alguns processos, especialmente aqueles onde a matéria prima vem em forma de lâminas e as peças são cortadas conforme planos de corte.
- Princípio 9: Mistura de materiais. Em alguns processos de impressão é possível fazer combinações de diferentes materiais.
- Princípio 10: Cópias precisas. Com a impressão 3D é possível replicar uma peça, indefinidamente sem perda de qualidade.

Outros processos produtivos requerem análises detalhadas da geometria da peça para a especificação de quais características podem ser reproduzidas, quais ferramentas e processos devem ser utilizados e quais elementos de fixação adicionais devem ser aplicados quando a peça precisa ser dividida em duas ou mais partes. Enquanto a manufatura aditiva necessita apenas do conhecimento de como a máquina trabalha, como o material é aplicado e alguns detalhes e dimensões da peça.

Segundo Anderson (2012), no futuro, a preparação e configuração para a fabricação da peça em um sistema de manufatura aditiva será otimizado, tendendo inclusive a ser completamente automatizado, tendência que pode ser observada no desenvolvimento das impressoras jato de tinta domésticas, onde hoje é necessário apenas desenvolver o texto ou arte e imprimir, sem nenhuma configuração complexa a ser feita.

Durante a fase de desenvolvimento do produto, pequenas mudanças no design podem gerar um aumento no tempo necessário para a fabricação pelos métodos convencionais. Se um modelador for requisitado a construir uma determinada peça seguindo um conjunto de desenhos, ele provavelmente planejará a construção da peça em vários estágios.

Isso acontece por que é preciso aplicar uma série de métodos construtivos, como o entalhamento a mão, técnicas de usinagem CNC, moldagem e conformação. Tarefas manuais geralmente são demoradas, difíceis, além de requererem muito cuidado e uma abordagem sequencial e previsão de fixações futuras, o que torna todo este processo muito suscetível a erros.

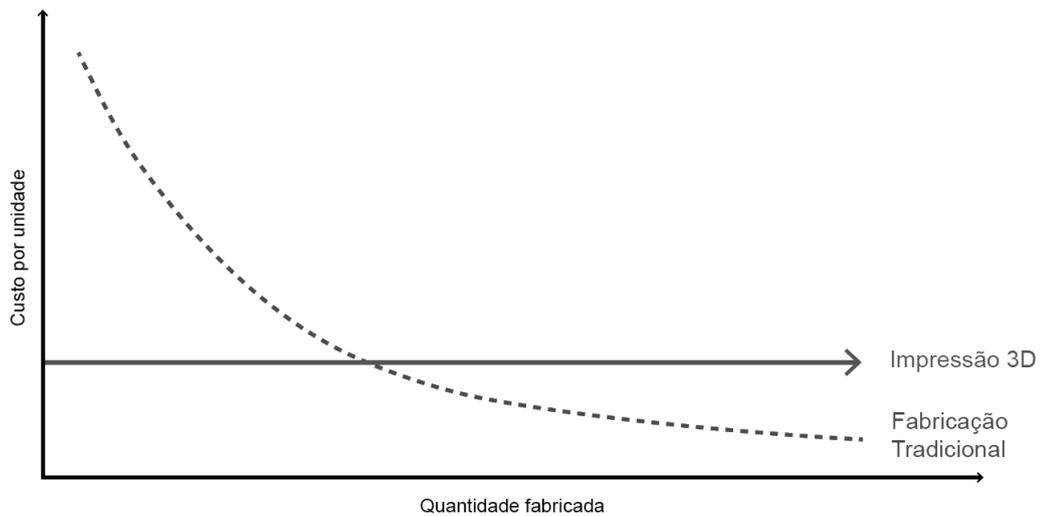
Gibson, Rosen e Stucker (2010) citam que outro ponto importante foi que o desenvolvimento dos softwares CAD proporcionou uma evolução nas interfaces de visualização, aproximando o que é visualizado na tela do que se pretende como resultado final, aumentando assim a capacidade de percepção e assertividade dos projetos, proporcionando o *“what you see is what you get”*, ou o que você vê é o que você tem. Agora, com o desenvolvimento da manufatura aditiva, estamos caminhando cada vez mais rápido para o próximo passo na atividade projetual, o *“what you see is what you build”*, ou o que você vê é o que você constrói. Dando o próximo passo para o que vai ser construído, ou seja, se antes o que você via era próximo da intenção de projeto, agora o que se vê é próximo do resultado final.

Desde o início da utilização dos computadores como ferramenta para auxiliar no projeto de novos produtos, a transição do meio físico para o virtual foi aos poucos sendo consolidada, e hoje, a completa transição para uma manufatura aditiva se mostra natural.

A aplicação da manufatura aditiva combinada com algumas técnicas como moldagem em borracha de silicone, polimento, etc. pode diversificar as possibilidades na criação de diferentes peças com diferentes características.

Como existe uma diminuição e simplificação nos processos, ela pode também ser mais previsível, antecipando os possíveis problemas, possibilitando modificações, bem como prever o tempo necessário para fabricar determinada peça ainda na fase de desenvolvimento do produto.

Na fase de produção, ao se utilizar processos tradicionais, geralmente é necessário um investimento inicial na construção de moldes ou gabaritos para a fabricação da peça, e esses investimentos são diluídos nas séries de produção, ou seja, quanto maior a série, menor será o impacto do investimento no custo unitário da peça. Na impressão 3D isso não acontece, pois independentemente da quantidade, as peças sempre terão o mesmo custo, pois não é necessário o desenvolvimento de moldes específicos para cada tipo de peça, Figura 12.



**Figura 12 - Volume de produção versus custos: Fabricação tradicional versus Impressão 3D**  
**Fonte: (GRYNOL, 2013)**

Além da simplificação dos processos, a manufatura aditiva também proporciona flexibilidade e variedade na fabricação, como as impressoras são automatizadas e não necessitam de gabaritos ou moldes, fica simples fabricar peças diferentes bastando apenas alterar a programação e, eventualmente, trocar o material. Assim, a fabricação em lotes para a redução das perdas com os ajustes (*setups*), necessários na maioria dos processos tradicionais de fabricação não são necessárias para a redução dos custos. Conforme citado por Anderson (2012, p. 101) “Variedade, complexidade e flexibilidade são de graça”.

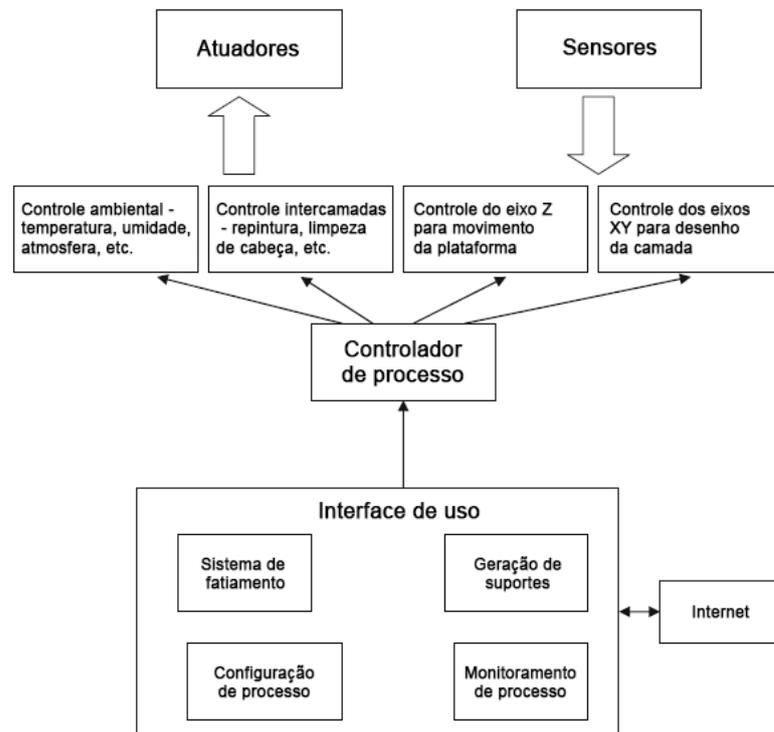
#### **2.1.4. Tecnologias Associadas - Sistemas de assistidos por computador**

Um dos pontos mais importantes para o desenvolvimento da manufatura aditiva foi sem dúvida o desenvolvimento da microinformática, a cada nova geração podemos observar avanços significativos na capacidade de processamento e armazenamento, com computadores cada vez mais rápidos, menores e mais leves que seus anteriores.

A chave para o desenvolvimento dos computadores como ferramentas de serviço está na capacidade de desempenhar tarefas em tempo real, mas principalmente mostra-los graficamente e não numericamente. Neste sentido a indústria de jogos teve um papel fundamental, pois foi a pioneira em muitos desenvolvimentos de tecnologia de computação gráfica com o objetivo de exibir gráficos com mais detalhes e de forma mais realística para incrementar a experiência de jogar (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010).

Estas características são aproveitadas pelas tecnologias AM, tanto nas máquinas como nos softwares, possibilitando assim a integração com as impressoras 3D, esquema visto na Figura 13:

- **Processamento:** os arquivos de dados das peças costumam ser muito grandes e requerem boa parte da capacidade de processamento na manipulação da geometria, na configuração de máquina para manufatura e no fatiamento antes da construção do modelo.
- **Gráficos:** as máquinas não necessitam de grande capacidade de processamento de gráficos, exceto no momento do posicionamento da geometria dentro do espaço virtual de construção, contudo todas elas se beneficiam de uma boa interface gráfica e podem torna-la fácil de operar.
- **Controle de máquina:** as impressoras necessitam de precisão no posicionamento como os centros de usinagem CNC, fotocopiadoras de última geração ou impressoras a laser, e estes equipamentos necessitam de controladores que captam informações de sensores para determinar o posicionamento e outras funções de saída. Atualmente as máquinas possuem controladores específicos para realizar estas funções e o computador será então utilizado para acompanhar a comunicação e a forma que os controladores trabalham trocando os dados para a fabricação da peça.
- **Rede:** os sistemas pioneiros necessitavam que o arquivo de dados fosse transferido para a máquina através de um disco ou de fitas, no entanto hoje em dia eles são enviados utilizando uma conexão de rede ou via internet.
- **Integração:** o computador é o componente central que une os diferentes processos realizados na manufatura aditiva, seu propósito é manter a comunicação com as outras partes do sistema, para processar os dados e enviá-los a outras partes.



**Figura 13 - Esquema geral de integração de uma impressora 3D**  
 Fonte: (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010, p. 19)

A aplicação dos recursos digitais em campos específicos do desenvolvimento de produtos gerou grupos de ferramentas com objetivos que vão desde auxiliar a definição formal do objeto projetado como as ferramentas CAD e as de Engenharia Reversa, até diversas outras para Engenharia e Manufatura.

#### 2.1.4.1. *Computer-aided Design (Design auxiliado por computador)*

Os sistemas de projeto auxiliado por computador, ou *Computer-aided Design (CAD)*, estão hoje disponíveis para o auxílio no projeto de grandes edifícios até pequenos produtos, elas também se especializaram conforme o tipo de projeto a ser realizado como produto, elétrico, térmico, dentre outros. Para tanto eles possuem regras associadas à especificidade do segmento, que permitem ao usuário focar no projeto e na funcionalidade sem se preocupar muito como será o funcionamento, permitindo trabalhar pequenas características de grandes projetos, organizando-os como sistemas e subsistemas se integram com o restante, e mantendo a integridade dos dados.

A maior parte dos sistemas de manufatura aditiva utiliza arquivos vindos de softwares CAD de modelagem, porém nem todos os estes softwares são capazes de gerar arquivos de saída

compatíveis com processos de fabricação baseados em camadas. Como as máquinas AM reproduzem formas tridimensionais, os melhores sistemas CAD são aqueles que geram tais geometrias de modo mais preciso e efetivo.

A maioria dos sistemas CAD atuais pode funcionar em um computador pessoal, fruto do desenvolvimento de hardware dos últimos tempos que também resultou em modificações na forma como os dados desses sistemas são apresentados, manipulados e armazenados.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2010), as tecnologias CAD se desenvolveram rapidamente seguindo algumas linhas guia:

- Realismo: com a aplicação de luz e efeitos de sombra e outras técnicas realísticas para a produção de imagens, se tornou possível gerar imagens a partir de modelos CAD que são difíceis de serem distinguidas das fotografias convencionais.
- Usabilidade e interface de uso: o desenvolvimento de interfaces gráficas de uso ou GUIs, sigla em inglês, incrementou drasticamente a forma de utilização do software, levando à manipulação dos modelos 3D diretamente em ambientes virtuais. As instruções são dadas através de menus de contexto ou interativos, o que permite a execução dos mesmos comandos de formas diferentes, conforme a preferência do usuário, promovendo um uso intuitivo e interativo, porém, o teclado ainda é requerido para a inserção de medidas e outras informações específicas.
- Conteúdo de engenharia: os softwares CAD vêm agregando cada vez mais ferramentas de engenharia em seu conteúdo, pois com a modelagem 3D sólida é possível calcular volumes e massas, investigar ajustes e tolerâncias e exportar os arquivos em formatos compatíveis com softwares de análise de elementos finitos ou FEA (*Finite Element Analysis*).
- Velocidade: os sistemas CAD são constantemente melhorados, especialmente no quesito velocidade de processamento e exibição dos dados, isso basicamente em função das melhorias de hardware e algumas de software, como o NURBS, por exemplo.
- Precisão: a precisão é um ponto muito importante e demanda muito tempo de processamento e memória.

- Complexidade: todas as características anteriores são componentes da complexidade encontrada neste tipo de sistema, é um desafio tratar todos estes pontos sem torná-lo inviável.

Empresas de software estão investindo em produtos com plataformas que permitam o trabalho em equipe, com ambientes altamente desenvolvidos, possibilitando trabalho entre equipes em partes diferentes do mundo, integrados através da internet.

Também pode-se observar uma popularização das ferramentas de modelagem 3D para não profissionais, voltados para o público em geral, que oferecem um método mais simples e intuitivo de modelar virtualmente.

Estes sistemas de modelagem geralmente trabalham com um método no qual os modelos são gerados a partir de formas simples que são combinadas de diferentes maneiras para se chegar a formas complexas. Este método funciona muito bem para a maioria dos produtos que conhecemos, porém, não é muito eficiente para formas menos usuais e mais complexas e, devemos lembrar que a maioria dos produtos de consumo são desenvolvidos mais por artistas e designers do que por engenheiros.

Exatamente aí se observa um problema, as limitações e restrições que alguns softwares de CAD geram nos processos criativos deixando uma lacuna para softwares que deem mais liberdade formal. Muitos destes softwares estão utilizando o padrão NURBS (*Non-Uniform Rational Basis-Splines*) ou baseado em Splines Racionais não uniformes, um padrão que dá mais liberdade no desenvolvimento de geometrias complexas pela definição de curvas e superfícies orgânicas com fácil manipulação da forma e sem tornar os arquivos grandes e pesados.

No entanto, outras tentativas de melhorar a iteração com o modelo virtual vêm sendo trabalhadas, como os sistemas de modelagem com tecnologias *haptic*<sup>4</sup> que buscam oferecer uma maneira de modelar mais intuitiva que através dos sistemas de interação padrão (*mouses*). Geralmente são utilizados dispositivos com sistemas robotizados para dar um

---

<sup>4</sup> Tecnologias *Haptic* são aquelas focadas em gerar interfaces de uso baseadas no sentido do tato (GEOMATIC, 2014).

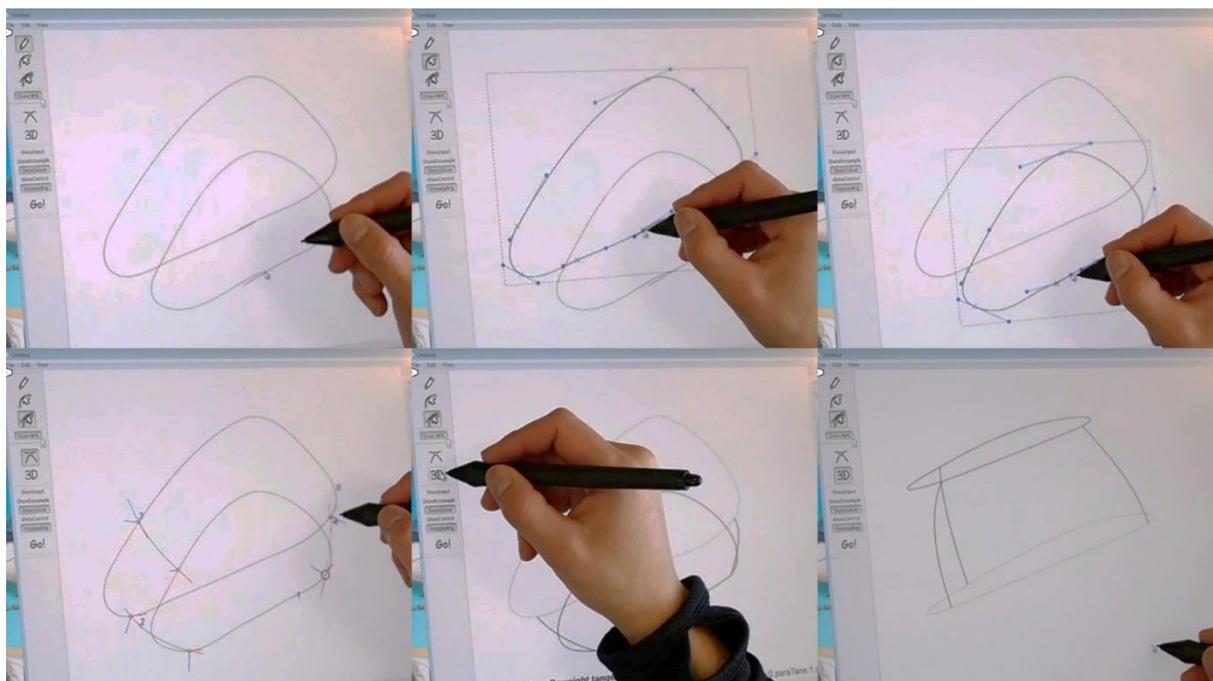
retorno tátil em relação ao ambiente virtual de modelagem, o objeto pode ser visto na tela, porém também pode ser sentido em um espaço 3D utilizando este sistema, Figura 14.



**Figura 14 - Dispositivo de interface de modelagem Geomatic Touch**  
**Fonte: (GEOMATIC, 2014)**

O sistema também é conhecido como “Argila virtual”, pois funciona com uma argila que se deforma ao aplicar uma força através do cursor, promovendo uma interação direta com o virtual, aproximando a experiência de modelagem da forma como um escultor interage com a argila. As peças geradas neste tipo de sistema são geralmente muito mais orgânicas e com superfícies de formas livres que podem ser incorporadas em produtos utilizando ferramentas CAD adicionais.

Nota-se uma diversificação e evolução das ferramentas computadorizadas de auxílio ao projeto. Com o objetivo de melhorar a atividade projetual no contexto digital estas ferramentas têm se tornado mais complexas com a intenção de simplificar e humanizar a interação com o designer. Um bom exemplo é a ferramenta True2Form, demonstrada por Xu et al (2014), na qual um algoritmo interpreta o desenho bidimensional em perspectiva e o converte automaticamente em uma forma tridimensional. É necessário apenas fazer um desenho em perspectiva com algumas linhas da superfície da peça que se quer modelar, indicar algumas restrições de geometria e o aplicativo gera automaticamente a forma tridimensional conforme pode ser visto na Figura 15.



**Figura 15 - Sequência de imagens de vídeo demonstrativo de modelagem no aplicativo True2Form**  
**Fonte: (XU, et al., 2014)**

Atualmente existem diversos softwares com diferentes princípios de concepção para auxiliar na modelagem virtual do objeto, no entanto, a maioria deles pode não ser indicada para as fases onde é necessário fazer uma exploração da forma do produto, pois eles não conseguem competir com a dinâmica e velocidade do desenho a mão livre, ainda o principal meio de gerar possibilidades de solução com rapidez.

Estes softwares geralmente demandam habilidades específicas para sua operação, muitas vezes exigindo treinamento para que o usuário se adapte e possa explorar suas capacidades, e mesmo com todo treinamento, habilidade e dispositivos que auxiliam em uma modelagem mais intuitiva, são mais indicados para estágios mais avançados do refinamento da forma do produto, quando já se definiu uma intenção para a geometria do objeto.

Contudo este tipo de aplicativo vem sendo constantemente desenvolvido e melhorias que o aproximam do desenho tradicional já podem ser vistas, e este caminho nos leva a imaginar que em breve haverá uma equiparação entre os dois meios de geração de soluções.

#### 2.1.4.2. *Reverse Engineering (Engenharia Reversa)*

O processo de engenharia reversa (ER), consiste na digitalização da geometria de um determinado objeto, geralmente feita através de escâner de luz que captura imagens do objeto e as interpreta para gerar os dados que serão utilizados na construção da forma digital.

Em geral, estes dados são inicialmente dispostos como uma nuvem de pontos, ou seja, pontos não conectados que representam a superfície do objeto. Estes pontos precisam ser trabalhados em softwares que os conectem, unindo nuvens de diferentes escaneamentos para formar a superfície completa da peça.

Em muitos casos essa superfície não pode ser completada, como em superfícies superpostas que não permitem o escaneamento ou de características internas onde a luz não chega, gerando uma representação imperfeita do objeto escaneado que precisa ser completada posteriormente.

As tecnologias mais utilizadas na captura da geometria de peças são o escaneamento por laser ou luz branca e o touch-probe<sup>5</sup> e, a tomografia computadorizada em objetos que tenham formas complexas internas ou modelos anatômicos. Este tipo de captura de imagens inicialmente desenvolvido para aplicações médicas, agora se encontra disponível também para escaneamento de objetos produzidos industrialmente.

A tomografia computadorizada tem um funcionamento similar às tecnologias de AM, pois seu funcionamento se baseia no escaneamento de sucessivas seções do objeto que são organizadas por intermédio de um software que também identifica os limites das seções para definir a superfície do objeto. Neste método os detalhes internos podem ser capturados e, após digitalizada, a AM pode ser utilizada para reproduzir o que foi obtido, funcionando como uma copiadora. Estes dados podem ser alterados antes da impressão, criando formas mais complexas e livres, um bom exemplo deste tipo de uso são implantes personalizados a partir de dados digitalizados de um paciente que são empregados na fabricação do implante.

---

<sup>5</sup> *Touch-probe* é um tipo de tecnologia utilizada na digitalização de objetos tridimensionais através de uma ponta que capta as coordenadas espaciais pontos da superfície do objeto criando uma nuvem de pontos.

As tecnologias de Engenharia Reversa são uma importante ferramenta para o design, pois além de simplificar a modelagem de um objeto complexo que se quer reproduzir, abre novas possibilidades para o design, como a captura e manipulação de formas naturais para gerar formas inéditas.

#### 2.1.4.3. *Computer-aided Engineering (Engenharia auxiliada por computador)*

As ferramentas CAD 3D são um recurso extremamente valioso para o design e desenvolvimento de produtos, a sua maior vantagem vem da facilidade de se fazer mudanças de forma ágil e barata. Se podemos manter a geometria da peça em formatos de dados digitais para boa parte do ciclo de desenvolvimento do produto, também podemos garantir que quaisquer modificações de projeto sejam realizadas virtualmente, em vez de fisicamente no próprio produto.

As peças modeladas nos sistemas CAD podem ser, por exemplo, submetidas à softwares de análise de elementos finitos, ou seja, programas que fazem uma simulação dos esforços que as peças sofrerão durante o uso ou até mesmo durante a fabricação. Existe uma série de simulações disponíveis, dentre elas as mais comuns são as de esforços, estresse, fluxo e outras propriedades mecânicas.

Ou seja, podemos saber como será o desempenho do produto antes de construí-lo, antecipando problemas que só seriam descobertos em fases avançadas do desenvolvimento quando fossem prototipados. Assim estas ferramentas garantem mais eficiência e diminuem o tempo de lançamento do produto, reduzindo também os custos envolvidos, que poderiam ser muito mais altos sem o uso de tais recursos.

As ferramentas de Auxílio na Engenharia, vem permitindo no universo do design, análises antes restritas às engenharias, aproximando conhecimentos anteriormente tratados em momentos distintos do desenvolvimento, e possibilitando novas considerações no design do objeto, além de propiciar uma maior interação entre estes campos, aumentar a confiabilidade e diminuir os riscos do projeto.

#### 2.1.4.4. *Computer-aided Manufacturing (manufatura auxiliada por computador)*

As ferramentas CAD não poderiam ter se desenvolvido tão rápido se não fosse pelas demandas geradas pelas ferramentas CAM “*Computer-Aided Manufacture*”, manufatura auxiliada por computador, elas são o canal de conversão das geometrias virtuais em produtos físicos.

Os sistemas CAM são sistemas computadorizados com o objetivo de auxiliar a manufatura de objetos através da conversão das informações da peça em códigos numéricos utilizados nas máquinas com sistema CNC, ou *Computer Numeric Control*, ou Controle numérico computadorizado e, seu principal objetivo é atingir um alto nível de precisão e consistência, dificilmente conseguidos quando operados por pessoas.

Eles estão muito ligados à automação industrial, atualmente em níveis muito elevados de integração conseguidos com o desenvolvimento da robótica, podendo ser desde automações básicas até avançadas, como por exemplo o controle da fabricação em tempo real, ou a integração com outros sistemas como a geração de pedidos de insumos.

Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2010), algumas características dos sistemas CAM são:

- **Maior precisão:** um software é utilizado para criar as instruções de fabricação precisas e detalhadas. Tanto estes softwares e as máquinas que utilizam controles numéricos trabalham com medidas precisas, e como resultado o processo pode ser repetido inúmeras vezes exatamente da mesma maneira com as mesmas especificações. Resultando em alta qualidade e uniformidade das peças e dos produtos. Tal precisão é impossível com ferramentas manuais ou controladas por pessoas.
- **Gestão de recursos:** alguns sistemas CAM também podem fazer uma gestão dos pedidos de materiais e componentes aos fornecedores, bem como registrar a entrada de uma peça fabricado ou montada no estoque da empresa de forma automatizada, ajudando a garantir a existência de insumos para o processo de fabricação. Sistemas CAM também podem ser configurados para alertar sobre manutenções preventivas ou corretivas, reparos ou substituições.

- Facilidade de personalização: uma das grandes vantagens é a facilidade em modificar um determinado produto, pois a automação torna o processo de personalização fácil e simples, apenas alterando a programação da máquina para a execução de uma tarefa diferente, o que é muito mais dispendioso e de trabalho intensivo se não for automatizado e feito à mão.

As máquinas que trabalham com automação CAM aplicadas na manufatura criam uma perspectiva bastante diferente em relação à fabricação tradicional, aumentando o nível de flexibilidade e possibilitando a redução dos lotes de produção, aumento na variedade de peças, maior controle das variações com redução dos tempos de preparação e produção do lote, aumentando a confiabilidade dos processos.

A utilização dessas ferramentas também reforça o vínculo entre o design e a manufatura, vínculos estes que por vezes eram mais fracos simplesmente pelo fato das questões sobre definição da forma e as questões sobre manufatura serem abordadas em momentos distintos do projeto. De certa forma estas ferramentas aproximam o design do universo da manufatura, trazendo a possibilidade de abordar estas questões no momento da definição da forma.

### **2.1.5. Principais Sistemas de impressão tridimensional**

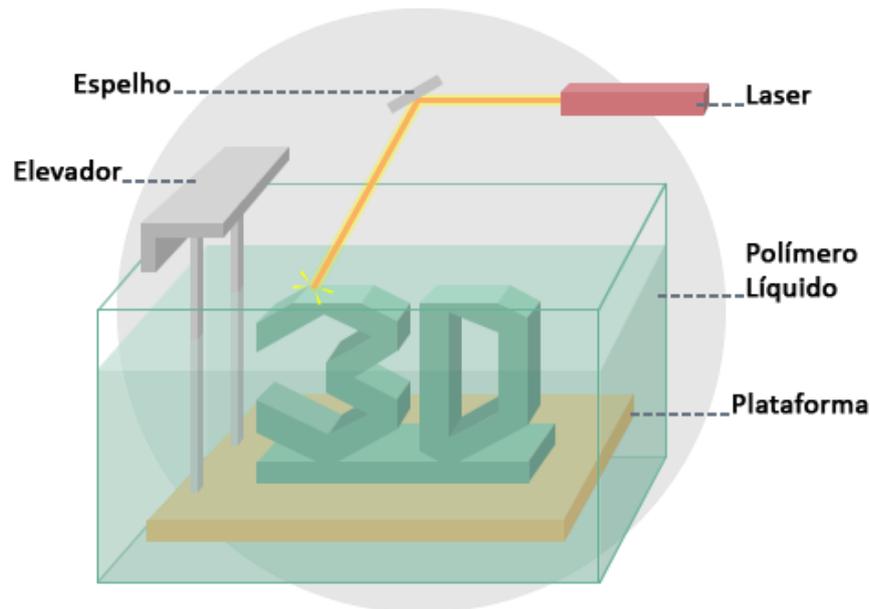
#### *2.1.5.1. Stereolithography (STL) - Estereolitografia*

Neste sistema um feixe de laser passa sobre a superfície de um foto-polímero líquido que é sensível à luz ultravioleta e endurece quando exposto a ela, conforme Figura 16. O feixe de laser vai percorrendo um caminho determinado e endurecendo a polímero. Após terminar uma camada, uma plataforma que suporta a peça, desce alguns décimos de milímetro para que o líquido do tanque cubra toda superfície recém criada, então o processo recomeça.

Após a impressão da peça, algum trabalho ainda precisa ser feito, como retirada de suportes de material<sup>6</sup>, e, dependendo do tipo de material, pode ser necessário completar sua cura em um forno com luz ultravioleta.

---

<sup>6</sup> Suportes são materiais depositados durante a impressão 3D de forma mais espaçada e frágil com o objetivo de sustentar o início da construção de partes da peça em balanço ou sem apoio (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2010).



**Figura 16 - Esquema geral do processo STL**  
**Fonte: (THRE3D, 2014)**

Existem uma impressora deste tipo que é mais rápida e precisa, construídas com o feixe de laser trabalhando de baixo para cima e a plataforma de sustentação vai subindo conforme as camadas vão sendo criadas. Múltiplos lasers podem trabalhar juntos para traçar o formato da peça em alta resolução<sup>7</sup>, até 10 micrometros, produzindo peças com as mais variadas propriedades para diversas aplicações.

Contudo, esta tecnologia só pode imprimir com um único tipo de material por peça, e os polímeros fotossensíveis utilizados ainda não são tão resistentes quanto aqueles usados industrialmente na injeção de plásticos. Também os custos e a complexidade na manutenção deste tipo de máquina ainda são muito expressivos para usuários domésticos, fator que está abrindo oportunidades no desenvolvimento de um mercado de modelos de baixo custo que utilizam lasers UV (LIPSON e KURMAN, 2013).

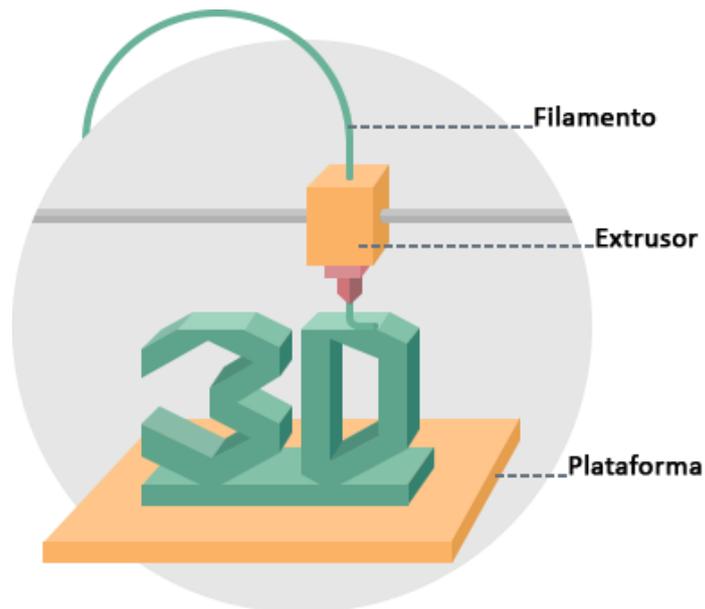
#### 2.1.5.2. *Fused Deposition Modeling (FDM) - Deposição por Material Fundido*

Processo no qual um determinado material em estado plástico, é seletivamente depositado em uma plataforma através de um bico extrusor, conforme Figura 17. Para depositar a camada

<sup>7</sup> Resolução da impressora é a quantidade de pontos de material depositados em um determinado volume, quanto maior a resolução, mais pontos por unidade de volume e maior a precisão, fidelidade e acabamento superficial da peça.

este bico vai depositando o material em todo o contorno da seção e, depois de terminado, passa a preencher o conteúdo do contorno, geralmente em movimentos de vai e vem.

Depois que a primeira camada é terminada, o bico sobe alguns décimos de milímetro e inicia a fabricação da segunda camada, e assim vai fazendo sucessivamente até que a peça esteja completa.



**Figura 17 - Esquema geral do processo FDM**  
**Fonte: (THRE3D, 2014)**

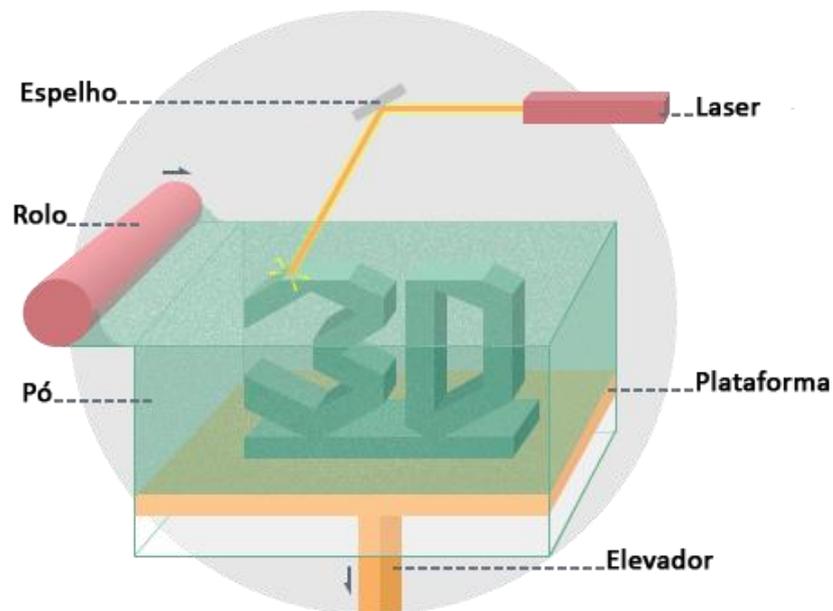
Uma grande vantagem deste método é a variedade de materiais compatíveis de serem aplicados, qualquer material em estado plástico, que possa ser comprimido por um bico para ser extrusado pode ser utilizado. O mais comum são filamentos de termoplásticos, tipo ABS, porém a gama é muito extensa, a impressão de comidas é um exemplo, como massa de biscoitos, de pão, pizza, queijos, chocolate, além da utilização em pesquisas médicas com a impressão de células vivas, chamada bio-impressão.

É a tecnologia mais popular encontrada no mercado e com os menores preços devido à sua simplicidade de funcionamento e componentes facilmente encontrados no mercado. Também é uma das tecnologias mais flexíveis quando se trata de diversidade de materiais, como já citado acima pode ser adaptada para inúmeras aplicações.

Tendo estas duas características como principais foi a primeira tecnologia popularmente comercializada no mercado e vem abrindo muitas possibilidades, com maior destaque para a utilização doméstica, uma das finalidades que promete criar uma ruptura na cadeia produtiva de vários segmentos de mercado, alguns sentindo mais outros menos esse impacto.

### 2.1.5.3. *Selective Laser Sintering (SLS) - Sinterização por Laser Seletivo*

Tecnologia inventada em 1980 por pesquisadores da universidade o Texas, ela direciona um feixe de laser de alta potência sobre uma superfície depositada com um pó, que é sinterizado formando uma camada sólida. Após a confecção de uma camada, um rolo com o material deposita uma nova camada de pó e assim sucessivamente até que a peça esteja terminada, Figura 18.



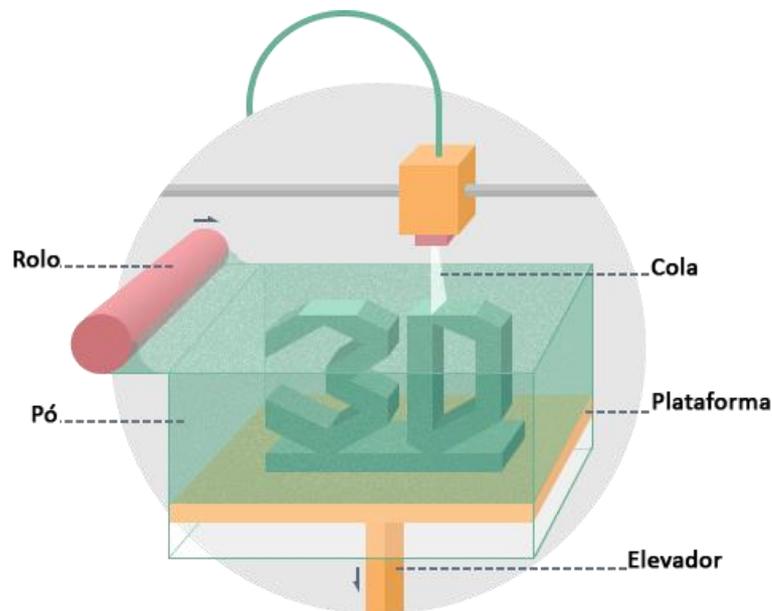
**Figura 18 - Esquema geral do processo SLS**  
Fonte: (THRE3D, 2014)

Existem algumas vantagens de se aplicar o laser sobre o pó em vez de líquidos, a principal delas é que o pó não fundido serve, naturalmente, como um suporte para os pontos em balanço na peça, também este pó não utilizado pode ser reaproveitado em futuros trabalhos. Outra expressiva vantagem é a variedade de materiais passíveis de serem utilizados nesta tecnologia, como termoplásticos, cerâmicos, borrachas e até metais, apesar de não ser possível misturar tipos diferentes em uma mesma peça. Por outro lado, a qualidade da superfície neste tipo de processo tende a ser porosa devido à matéria-prima base.

Muitas das máquinas SLS para metais ainda não são adequadas para o uso doméstico, pois precisam de uma câmara selada e preenchida com nitrogênio para que o oxigênio não reaja na fusão do material, outro ponto é que ele é um processo quente, na fabricação peças grandes pode ser necessário esperar até um dia para que se resfrie e possa ser retirada do seu interior, bem como alguns materiais oferecem o risco de explodir se trabalhados incorretamente (LIPSON e KURMAN, 2013).

#### 2.1.5.4. Three Dimensional Printing (3DP) - Impressão Tridimensional

Esta tecnologia foi desenvolvida nos anos 80 por pesquisadores do MIT, que posteriormente foi patenteada com este nome e teve sua fabricação licenciada a várias empresas. É um tipo de processo onde cabeças de impressão liberam jatos de um tipo de adesivo sobre uma camada de material em pó sobre uma plataforma, após o término da colagem de uma camada, a plataforma desce alguns décimos de milímetro e o sistema espalha mais pó para que seja novamente colado e assim sucessivamente até construir toda a peça, Figura 19.



**Figura 19 - Esquema geral do processo 3DP**  
Fonte: (THRE3D, 2014)

Uma grande vantagem dessa tecnologia é sua simplicidade, pois não usam lasers ou outros componentes que requerem alta demanda de energia para funcionarem. Com ela também é possível imprimir em cores, pois minúsculas gotas de tinta podem ser adicionadas durante o processo.

Por outro lado, o uso de adesivo líquido para aglutinar as partículas não é tão preciso como os lasers, deixando uma superfície porosa, parecida com areia. Outro ponto a ser destacado é que, como são utilizados, um material base, e outro aglutinador, o resultado é um material compósito, necessitando, de cuidados especiais no que se refere a reaproveitamento e reciclagem da matéria prima.

Diversos materiais em pó podem ser usados, desde alguns tipos amido, que deixam a superfície com aparência de areia, até outros como argila que dão um acabamento mais fino, porém dependendo do material, após a impressão é necessário ser sinterizado em um forno para endurecer e ganhar resistência. Já foram utilizados materiais como pó de vidro, pó de borracha, serragem e até pós de metais.

#### 2.1.5.5. Ink Jet Printing (IJP) - Impressão por Jato de Tinta

Uma das mais novas tecnologias de AM, desenvolvida em 2000 combina uma cabeça de impressão libera jatos de um polímero líquido em camadas muito finas catalisando-as com uma luz ultravioleta, Figura 20. Esta tecnologia proporciona rapidez e precisão, com camadas de 16 microns de espessura, sua precisão é ideal para aplicações industriais ou médicas, onde a alta resolução e velocidade podem ser importantes.

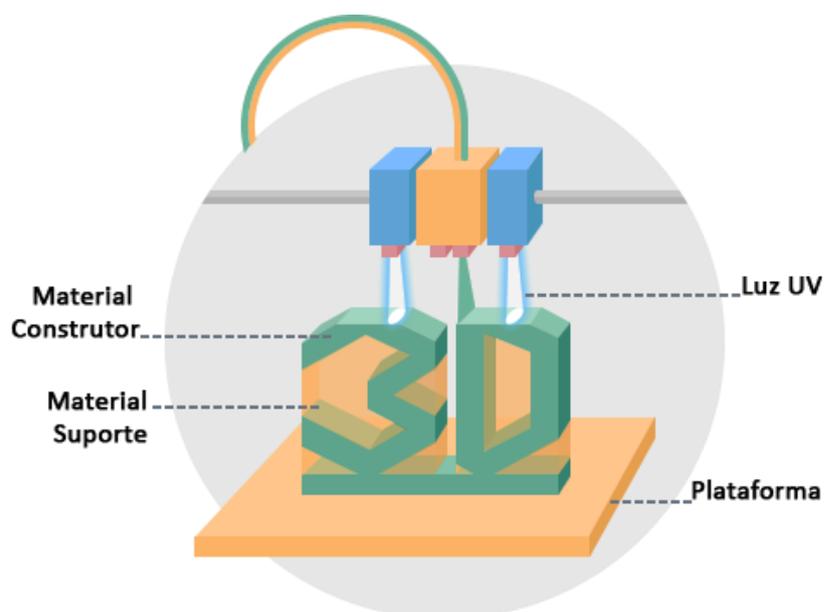
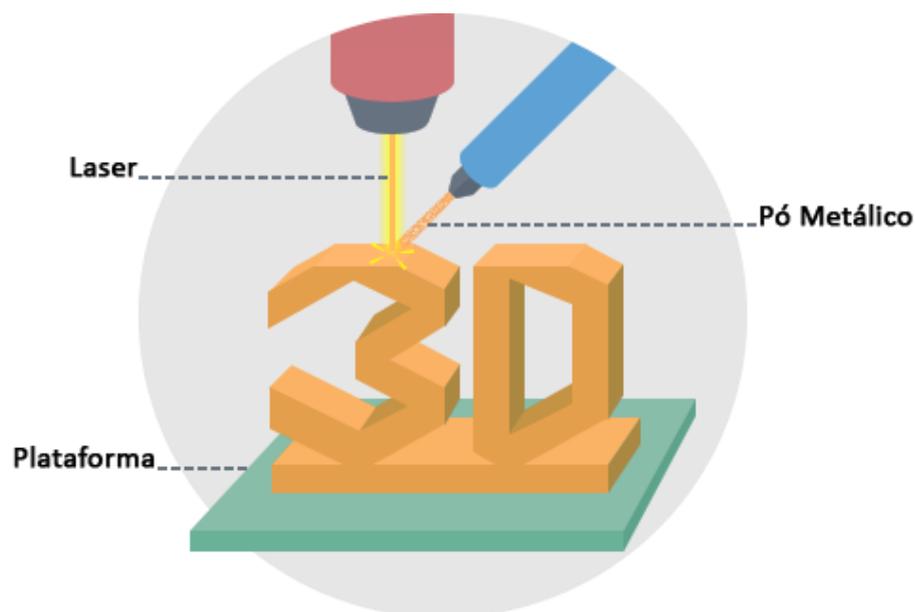


Figura 20 - Esquema geral do processo IJP  
Fonte: (THRE3D, 2014)

Este tipo de impressora pode também utilizar várias cabeças de impressão para misturar diferentes materiais em uma única peça, porém é limitada na variedade de materiais compatíveis. Pois eles precisam ser foto-polímeros sensíveis à luz ultravioleta, um tipo de plástico especializado e assim muito caro, no entanto relativamente frágil e limitador do leque de aplicações possíveis (LIPSON e KURMAN, 2013).

#### 2.1.5.6. *Laser Engineered Net Shaping (LENS) - Modelagem por Laser de Engenharia*

Este sistema funciona disparando jatos de material em pó em um feixe de laser de alta potência direcionado, algumas partículas do pó não atingem o laser e caem, porém, as que atingem são instantaneamente fundidas à superfície da peça. Assim, como o ponto focal do laser segue o contorno da peça em construção e o pico libera os jatos de pó, a peça vai crescendo gradualmente, camada por camada, Figura 21.



**Figura 21 - Esquema geral do processo LENS**  
**Fonte: (THRE3D, 2014)**

A vantagem deste processo é poder utilizar materiais muito duros, como titânio, e aço inoxidável. Até que os processos com metal fossem inventados, as grandes indústrias não levaram muito a sério a impressão 3D por trabalhar apenas com polímeros, porém quando este tipo de processo apareceu, indústrias como a aeroespacial e automotiva prontamente se interessaram. A tecnologia LENS hoje é utilizada para fabricar peças em metais duros, como

tais como hélices de turbinas, canais de refrigeração internos, dentre outros (LIPSON e KURMAN, 2013).

#### 2.1.5.7. *Laminated Object Modeling (LOM) - Modelagem de Objeto por Laminação*

Impressoras LOM não utilizam uma cabeça de impressão na construção das camadas, convertem finas lâminas de um material, que pode ser plástico, papel ou metal, em objetos tridimensionais sólidos. Uma faca ou um feixe de laser corta a chapa seguindo o contorno de cada seção da geometria, depois de finalizado o corte da seção, uma fina folha de adesivo é aplicada sobre a camada já terminada, partindo para o sucessivo corte das camadas seguintes, conforme Figura 22. Depois que todas as camadas estão cortadas, a impressora as pressiona para fundi-las em um objeto sólido. Algumas dessas máquinas que trabalham com alumínio, usam frequências de ultrassom para fundi-lo, compactando as camadas e tornando o objeto resistente (LIPSON e KURMAN, 2013).

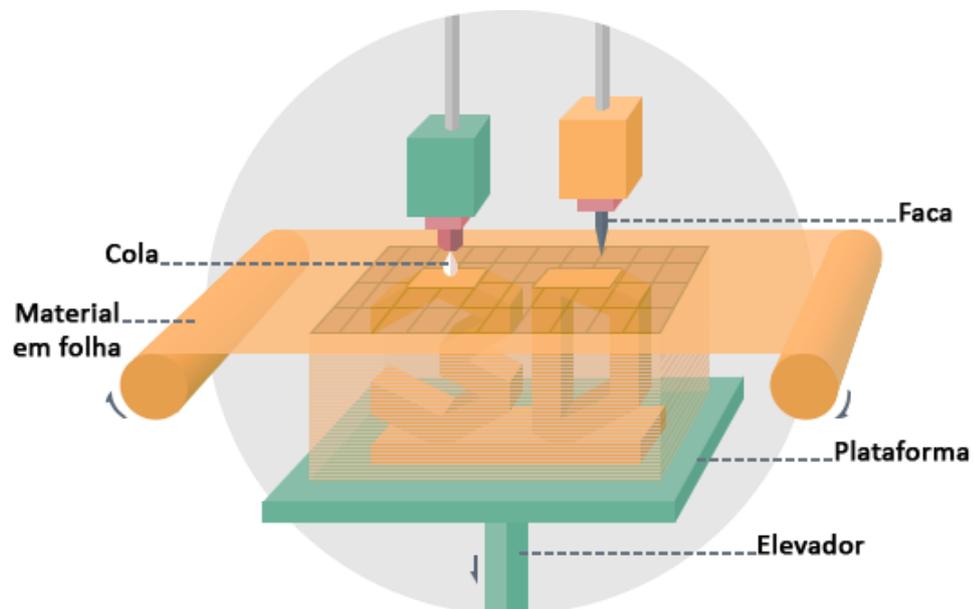
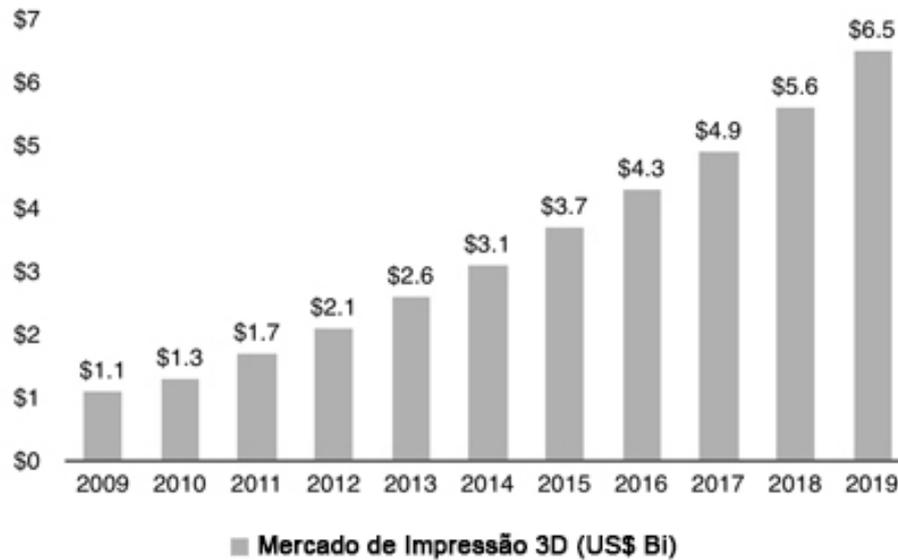


Figura 22 - Esquema geral do processo LOM  
Fonte: (THRE3D, 2014)

#### 2.1.6. **Evolução e principais aplicações da impressão 3D**

A manufatura aditiva vem crescendo rapidamente nos últimos anos e, segundo alguns autores, vai continuar a crescer e se desenvolver ainda mais. Segundo a Wohlers Associates Inc., a aplicação mais comum da tecnologia ainda se encontra na produção de modelos

funcionais, protótipos de componentes e algumas aplicações estéticas, no entanto o mercado para a indústria de manufatura aditiva tem se mostrado muito promissor e cresce substancialmente a cada ano, saindo em 2010 de um crescimento de 24,1% e um montante de US\$ 1,325 bilhões para 29,4% e US\$ 1,714 bilhões em 2011, (WOHLERS, 2012), e com projeção de chegar a US\$ 6,5 bilhões em 2019, conforme visto na Figura 23.



**Figura 23 - Evolução do mercado de impressão 3D**  
Fonte: (GSV, 2013)

Este crescimento se deve à evolução dos processos e vem proporcionando diminuição dos custos das matérias primas bem como do maquinário. Em 2001 a impressora profissional mais barata do mercado custava aproximadamente US\$ 45.000, caindo para US\$ 22.900 em 2005, para menos de US\$ 10.000 em 2011, hoje com preços ainda menores e com tendência de cair ainda mais nos próximos anos. (IGOE e MOTA, 2011).

As impressoras 3D começam a se tornar mais acessíveis em uma escala global, e os consumidores começam a inovar em uma vasta gama de segmentos, conforme pode ser visto na Tabela 3. Como resultado o processo da manufatura aditiva está começando a criar rupturas na dinâmica da indústria convencional, gerando o aparecimento de novos negócios (GRYNOL, 2013).

		Público alvo		
		Consumidor	Pequenos e médios negócios	Corporações
Disponibilidade de mercado	Necessidade de P&D		Reposição de órgãos, \$30B	Mobiliário, \$20B Eletrônicos, \$289B
	Perto do uso comercial	Comida preparada EUA, \$23B	Bicicletas, \$6B Armamento, \$11B Vestuario Global, \$1T	P&D Ciências da vida, \$148B Construção residencial e reformas, \$678B Ferramentas energéticas, \$22B
	Em uso	Modelismo e Hobby, \$30B Animação e Jogos, \$122B	Próteses médicas, \$17.5B Lojas de Ferragens, \$22B Lojas de autopeças EUA, \$40B Brinquedos, \$80B	P&D industrial (prototipagem), \$23B P&D aeroespacial e defesa, \$9B

**Tabela 3 - Oportunidades globais decorrentes da impressão 3D em diferentes setores**  
**Fonte: (FAKTOR, 2012)**

Apesar do evidente crescimento e diversificação tanto dos processos como das matérias primas, muitas das aplicações ainda não foram implantadas em nível comercial.

Existem hoje alguns modelos de máquinas de boa qualidade destinados à utilização em casa que custam em torno de US\$ 2.000, e, só em 2011, este tipo de impressora teve um incremento de 289% nas vendas, chegando a 23.265 unidades comercializadas (WOHLERS, 2012).

É a aplicação doméstica da tecnologia que está gerando grandes mudanças e, irá revolucionar a maneira de se fabricar. Grandes mudanças acontecem quando atividades se democratizam, saindo do domínio exclusivo de empresas, de governos e de outras instituições, tornando-se acessíveis às pessoas comuns.

A fabricação de novos produtos tende a não ser mais domínio de poucos, mas oportunidade para muitos, a AM vem diminuindo a distância entre inventor e empreendedor de tal forma que, em alguns casos, ela praticamente não existe mais.

As impressoras 3D estão se popularizando e, apesar de não termos ainda uma exata noção do impacto que essas mudanças causarão, pode-se observar que a noção de “fábrica” está mudando. A produção através das tecnologias de AM tende a se pulverizar, se aproximando dos mercados consumidores e tornando o local de fabricação com cada vez menos

importância. Segundo Anderson (2012), e fabricação pode até se tornar um serviço que poderia ser acessado por qualquer um que queira fabricar alguma coisa, criando um mundo de fabricação distribuída, permitindo inventar no âmbito local e produzir no âmbito global, atendendo a mercados de nicho definidos pelo gosto, não pela geografia.

Atualmente, segundo Anderson (2012), como a complexidade, variedade e qualidade não tem custo, a capacidade de produzir uma pequena quantidade de itens de alta qualidade e vendê-los a preços razoáveis pode causar rupturas econômicas. As grandes empresas, que concentram suas atividades em mercados de massa com escala de milhões de unidades não atendem bem os mercados de nicho na escala dos milhares, e este mercado está sendo ocupado por micro e pequenas fábricas que utilizam tecnologias de fabricação computadorizada, dentre elas em destaque a AM.

O modelo de produção em massa, no qual a customização era dispendiosa e precisava ser feita em grandes quantidades para absorver as despesas com investimentos, está desaparecendo com rapidez. Os produtos de nicho tendem a ser determinados pelo atendimento à desejos e necessidades específicas das pessoas.

Microempresas vendem online diretamente a consumidores de todo o mundo em vez de esperar pedidos. Elas inventam os próprios produtos e se empenham na construção de suas pequenas marcas. Em vez de competir no preço, elas focam na diferenciação pela inovação.

Este poder sobre o meio de produção proporcionados pelas tecnologias AM, além do empreendedorismo, cria um meio propício à inovação e um cenário de popularização do design. Muitos amadores e entusiastas atualmente podem desenvolver produtos, bem como investir em ideias e disponibilizá-las via internet.

Este crescimento vem despertando o interesse de empresas do setor de projeto engenharia de produtos como Autodesk, 3D Systems e PTC, que lançaram softwares de projeto gratuitos para amadores e crianças, além de birôs de serviços de impressão.

A Apple estimulou os fãs de música a “rip, mix, burn” (corte, mixe, grave), a Autodesk agora prega o evangelho “rip, mod, fab” (corte, mude, faça), ou seja, escaneie objetos em 3D, modifique-os em um programa CAD e os imprima numa impressora 3D (ANDERSON, 2012, p. 84).

Segundo Zhai, Lados e Lagoy (2014), o consórcio americano AMC (*U.S. Additive Manufacturing Consortium*), composto de indústrias, agências do governo, organizações de pesquisa, e universidades, identificou 5 pontos chave para acelerar a inovação e o desenvolvimento da manufatura aditiva no mundo:

- Base de dados de materiais
- Modelo de compensação/precisão inicial em processo
- Sensores e controle de processo e avaliação não destrutiva
- Caminhos claros e acessíveis para qualificação e certificação
- Equipamentos OEM<sup>8</sup> (*Original Equipment Manufacturer*) maiores, mais rápidos, e mais capazes.

Chegar às propriedades e desempenho desejados nas peças fabricadas em manufatura aditiva são em grande parte influência das características internas dos materiais, assim o entendimento da microestrutura em diferentes técnicas de manufatura aditiva é imperativo. Extensas pesquisas em materiais metálicos têm sido conduzidas e microestruturas extremamente diferentes foram observadas e comparadas aos materiais convencionais de fabricação. Incluindo padrões de camadas distintas e zonas afetadas por calor, grãos direcionais, e pequenas características no seu interior.

Investimentos precisam ser feitos para apoiar a inovação de desenvolvimento do setor, recentemente foi criado o America Makes (2015) nome dado ao Instituto Nacional de Inovação em Manufatura Aditiva (*National Additive Manufacturing Innovation Institute*), com o objetivo de auxiliar a desenvolver as capacidades e forças na impressão 3D, facilitar a colaboração entre empresas, universidades, organizações sem fins lucrativos e agências governamentais. Concentrando-se em áreas que incluem design, materiais, tecnologia, força de trabalho dos Estados Unidos.

As tecnologias AM presentes no mercado vêm se diversificando, os princípios de funcionamento ganham variações e um panorama atual pode ser visto na Tabela 4, que

---

<sup>8</sup> OEM é o termo utilizado quando uma empresa fabrica uma peça ou subsistema que é utilizado no produto final de outra empresa.

mostra os processos de manufatura aditiva e os principais fornecedores para cada princípio de operação.

Processo AM	Sigla	Fornecedores	Princípio de Operação
Sinterização direta de metal por laser (Direct metal laser sintering)	DMLS	EOS	Cama de pó + Feixe de laser
Fusão seletiva por Laser (Selective laser melting)	SLM	Renishaw	
Fusão por laser (LaserCUSING)	LaserCUSING	Concept laser	Cama de pó + Feixe de elétrons
Fusão por feixe de Elétrons (Electron beam melting)	EBM	Arcam AB	
Formagem por laser técnico (Laser engineered net shaping)	LENS	Optomec	Pó de metal (bocal direcionado) + Feixe de laser
Deposição direta de metal (Direct metal deposition)	DMD	DM3D technology (formerly POM group)	
Deposição de pó por laser (Laser powder deposition)	LPD	Huffman Corp.	
Modelagem por deposição de material fundido (Fused deposition modeling)	FDM	Stratasys	Filamento de material + Aquecimento
Fabricação de forma livre por feixe de elétrons (Electron beam freeform Fabrication)	EBF3	Sciaky, Inc	Arame de metal + Feixe de elétrons
Impressão 3D (3D printing)	3DP	3D systems ExOne	Cama de pó + Cabeça de impressão
Estereolitografia (Stereolithography)	SL	3D systems	Fotopolímero líquido + Luz Ultravioleta/Feixe de laser

**Tabela 4 - Princípios Operacionais da AM e Principais Fornecedores de maquinário**  
**Fonte: (ZHAI, LADOS e LAGOY, 2014)**

Ainda segundo Zhai, Lados e Lagoy (2014), os próximos passos a serem dados no desenvolvimento da manufatura aditiva são a otimização das técnicas e dos materiais da AM e o desenvolvimento de métodos para uma efetiva inspeção das matérias primas e produtos.

Os fundamentos e princípios de trabalho da Manufatura aditiva oferecem diversas vantagens, incluindo características que permitem a redução de processos e fabricação *near-net-shape*<sup>9</sup>, design superior e flexibilidade geométrica, inovadora fabricação em múltiplos materiais,

<sup>9</sup> Near-net-shape é um termo utilizado para designar tecnologias de manufatura que produzem componentes próximos da peça final, algumas vezes dispensando a necessidade de operações mecânicas complementares e requerendo uma mínima quantidade de processos de acabamento, alguns exemplos são a usinagem, forjamento em matriz, fundição por cera perdida e recentemente a manufatura aditiva por camadas.

redução nas ferramentas e montagens, curto tempo de ciclo para o design e manufatura, fabricação local sob demanda em escala global, e eficiência em material, energia e custos.

Com todo esse contexto fica clara algumas tendências que em menores ou maiores graus vêm se concretizando no mercado da manufatura aditiva

A popularização da AM é um ponto bastante evidente e vem sendo observada há algum tempo. Ela não é mais utilizada apenas para a fabricação de componentes críticos como lâminas de turbinas, dispositivos médicos e peças com estrutura complexa, mas também está sendo usada por empreendedores para produzir peças tridimensionais funcionais, como relógios, dispositivos, robôs, e mesmo peças para impressoras 3D.

Neste sentido, um caminho que vem sendo questionado é a autoprodução, tendência que vem se firmando como um importante aspecto do desenvolvimento da AM. O crescimento do uso pessoal, abre muitas possibilidades de aplicação e torna a tecnologia ainda mais atrativa.

Este termo vem sendo utilizado por alguns autores para delimitar uma fabricação em baixa escala de produção na qual o próprio consumidor “fabrica” um determinado produto configurado de acordo com seus desejos e suas necessidades específicas.

Estas características tendem à configuração de uma fabricação distribuída, ou distribuição das atividades produtivas, movimento contrário ao que vemos hoje com os grandes polos produtivos de baixos custos. Com a popularização e diversificação das impressoras 3D, qualquer um, quase não importando o lugar que se encontre, pode se tornar um fabricante.

Uma customização em massa também já pode ser observada. A tecnologia também vem sendo mais fortemente utilizada em segmentos que demandam por altos níveis de personalização nos produtos, seja por questões de atribuição de significado ou ergonômicas, como a área da joalheria ou próteses médicas.

Como realçado anteriormente, a impressão 3D é aplicada em vários segmentos produtivos, principalmente mobiliário, iluminação, presentes, calçados, vestuário, alimentos, construção, área médica com próteses, órteses, talas, construção e reformas e bioimpressão, instrumentos musicais, aeronáutica, restauração. Além destes segmentos, diversos outros

tendem a ser bastante impactados pela impressão tridimensional, conforme pode ser visto na Figura 24.



**Figura 24 - Exemplos de aplicação da impressão 3D**  
Fonte: do Autor

Apesar de tanta variedade nos sistemas e aplicações, muitas delas ainda não conseguem ter uma grande penetração de mercado, e essa incapacidade é em boa parte fruto da falta de competitividade das peças produzidas nos métodos de AM, em função de diversos fatores limitadores, com destaque para o custo das peças fabricadas. Podemos observar que o custo das peças é proveniente do alto custo de muitas matérias-primas e dos insumos, da lentidão da maioria dos processos e pela baixa qualidade de acabamento superficial.

Segundo Zhai, Lados e Lagoy (2014), no campo da joalheria, o design de metais preciosos traz desafios únicos se comparados com ligas metálicas comuns para manufatura aditiva por causa das superfícies com elevado polimento desejadas pelos clientes. Enquanto joias fundidas necessitam de menos polimento, a AM permite a criação de formas nunca antes conseguidas, dando aos artistas e designers um novo nível de detalhes na geometria nunca antes vistos.

## **2.2. A joia**

Segundo Copruchinski (2011), o ser humano recorreu à utilização de adornos para se diferenciar de seus semelhantes, com o objetivo de se tornar mais belo, ter mais poder ou tornar-se mais desejado e melhorar suas possibilidades. Ele estava criando o conceito da ornamentação humana, ponto de partida para todas as manifestações, valores que ainda hoje podemos observar nas diversas culturas humanas.

“Olhando para o passado, para as peças de joalheria ao longo da história humana, sem distinção de raça, religião ou cultura, desde os primeiros colares de dentes, ossos e pedras há cerca de quarenta mil anos atrás, até as joias mais modernas, percebemos que pouca coisa mudou na forma de ornamentação. Todos os adereços usados hoje como, pendants, colares, brincos, braceletes, anéis e outros objetos que tem como finalidade enfeitar o corpo já existiam entre os povos primitivos com conceitos semelhantes aos que temos hoje” (COPRUCHINSKI, 2011).

Segundo o autor, parece haver uma necessidade antagônica humana expressa na forma de se enfeitar, que aponta ao mesmo tempo para a coletividade e para a individualidade. Se a joia nasceu com o homem, e desde sempre faz parte de seu modo de viver, e suas formas básicas continuam sendo as mesmas utilizadas pelos povos primitivos, ao mesmo tempo existe uma enorme necessidade de ser diferente, de usar objetos diferentes, objetos que interagindo com o corpo lhe atribuam uma identidade própria, mas que ao mesmo tempo transmitam uma mensagem e traduzam o momento cultural da coletividade.

As primeiras manifestações do homem com relação ao uso de adornos remontam ao período da pedra lascada, há cerca de 35 mil anos antes de Cristo, onde nas cavernas eram utilizadas como habitação e nelas encontram-se desenhos que indicam que o homem já se decorava, pintava seu corpo e utilizava adornos (GOLA, 2008).

Segundo a autora, elementos naturais como conchas, ossos, presas de animais, adornos feitos de rochas, minerais e cascalho, supostamente amarrados com tiras de couro ou alguma fibra vegetal, bem como objetos muito simples de ouro in natura com alguma manipulação, eram utilizados como adornos. Ao que parece, foi a necessidade do homem de se adornar para se igualar a outras espécies mais decoradas e diferenciar dos seus semelhantes, e se qualificando perante eles, que o levou a produzir este tipo de objeto.

A evolução da joia teve início no período paleolítico, quando os objetos possuíam um significado místico relacionado com suas funções, e este significado era atribuído pela via mimética da representação, e os temas abordados eram de origem no cotidiano, no individual e a joia teve uma função de amuleto. Um exemplo eram as conchas, que tinham relação simbólica com o feminino e a fertilidade, eram objetos utilizados para assegurar a gestação e preservar a continuidade da espécie. Outros objetos, como dentes e plumas, eram utilizados para conferir força e energia ao seu portador (CODINA, 2000).

No Neolítico, com o fim dos povos nômades, as bases socioeconômicas da era histórica foram estabelecidas, com o domínio da agricultura, a possibilidade de armazenar alimentos e a domesticação de animais foram as bases para a formação das primeiras sociedades organizadas, com divisão do trabalho especializado e a existência de chefes e autoridades. As joias passam então a ser empregadas na ornamentação como forma de diferenciação das funções e importância dos indivíduos dentro da sociedade (COPRUCHINSKI, 2011).

Ainda segundo Copruchinski (2011), A metalurgia surgiu com a descoberta do cobre há 8 mil anos, inicialmente com a forja a frio e depois com aquecimento, mas só 3.000 anos após essa descoberta que o processo de fundição foi descoberto. A forma era trabalhada na argila e posteriormente queimada para servir de molde para o metal fundido.

Por volta de 3.500 a.C. surgiu a ourivesaria, quando a prata e ouro começaram a ser utilizados, especialmente o ouro pela sua cor que era assimilada ao sol. Neste mesmo período surgiram

as técnicas de unir gemas ao metal. Peças brutas eram enroladas e amarradas às peças com fios de metal. Conforme um determinado material era incorporado à joia, novas técnicas tinham que ser desenvolvidas e os artesãos precisavam ser muito habilidosos para conseguir construir as peças com poucas ferramentas e recursos.

Na revolução industrial, a padronização e uniformização dos objetos e a divisão do trabalho leva à perda da relação entre o artesão e o produto, assim surgem duas tendências claras, uma maquinista, racional e geométrica e outra naturalista, sentimental e orgânica. Também é quando se inicia a utilização de novos materiais gerando uma diversificação nas possibilidades criativas, porém com duas correntes claramente definidas, de um lado a democratização da joia, que se baseia na capacidade criativa, e do outro a exclusividade, que se centra no valor dos materiais aplicados à joia (CODINA, 2000).

Após a segunda guerra o crescimento é retomado e então se observa uma completa diversificação de estilos, tendências e materiais, os anos 1960 foram marcados por grandes transformações na joalheria, que vivia uma revolução dos padrões dos anos 1950 pela nova geração que ansiava por novos estilos em busca de uma ruptura com o formalismo da década passada (GOLA, 2008).

Já segundo Copruchinski (2011), em 1960 a joalheria se dividiu em duas tendências distintas, a joalheria tradicional e a joalheria artística. A primeira valorizava os materiais aplicados na peça, enquanto a segunda se apoiava nos valores da arte contemporânea, onde o artista cria como forma de expressão e escolhe técnicas e materiais capazes de adequar-se às suas necessidades expressivas, ele não tem compromisso com tradições, materiais ou moda, cria suas joias com qualquer material que possa ser transformado com qualidade expressiva, e que atribua o valor estético e artístico necessários de suas criações.

Em 1990 a joia perde a conotação de ostentação e riqueza e as grandes marcas e fabricantes se identificam cada vez mais com a moda e inspirando na joalheria de arte e agregando novos materiais como couro, titânio, esmaltes, aço, madeira, silicone, borracha, dentre outros passam a ser empregados na joia.

No novo século a joia passa a ser associada ao prazer, a beleza, ao sonho e à fantasia. A joia deve expressar o modo de vida de quem as usa, e a necessidade de se sentir único, especial,

exclusivo. Já não bastam materiais caros e de difícil acesso, as gemas não precisam ser as mais raras e os metais não precisam ser os mais preciosos. A joia deve representar uma experiência total de vida, marcar um momento, contar uma história, informar a singularidade do indivíduo e a forma como ele se relaciona consigo e com os outros.

Desde os primeiros registros a joalheria veio se diversificando com o passar do tempo, esta situação se potencializou a partir do pós-guerra, quando a joalheria se desenvolveu e se tornou mais complexa, sua utilização se tornou muito diversificada, com diferentes motivos, usos e significados, criando segmentações das mais variadas conforme a Figura 25.

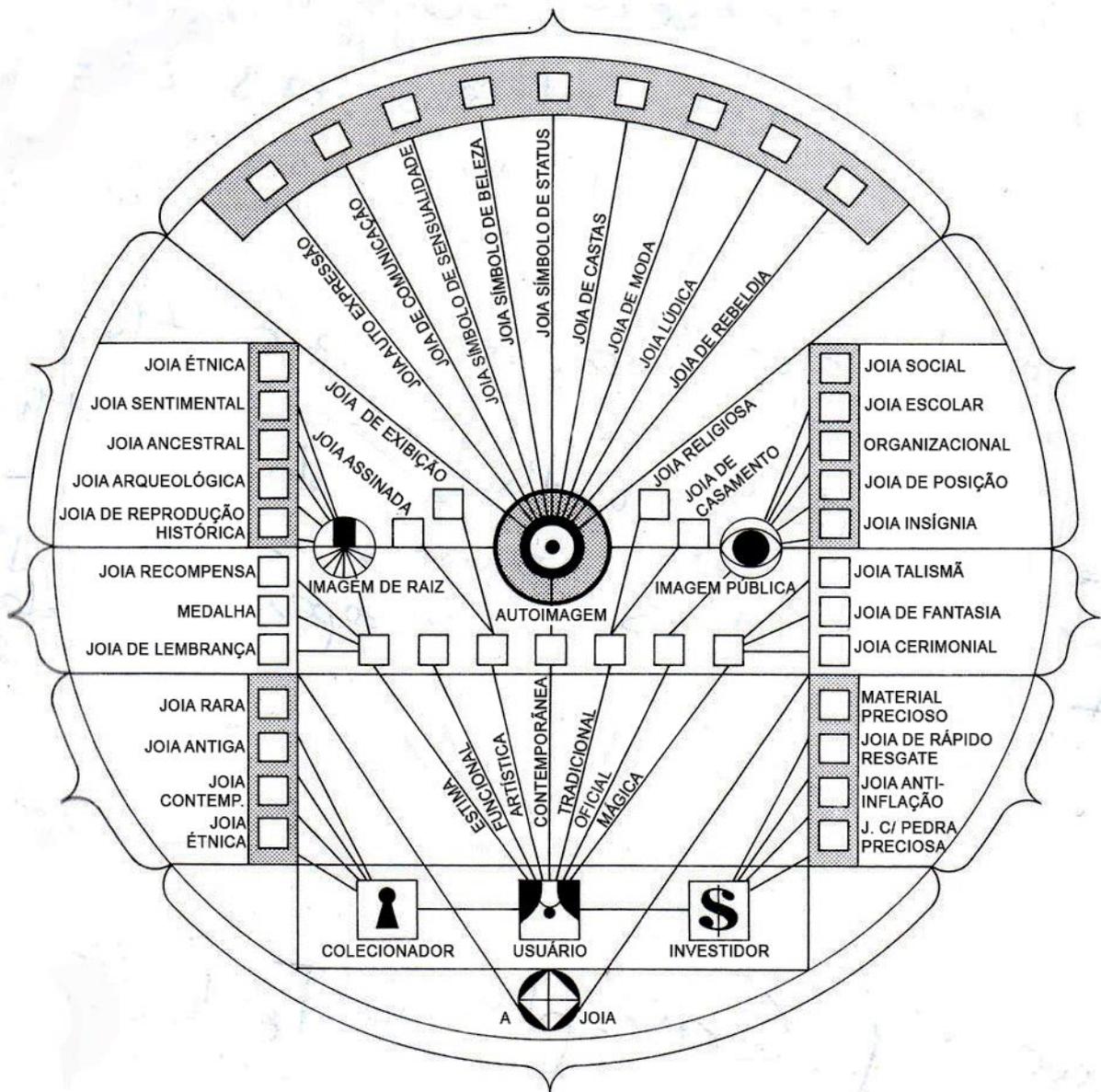


Figura 25 - "The Jewel Mandala" Diagrama de segmentação das joias  
 Fonte: (UNTRACHT, 1985, p. 9)

A diversificação chegou a tal ponto que passamos inclusive a questionar o que é a joia. Segundo Codina (2000), conhecimento humano tende a classificar e agrupar os efeitos e as causas em conceitos de semelhança, tende a transformar situações e provocar efeitos pela via mimética da representação. A partir dessa característica pode-se entender que são atribuídos aos objetos um determinado valor, inclusive de intercâmbio, dando-lhes a categoria de objetos muito estimados, de objetos preciosos.

Hoje é possível aplicar os mais diferentes materiais na composição de uma determinada joia, no entanto os metais ainda são os materiais mais utilizados, e os metais preciosos como ouro, prata, platina, dentre outros ainda são muito utilizados na confecção de joias (UNTRACHT, 1985).

Segundo Hohkraut (2010), como a função principal das joias é a decoração, ela é abordada particularmente pelo ponto de vista estético e, neste sentido, os metais preciosos desempenham uma função específica pelas suas características de brilho, reflexão nas suas superfícies, proporcionando beleza à joia. A exploração da forma da joia é que pode gerar efeitos interessantes captados pelo olho humano. Através da utilização de diferentes materiais se obtém diferentes reflexões que, em combinação com diferentes texturas são recursos que o designer aplica na criação da joia atrativa visualmente.

O desenvolvimento das tecnologias abriu uma ampla gama de possibilidades na execução das joias, Copruchinski (2011) cita que a revolução tecnológica dos últimos tempos trouxe um arsenal de equipamentos que possibilitam fazer coisas nunca antes imaginadas, com qualidade nunca antes vistas na joalheria.

### **2.2.1. Tipos de fabricação de Joias**

Segundo Gola (2008), a joalheria pode ser separada em duas categorias, a artesanal e a industrial, a primeira valorizando as produções com lotes reduzidos ou até peças exclusivas, trabalhadas por profissionais artistas que dominam as técnicas de fabrico e, a segunda valorizando o aspecto comercial do produto, aqui se encontram várias subdivisões de acordo com o segmento de mercado que se quer atingir, com foco na produção em série e fabricação de lotes mais extensos, utilizando técnicas adaptadas para serem trabalhadas em maquinário específico para ganho de produtividade.

Se para o artesão da joia o que importa é o trabalho manual com a utilização de técnicas difíceis de serem reproduzidas por máquinas e que conferem o valor e exclusividade à peça, na indústria é fundamental o padrão de qualidade e a produtividade das peças, intenção que projetistas e modeladores devem estar atentos na hora da concepção e modelagem, pois o tempo gasto para o planejamento e projeto será diluído no volume de peças fabricadas.

Untracht (1985) coloca esta divisão entre fabricação em altos ou baixos volumes, para o mercado de massa ou para nichos específicos logo na base da do seu mapa de classificação conforme pode ser visto na Figura 26, demonstrando que, até então, esta divisão fundamentava as intenções de fabricação de joias.

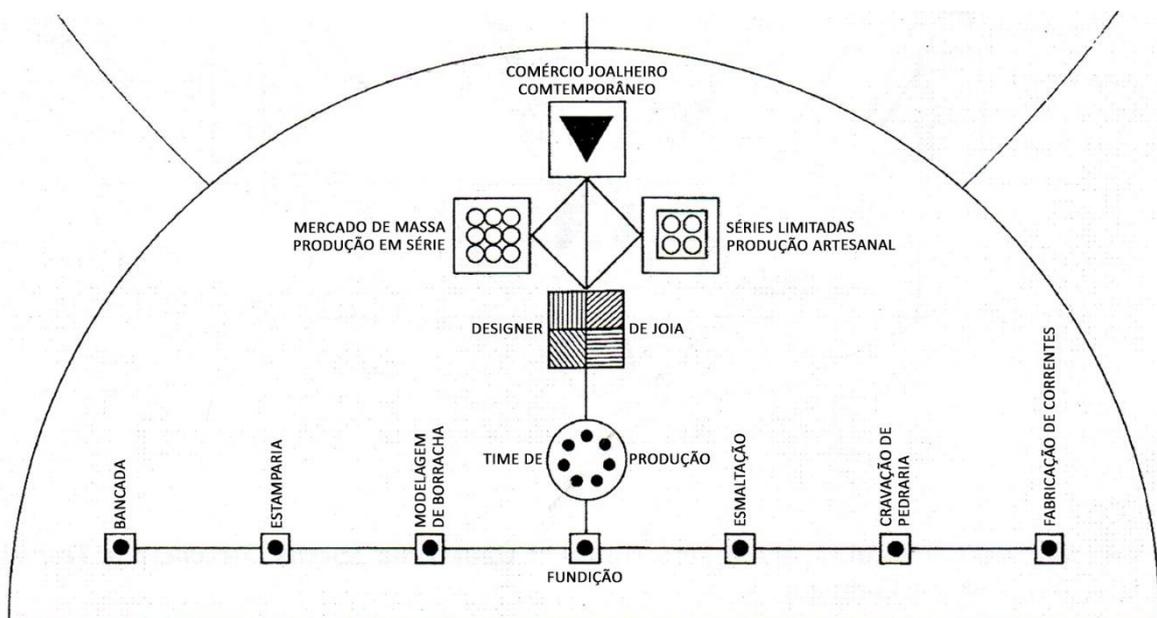


Figura 26 - Parte do mapa de Classificação dos Joalheiros “*A Polarized convocation of Jewelers*”  
 Fonte: (UNTRACHT, 1985, p. 12)

### 2.2.2. Técnicas artesanais de trabalho com metais

As técnicas artesanais de trabalho com metais sofreram poucas mudanças desde seu surgimento. Elas podem ser agrupadas pelo objetivo básico de transformação, como conformar, soldar, cortar, cravar outros materiais, gravar e pintar ou esmaltar o metal, bem como algumas técnicas consideradas especiais, como a filigrana e a granulação (TEIXEIRA, FREESZ e GUERRA, 2014).

- **Conformação:** em joalheria, conformar o metal é modificar o seu formato através de esforços mecânicos sejam com ou sem a adição de calor para facilitar o processo. Eles podem ser subdivididos em laminação, trefilação e trabalho com matrizes. Basicamente os processos de conformação são caracterizados pela aplicação de forças para deformar o metal e assim mudar o seu formato inicial.
- **Soldagem:** a solda na joalheria normalmente é feita com um maçarico e pedaço do mesmo material que se quer unir. O pedaço de solda é aplicado sobre o ponto onde será feita a união e com a aplicação de calor as partes se fundem em uma única peça.
- **Corte:** existem vários processos que podem ser enquadrados como corte, ou seja, a retirada controlada de material com objetivo de separar peças, ajustar medidas, fazer furos ou rasgos, dentre outras. Os cortes implicam na retirada de material para separar pedaços, fazer furos ou desbastar o metal, passos necessários para a obtenção da peça
- **Cravação:** técnica específica para prender pedras à joia, geralmente uma das últimas etapas da fabricação da joia antes do polimento feita com procedimentos e ferramental próprios. Ela pode ser feita por grifas, garras salientes que seguram a pedra no metal, pode também ser do tipo inglesa, que consiste em um aro que circunda a pedra ou por tensão, onde o metal fique pressionando a pedra e assim ela fique presa.
- **Gravação:** consiste em realizar desenhos no metal através da retirada de material de sua superfície, podendo criar relevos ou cortes. Este trabalho pode ser realizado através da retirada mecânica do material, utilizando ferramentas como fresas e brocas, ou retirada química como a foto corrosão.
- **Esmaltação e nielo:** ambas são técnicas de preenchimento de uma superfície de metal. Em ambas técnicas é necessário o aquecimento da região preenchida para que o material adicionado se funda em um líquido e depois esfrie se solidificando e aderindo ao metal. No caso do esmalte são utilizados minerais óxidos que quando aquecidos se liquefazem e depois de resfriados se transformam em vidro, já na técnica de nielo é um pó composto por uma mistura de prata, chumbo e enxofre, que recebendo uma fonte de calor se funde à superfície da joia.

- Filigrana e Granulação: a Filigrana é uma técnica que utiliza finos fios de metal que preenchem estruturas construídas para este fim, os fios são tecidos e soldados à uma estrutura que ser de molde e vão assim formando belos desenhos que vão cobrindo as superfícies vazadas. A granulação utiliza pequenas esferas de metal que são arranjadas na superfície da joia e presas através de solta, formando motivos decorativos sobre as áreas cobertas.

As técnicas artesanais combinadas e aplicadas na fabricação de joias permite a realização de diferentes trabalhos com características diferenciadas pela aplicação de ferramental ou técnica específica.

Como pode ser observado, todas as técnicas artesanais citadas são extremamente manuais e requerem uma grande quantidade de trabalho humano para que as peças sejam confeccionadas. Os artesãos eram os responsáveis por materializar a joia no metal e concentravam todas as especialidades, concepção, projeto, viabilização e fabricação. Concentração que com a revolução industrial teve as etapas projetuais desvinculadas das de fabricação, dando espaço para o surgimento dos profissionais de projeto, como também novas técnicas aperfeiçoadas ou desenvolvidas para o contexto da produção em alta escala de fabricação.

### **2.2.3. Processos industriais de fabricação**

Existem diversos processos industriais para a fabricação de joias, podemos dizer que para cada uma das técnicas artesanais descritas anteriormente, existe alguma adaptação para a sua utilização na produção em massa, onde o trabalho manual é em grande parte substituído pelo mecanizado com a aplicação de gabaritos, moldes, matrizes ou mesmo robôs.

No entanto, um processo se destaca no contexto da fabricação de joias em escala, a fundição. Segundo Kliauga e Ferrante (2009), hoje existe um grande número de diferentes processos de fundição e eles podem ser classificados de diferentes maneiras; conforme o tipo de material do molde, método de vazamento do metal e na pressão aplicada durante o preenchimento.

De acordo com os tipos de materiais empregados nos moldes, eles podem ser duráveis e não duráveis. Os primeiros são geralmente fabricados em ligas metálicas, e são utilizados várias vezes na fabricação de diferentes lotes de produção. Os não duráveis, são feitos com materiais

mais frágeis tipo areia e casca cerâmica, e são destruídos a cada utilização, sendo necessário reconstruí-los a cada nova fundição. Neste tipo de processo, geralmente são colocadas várias cavidades em um único sistema de alimentação, formando uma árvore de fundição<sup>10</sup>.

Os processos que utilizam os moldes não duráveis se utilizam de modelos das peças para construir os moldes a cada fundição. Estes modelos também podem ser classificados como permanentes e não permanentes. Os permanentes são feitos em madeira, metal ou plásticos e são utilizados na construção de vários moldes não duráveis e os não permanentes são destruídos a cada fundição e são fabricados em polietileno expandido, outros materiais poliméricos ou feitos em cera. Neste caso, é necessário que um novo modelo seja construído a cada fundição, no caso específico da fundição por cera perdida, processo mais utilizado na joalheria, a forma mais utilizada para reproduzir o modelo é a injeção da cera líquida em um molde de borracha.

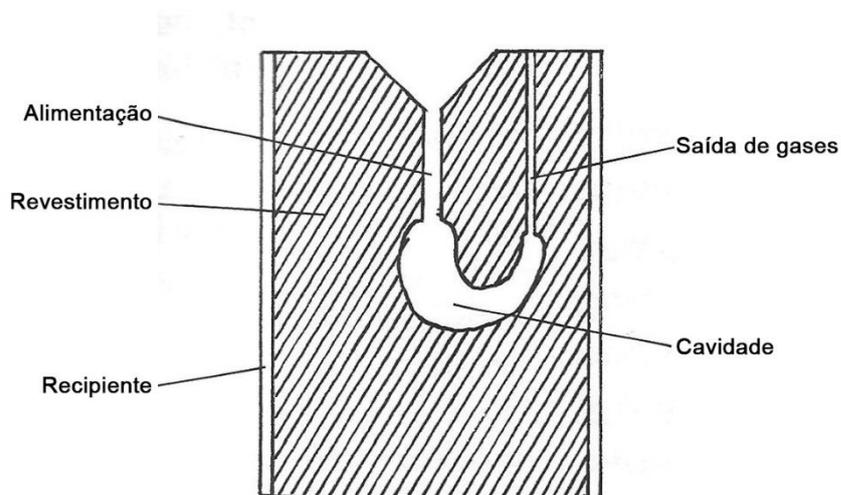
Especificamente nesta classificação podemos destacar a fundição por revestimento ou fundição por cera perdida, nomenclatura utilizada em função do material empregado na confecção da peça modelo, a cera. Segundo Sias (2005), evidências de fundição por cera perdida são datadas de 4200 anos antes de cristo, uma das mais antigas técnicas de trabalho com metal. Antigamente os ferreiros usavam cera de abelha na construção de modelos para fundição, algumas vezes podiam ser empregadas resinas de plantas, bem como combinações de diferentes tipos de cera para obter as propriedades físicas desejadas. Atualmente a maioria dos modeladores de joias utilizam ceras para joalheria, elas são produtos derivados do petróleo e podem ser usadas de várias maneiras distintas.

A fundição por cera perdida hoje utiliza materiais de alta tecnologia e permite a fabricação de componentes com alta fidelidade, facilidade de reprodução, versatilidade e integridade em uma vasta gama de metais e ligas de alto desempenho, é também capaz de produzir formas complexas que seriam muito difíceis ou impossíveis com outros tipos de fundição, e ainda requerem pouca usinagem de ajuste e pouco acabamento superficial.

---

<sup>10</sup> Árvore de fundição é o nome dado ao conjunto de peças feitas em cera e montadas em um suporte, também em cera, que fica com um formato semelhante à uma árvore, destinado a fundição de várias peças de uma só vez.

Sias (2005) descreve o conceito básico do processo de fundição por cera perdida. Primeiramente um objeto é modelado em cera, hastes de cera são afixadas no modelo e este objeto inteiro em cera é revestido por uma massa. As hastes de cera ficam projetadas para fora do revestimento e servirão no futuro como canais de escoamento para que o metal entre no molde. Depois do revestimento solidificado, o conjunto é aquecido para que a cera derreta deixando uma cavidade que será preenchida com metal, conforme pode ser visto na Figura 27.



**Figura 27 - Esquema de corte de molde de fundição**  
Fonte: (SIAS, 2005, p. 48)

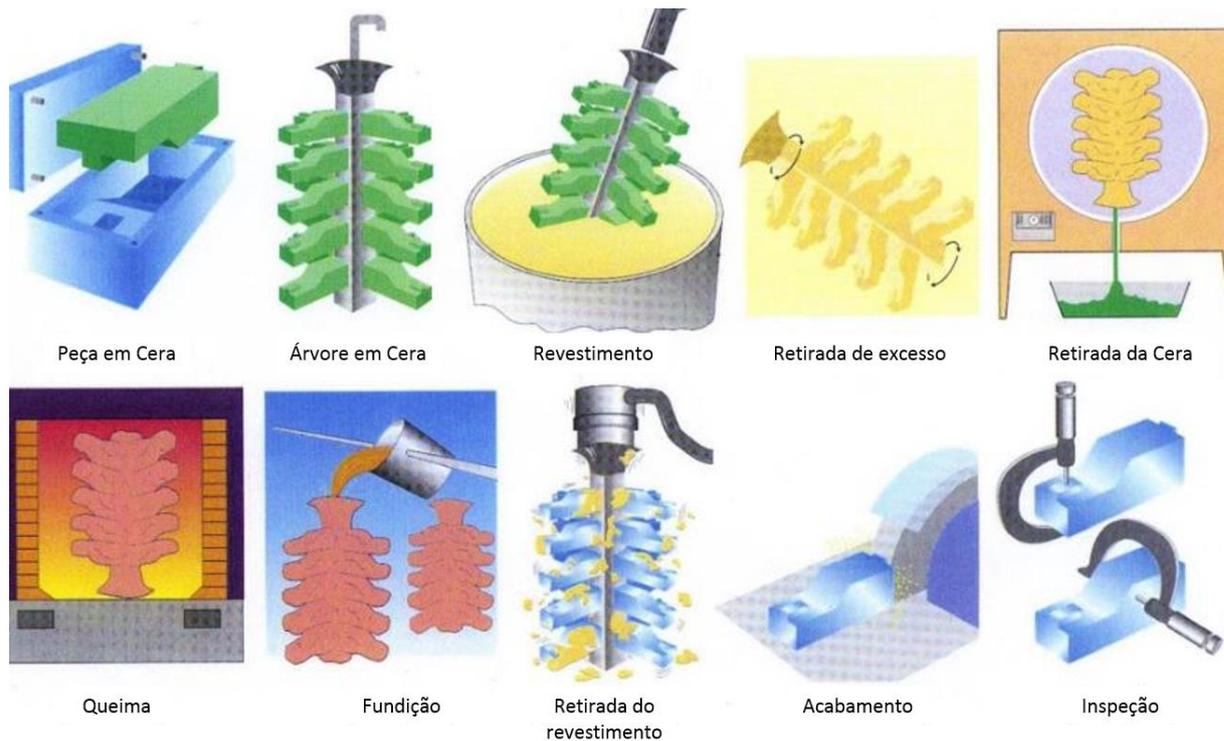
Sias (2005) ainda destaca os seis passos básicos para a fundição por cera perdida.

- Construção do modelo: a construção do modelo poder ser feita com uma série de técnicas diferentes, o modelo em cera é uma peça precisa que contém todos os detalhes do produto final, e pequenos defeitos também serão reproduzidos pois este processo cria uma reprodução precisa do modelo.
- Adição dos canais de entrada: para tornar possível a entrada do metal na cavidade, é necessário criar canais de escoamento que vão do exterior do molde até o modelo, em alguns casos também é necessário criar canais para permitir a saída do ar e dos gases da fundição.
- Revestimento do modelo: o molde para a fundição é obtido revestindo o modelo e canais de adição em cera com um material rígido e que suporta altas temperaturas, geralmente uma casca cerâmica que tem sua composição variada com minerais e

aditivos específicos para cada tipo de fundição. Ela é deixada em um estado entre líquido e pastoso e aplicado no modelo por imersão, criando uma fina camada que posteriormente é queimada para se solidificar e formar o molde.

- **Retirada da Cera:** o molde é colocado de cabeça para baixo em um forno para que a cera derreta e escoe para fora do molde. Posteriormente a temperatura é elevada para que a casca cerâmica endureça e fique resistente. Após a queima o molde é retirado e acomodado em um recipiente com areia em volta para criar apoio e reforçar toda superfície externa.
- **Fundição da peça:** na fundição de peças pequenas, existe uma tendência de o metal se solidificar antes que a cavidade esteja completamente preenchida, ou seja, a força da gravidade aplicada a uma massa pequena de metal não é suficiente para gerar uma pressão que force a saída do ar e dos gases, além das espessuras serem finas e dissiparem mais facilmente o calor do metal fazendo-o solidificar mais rapidamente, então uma força extra é necessária para garantir o correto preenchimento da cavidade. Neste sentido, existem algumas técnicas auxiliares que fornecem essa força extra. As mais comuns são a Centrifugação, onde o metal é forçado para dentro da cavidade pela força centrífuga comum a todo movimento de rotação; e o Vácuo, onde uma bomba suga o ar e gases pela base do molde, permitindo que a pressão atmosférica empurre o metal derretido para dentro da cavidade.
- **Retirada e Acabamento:** a etapa final é a retirada do revestimento do molde e canais de entrada em metal. Na joalheria, depois do preenchimento e resfriamento parcial do metal, todo o conjunto pode ser colocado na água, gerando vapor e bolhas que desintegram o revestimento, liberando a peça fundida. Depois os canais de entrada são separados e a peça final é acabada com limas, lixas e polimento.

Já segundo Kliauga e Ferrante (2009), o processo é composto pelas etapas de fabricação, conforme pode ser visto na Figura 28.

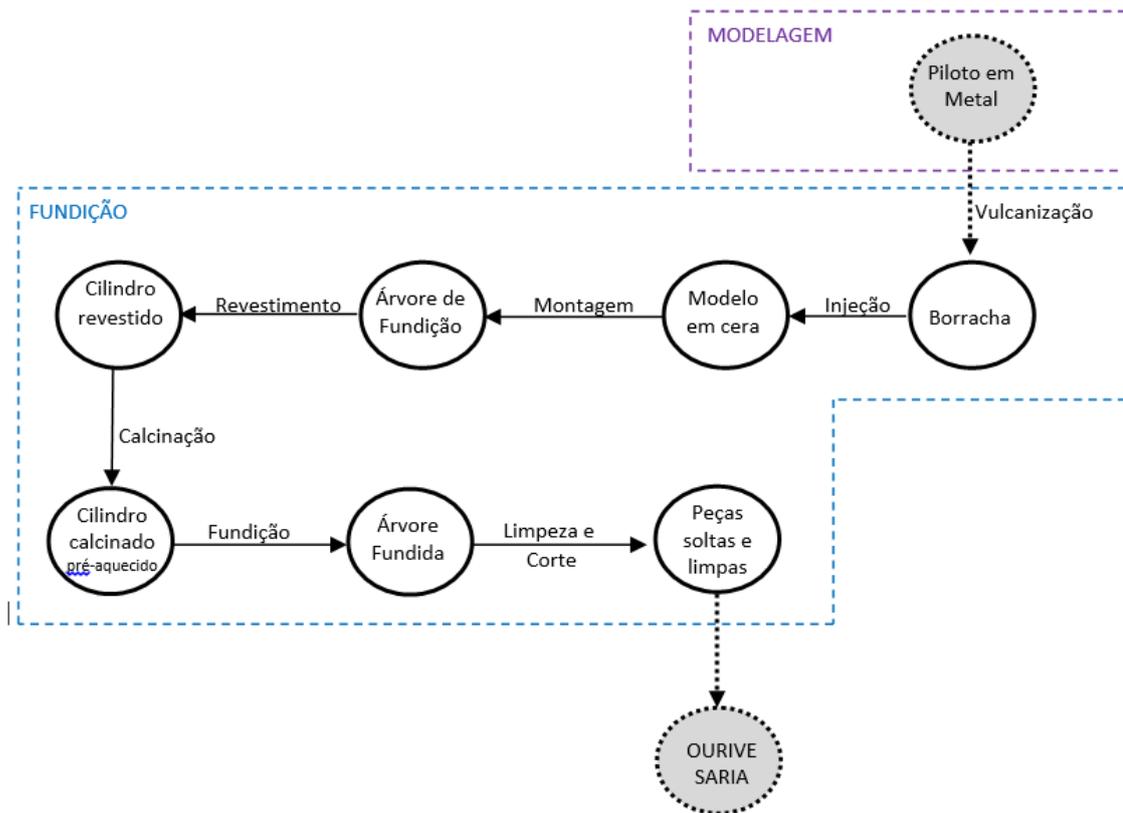


**Figura 28 - Diagrama das etapas do processo de fundição por cera perdida**  
**Fonte: (JADE TRADING, 2011)**

- Peça modelo: pode ser fabricada em diversos materiais e com diferentes técnicas e seu objetivo é construir a geometria da peça a ser transferida para o molde de borracha, portanto, nesta etapa é necessário ficar atento a algumas considerações técnicas de fundição como modelar o canal de passagem do metal junto à peça, detalhes de cantos vivos que prejudicam o escoamento do material, compensações sobre contração de materiais, etc.
- Molde de borracha: a peça modelo é envolvida pela borracha que, após endurecida é cortada em duas partes para a retirada da peça modelo restando a cavidade a ser preenchida. Este molde pode servir para a fundição direta de ligas metálicas de baixo ponto de fusão ou para reproduzir a peça modelo em cera para a fundição em cera perdida.
- Injeção da cera: o objetivo desta etapa criar uma cópia da peça modelo reproduzindo-a pela injeção de cera derretida sob pressão ou com vácuo dentro do molde de borracha. Aqui a principal preocupação gira em torno da formação de bolhas de ar, superfícies ásperas e peças muito pesadas, o que pode impactar nos estágios posteriores.

- Montagem da árvore de fundição: a árvore de fundição consiste na montagem de várias peças em cera em um suporte central também em cera, criando uma estrutura que será posteriormente preenchida de metal fundido, otimizando assim o processo pelo preenchimento de várias peças de uma única vez.
- Preparação do molde cerâmico: geralmente se utiliza gesso e sílica na composição desse molde. Depois da árvore construída, ela serve de modelo para a fabricação de um outro molde, desta vez em material cerâmico para suportar as altas temperaturas do metal fundido.
- Retirada da cera e calcinação do revestimento: após preenchido o molde em gesso, este vai para um forno para que seque e a cera derreta e saía do interior do molde, deixando a cavidade livre para o vazamento do metal.
- Fundição: a fundição pode ser centrífuga ou a vácuo, pois para aumentar a garantia do total preenchimento das cavidades a pressão gerada por esses dois processos ajuda no escoamento da liga metálica fundida.
- Extração do revestimento: depois da fundição da árvore, o revestimento que serviu de molde deve ser retirado. Para isto todo o conjunto é mergulhado em água para que o gesso se desintegre e reste apenas a árvore de injeção em metal já endurecido.
- Separação e acabamento: as peças então são separadas dos canais de alimentação e terem o acabamento realizado como, desbaste de rebarbas, tratamento superficial, polimento, etc.

Conforme (TEIXEIRA, FREESZ e GUERRA, 2014), o processo tradicional de fabricação da joia pode ser dividido em três grandes etapas. A etapa inicial é a modelagem onde se constrói a peça modelo, em seguida vem a etapa de fundição, onde são feitos todos os passos preparatórios para a fundição propriamente dita, e por último a etapa de ourivesaria, onde são feitos os acabamentos, colocação de adornos, tratamentos, etc. O macro fluxo do processo tradicional da fundição por cera perdida pode ser visto na Figura 29.



**Figura 29 - Macrofluxo de Fundição por Cera Perdida**  
**Fonte: (TEIXEIRA, FRESZ e GUERRA, 2014)**

Uma etapa de fundamental importância em todo esse processo é a modelagem, quando é construída a peça modelo para iniciar o processo de fabricação. Esta peça modelo pode ser a própria joia construída artesanalmente em metais nobres, ou em outros materiais como cera ou resinas.

Apesar da longa idade da fundição por cera perdida, a etapa de modelagem não sofreu grandes mudanças, utilizando basicamente as mesmas técnicas artesanais de séculos atrás. As outras etapas do processo de fundição por cera perdida foram sendo desenvolvidas e melhoradas, e com as novas tecnologias e maquinário, possibilitam mais eficiência na reprodução das peças e formas extremamente finas e leves.

As técnicas de conformação, soldagem, corte, cravação, dentre outras ainda são aplicadas na construção do modelo e por ser um trabalho praticamente artesanal, sua qualidade depende diretamente do profissional, seu conhecimento das técnicas e sua experiência. O Modelador, é responsável exclusivamente por esta etapa, e tem grande importância na fundição de joias.

#### 2.2.4. Design na joalheria

Desde os registros dos primeiros adornos utilizados pelo homem até os dias de hoje, a joalheria sofreu muitas influências culturais e estéticas, sofrendo muitas variações de estilos, materiais, formas e acabamentos.

Untracht (1985) acreditava que uma provável abordagem para o design de joias podia ser uma conexão entre a concepção e o processo. Um ponto de partida do projeto podia ser a forma inicial do metal e suas características inerentes, pois eles acabavam por delimitar os processos pelos quais a peça será transformada, bem como quais ferramentas e técnicas seriam aplicadas nessa transformação, assim o autor definia e explicitava uma certa “sequência” de projeto baseada nos processos de transformação que seriam aplicados na fabricação da peça.

A forma do material por si só sugere um processo porque cada forma do metal inspira uma variedade natural de possíveis tratamentos que inspiram o design. Da mesma forma o projeto força as técnicas a se adaptarem e desenvolverem na busca de novas possibilidades, inspirando-as a se modificarem e multiplicarem, gerando novos processos e técnicas (UNTRACHT, 1985, p. 19).

Ainda segundo o autor, alguns exemplos de trabalho em metal ilustram essa ideia. Dos arames surgem os padrões lineares, e as técnicas de forjamento e filigrana; da chapa de metal são trabalhadas as dobras, cortes e penetrações, e quando deformadas, os processos de estampagem e repuxo; dos tubos as peças ocas; dos íons de metal, eletroformagem; grânulos, a granulação; e das massas de metal, todos os tipos de fundição, bem como as técnicas negativas envolvendo a remoção de material como o entalhamento e cravação.

Untracht (1985), cita alguns atributos fundamentais para serem trabalhados no design de joias, especificamente se referindo ao trabalho com metais são eles:

- Contraste: contraste de linhas ou formas, podendo ser positivas ou negativas, de dois materiais diferentes ou cores diferentes.
- Escala relativa: a proporção de tamanho de componentes entre si e da peça em relação ao corpo humano.
- Balanço: simetria ou assimetria.
- Clímax visual: ênfase focal, este é possivelmente outro componente de design que pode ser incluído, contudo não está sempre presente.

Pela alteração da posição, volume ou escala de qualquer um destes componentes, a composição total será resultado da mudança de suas relações. E na exploração dessas características, determinados aspectos provenientes do relacionamento entre os atributos podem se revelar, gerando possibilidades infinitas.

No entanto, toda essa relação entre o projeto e o processo produtivo veio sendo alterada com a evolução das tecnologias de manufatura, que possibilitou uma redução nas restrições na fabricação das peças, especialmente o processo de fundição, trazendo mais liberdade na criação de formas as quais, sem estes avanços, não poderiam ser fabricadas. Processo que criou um certo distanciamento entre o design e as limitações inerentes aos processos de fabricação tradicionais mais característicos da era industrial.

## **IMPRESSÃO 3D E A JOALHERIA**

**3.1 Manufatura aditiva aplicada como Ferramenta de Prototipagem**

**3.2 Manufatura aditiva aplicada na Construção da Peça Modelo**

**3.3 Manufatura aditiva aplicada na Construção das Peças em Cera**

**3.4 Manufatura aditiva aplicada na Fabricação de Peças em Metal**

**3.5 O processo Design com a Manufatura Aditiva**

### **3. IMPRESSÃO 3D E A JOALHERIA**

Segundo Balc e Campbell (2004), as tecnologias aditivas não produziam com velocidade e em vários materiais capazes de atender grande parte dos requisitos da indústria, elas não conseguiam competir com as subtrativas, especialmente na fabricação de moldes e modelos, aplicações nas quais eram mais empregadas, onde os processos convencionais como modelagem e fundição ainda eram os únicos meios disponíveis para atingi-los.

No entanto, com a evolução dos processos de manufatura aditiva, as tecnologias foram aos poucos sendo capazes de atender aos requisitos da joalheria.

Inicialmente a impressão 3D foi aplicada como ferramenta de prototipagem, pois trazia os benefícios da eliminação do trabalho manual na construção da peça modelo, garantindo maior padronização e fidelidade.

Posteriormente novas tecnologias de impressão em cera foram desenvolvidas e aplicadas na joalheria, o que passou a eliminar outra etapa da fabricação tradicional, a construção dos moldes de borracha e a injeção de cera para fabricação das peças em cera para montagem da árvore de fundição.

Por último, com o desenvolvimento das novas tecnologias de impressão em metais, todo o processo convencional de fundição por cera perdida pode ser eliminado e assim, toda a grande quantidade de trabalho manual necessário no processo tradicional.

#### **3.1. Manufatura aditiva aplicada como Ferramenta de Prototipagem**

Engenharia e manufatura eram os campos que mais utilizam as tecnologias de manufatura aditiva (AM), mais usualmente denominadas de prototipagem rápida, pois as aplicações mais comuns eram a prototipagem de modelos conceituais para avaliação e execução de diferentes testes. A utilização da prototipagem rápida foi aceita de maneira mais evidente nos segmentos que demandavam um rápido desenvolvimento de produto e introdução no mercado, altos níveis de personalização ou onde existia limitações técnicas e onde os custos não eram impeditivos. A indústria joalheira se encaixa nessas características por demandar alta variedade de modelos fabricados em pequenas séries de novas coleções que são

constantemente criadas, mas especialmente pelas peças serem de pequeno tamanho, o que causa pouco impacto no custo de confecção do protótipo.

Segundo Adler e Fryé (2006), a inserção das tecnologias de prototipagem rápida na fabricação de modelos trouxe novos paradigmas para o projeto e a fabricação de joias. Não apenas pela tecnologia em si, mas também pela aplicação de ferramentas de modelagem e manufatura auxiliada por computador que foram sendo inseridas no contexto da joalheria.

Hohkraut (2010) cita que durante a fase de desenvolvimento, a comunicação é ponto fundamental para o bom andamento do projeto e, o processo de design precisa transmitir o produto conceituado para a equipe, com o objetivo de fazer análises, considerações, ajustes, bem como construir a peça. As peças com mais detalhes eram muito difíceis de serem representadas no papel, e exigiam uma enorme quantidade de desenhos para que fossem compreendidas e executadas. Até então, as representações bidimensionais eram a única forma de comunicar a forma da peça com a equipe de desenvolvimento e, frequentemente, o designer era o único que entendia exatamente o que ele queria e gastava muito tempo esclarecendo os detalhes para a pessoa que construiria o modelo.

Com as ferramentas computadorizadas de modelagem, as dificuldades da representação de uma peça tridimensional em um meio bidimensional não existem, pode-se criar um modelo virtual conforme o conceito pensado e transmitir, muito mais facilmente, seu entendimento à toda equipe de desenvolvimento.

Softwares de modelagem paramétrica, permitem uma grande precisão e controle sobre a forma da peça, além de fazer modificações de maneira simples à medida que o projeto evolui. As muitas correções e ajustes são feitos apenas modificando alguns parâmetros no software, o que proporciona uma interação cooperativa durante o refinamento do produto, agilizando todo o desenvolvimento.

Hohkraut (2010) destaca que as tecnologias 3D permitiram um aumento significativo das vantagens para o design, desenvolvimento e realização no campo da joalheria. Com o auxílio da modificação interativa, pode-se fazer um gerenciamento para encurtar o tempo de desenvolvimento, aumentar a qualidade do produto e implantar um facilitado processo de desenvolvimento em si, possibilitando trabalhar mais rápido e eficientemente. A visualização

permite uma melhor e mais fácil comunicação com os clientes, consumidores em potencial e enriquece os meios de divulgação e a marca.

No entanto, apenas a iteração em ambiente virtual não é suficiente para uma adequada percepção dos atributos formais do produto. Um dos problemas é que não se tem a noção real das dimensões, então a impressora 3D pode ser utilizada como ferramenta materializadora do objeto, possibilitando o contato direto com um protótipo para avaliação e testes de diferentes tipos como, dimensional, percepção da forma, todos visando antever possíveis problemas como, resistência e definição de espessuras, percepção e sensação do objeto pelos consumidores finais, dentre outros.

Os softwares de renderização computadorizada também foram incorporados ao processo de desenvolvimento, especialmente pela capacidade de simular as condições específicas dos ambientes de aplicação dos produtos como o brilho, luminosidade, bem como as características dos materiais aplicados como texturas, cores, reflexos, brilho, criando representações realistas dos modelos virtuais, permitindo que o resultado final possa ser visualizado antes mesmo de qualquer construção. Como na joia os aspectos estéticos têm uma grande importância, este tipo de ferramenta auxilia na tomada de decisão e nas modificações para melhoria estética da peça.

### **3.2. Manufatura aditiva aplicada na Construção da Peça Modelo**

Devido a característica particular do processo de fundição por cera perdida ser baseado em uma peça modelo inicial, os protótipos feitos em impressora 3D logo foram aplicados como peça modelo para a fundição, esta foi uma transição natural pois bastava simplesmente utilizar o protótipo, geralmente feito para avaliação, como modelo para fazer o molde em borracha para ser replicado em cera.

O trabalho de construção do modelo da joia através da manufatura aditiva foi gradualmente ganhando espaço no segmento conforme os custos do maquinário, insumos e tempos de processo foram sendo diminuídos (BENZ, 2009).

No entanto, outro ponto de fundamental importância para a consolidação de sua utilização no segmento foi o desenvolvimento técnico das tecnologias de impressão 3D, com destaque

para a precisão das máquinas. Demandas específicas do segmento joalheiro como a fabricação de peças pequenas com detalhes minúsculos, demandam precisão na construção da peça modelo, também a questão da economia nos materiais aplicados na joia, especialmente os metais preciosos, o que gera uma alta demanda por alívios de material, além da necessidade cada vez maior de gerar produtos esteticamente diferenciados levando a uma exploração de formas cada vez mais complexas e detalhadas.

Nesse contexto, um processo de manufatura aditiva em particular se destaca, o processo de projeção de luz digitalmente processada. Segundo Wallace et al. (2014), a precisão das máquinas com projetores com processamento digital de luz ou DLP (*Digital Light Processing*) é enorme, gerando formas e detalhes mais controlados e com mais precisão do que nunca foi conseguido com as técnicas manuais. Com a precisão dos detalhes é possível obter superfícies e espessuras mais uniformes que permitirão um fluxo de fundição melhor, peças mais precisas que com montagens mais ajustadas.

A Figura 30 mostra um esquema de funcionamento do processo DLP comparando-o com a Estereolitografia, primeiro processo de manufatura aditiva desenvolvido comercialmente.

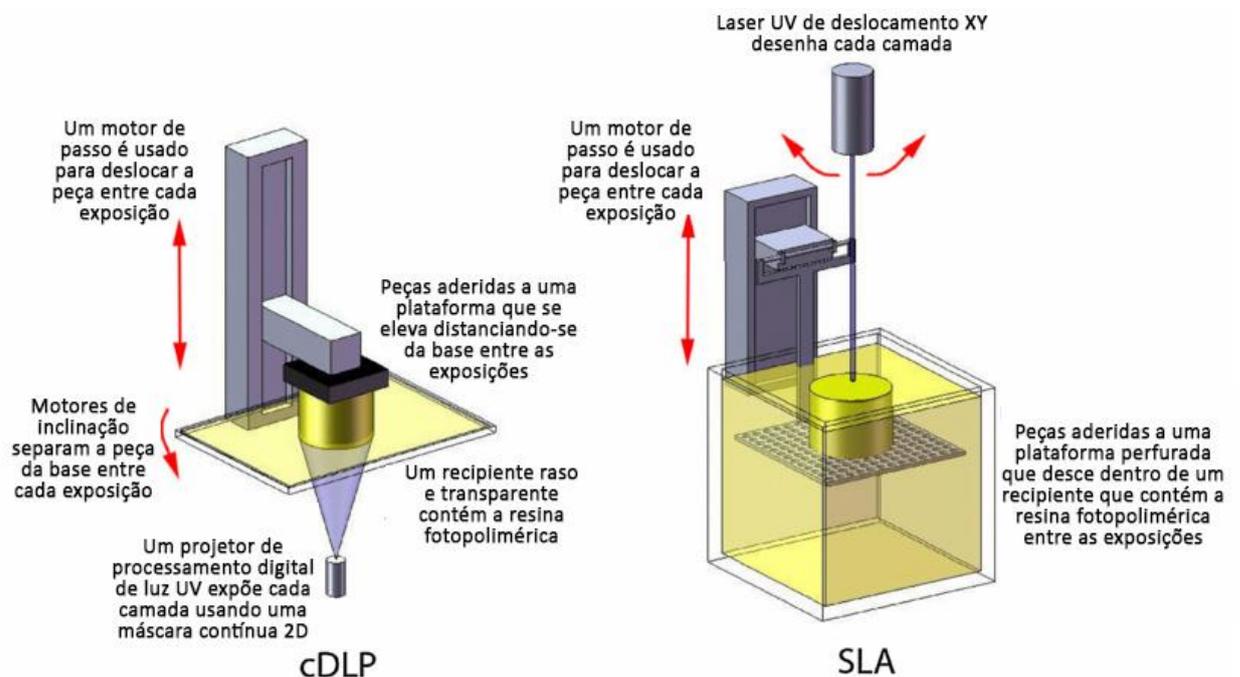
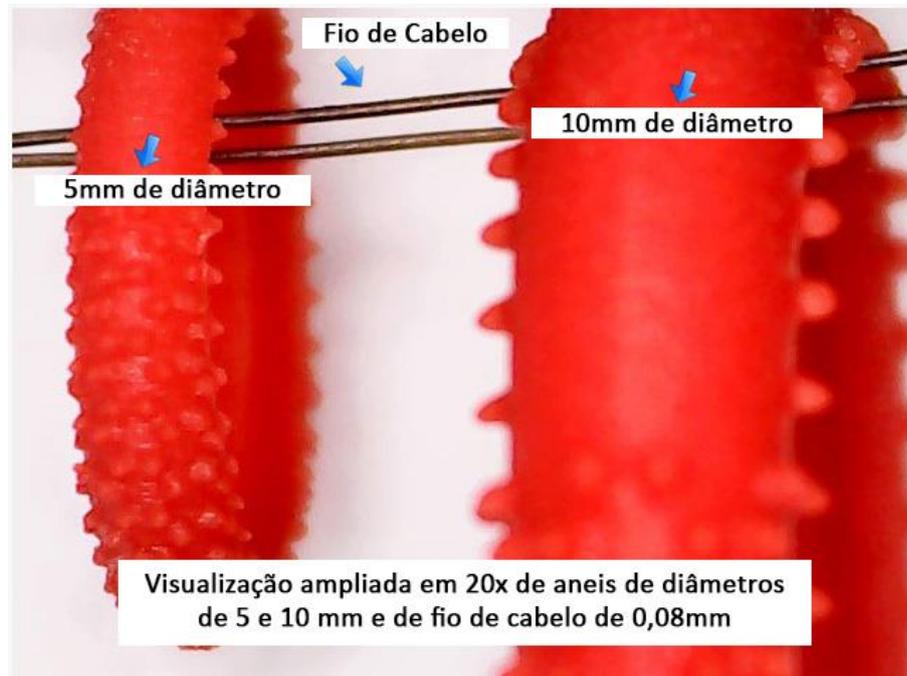


Figura 30- Esquemas de funcionamento de impressoras DLP e SLA  
Fonte: (WALLACE, et al., 2014)

No processo DLP a precisão é tão grande que as tolerâncias podem chegar a ser menores que  $50\mu\text{m}$  (micrômetros). Na verdade, atualmente existem impressoras DLP que tem resolução de  $25\mu\text{m}$ , o que permite a impressão de detalhes minúsculos conforme pode ser visto na Figura 31.



**Figura 31 - Foto ampliada de anéis fabricados em processo DLP**  
Fonte: (KUDO3D, 2014)

A modelagem tradicional tem um caráter bastante manual e demanda muitas horas de trabalho, dependendo fortemente da técnica e habilidade do modelador, profissional responsável pela construção da peça modelo. A natureza manual desse processo pode ser observada na Figura 32.

A impressão 3D aplicada na fabricação da peça modelo também traz vantagens em relação a modelagem manual como a capacidade de construção de formas complexas que seriam muito difíceis de ser feitas manualmente, esta complexidade também não interfere diretamente no tempo e, portanto, no custo de construção. A Figura 33 apresenta um anel onde podem ser observadas algumas dessas vantagens citadas.



**Figura 32 - Imagens de modelagem de anel feita em cera**  
**Fonte: (ESPAÇO RITA SANTOS, 2014)**

Outros pontos a serem destacados são a fidelidade de replicação da peça, além de sua construção não depender diretamente da habilidade técnica e experiência do modelador. Com o processo automatizado tem-se uma maior segurança na confecção de peças iguais com quase nenhuma variação entre os diferentes lotes, bem como a padronização conseguida com o processo automatizado realizada por uma máquina.



**Figura 33 - Anel fabricado em resina por manufatura aditiva**  
**Fonte: (ENVISIONTEC, 2014)**

A modelagem manual varia de acordo com a complexidade da peça modelo, ou seja, quanto mais complexa a forma, mais etapas e mais tempo gasto serão necessários para sua realização. Ela pode ser feita em diversos materiais, os mais comuns são a prata e a cera. Na prata o processo é similar a fabricação artesanal de uma joia e utiliza as técnicas descritas no item 2.2.2 desta dissertação, no entanto, as técnicas artesanais têm limitações para reproduzir algumas formas e o mais comum é confeccionar a peça modelo em cera. Neste caso ela não pode ser utilizada diretamente para fazer o molde de borracha pois não suporta o calor aplicado na vulcanização. O modelo de cera é utilizado na fundição de uma única peça em metal que servirá como peça modelo e será aplicada para criar a cavidade do molde de borracha.

### **3.3. Manufatura aditiva aplicada na Construção das Peças em Cera**

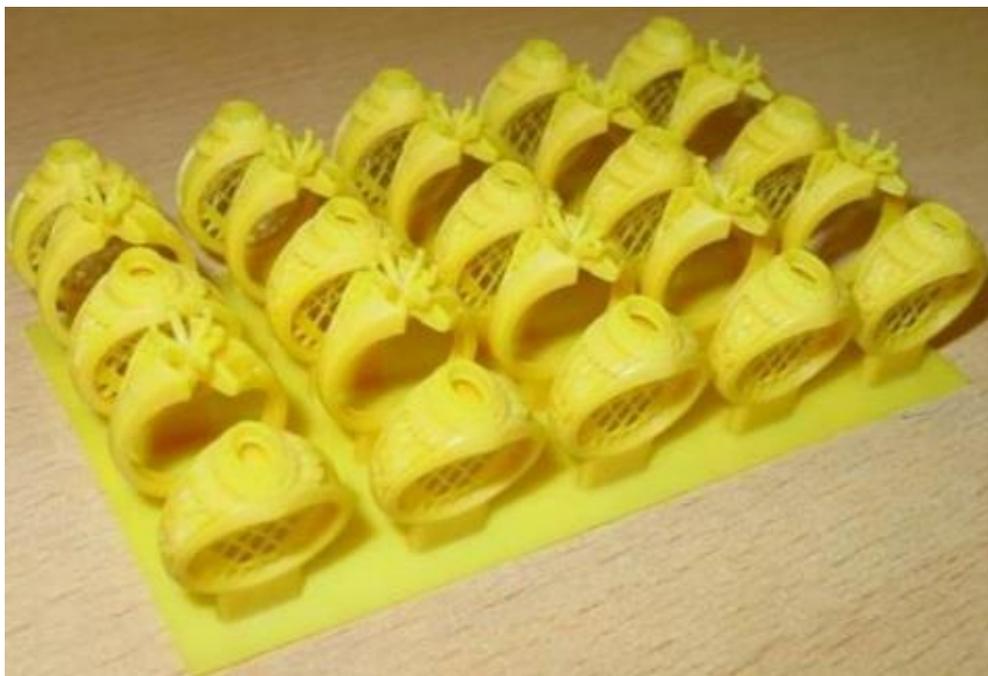
No processo tradicional de fundição por cera perdida, o próximo passo após a confecção da peça modelo é a sua replicação através de uma injetora de cera e um molde de borracha para que se tenha a quantidade de peças suficientes para montar a árvore de fundição.

Além da construção da peça modelo em manufatura aditiva, peça geralmente feita em resina, também já é possível fabricar toda a série de fundição diretamente em cera, substituindo o trabalho de replicação tradicional, ou seja, boa parte do trabalho manual que era requerido na injeção das peças em cera pode ser substituído por um processo automatizado. A Figura 34 mostra um bracelete prototipados diretamente em cera, em azul, e posteriormente fundido em prata, exemplo de aplicação da peça modelo em cera diretamente na fundição.



**Figura 34 - Bracelete em cera fabricado em manufatura aditiva e posteriormente fundido em prata**  
Fonte: (SOLIDSCAPE, 2014)

De acordo com a capacidade da impressora 3D, também é possível fabricar toda uma série de peças em cera para serem aplicadas na árvore de fundição, como os anéis vistos na Figura 35.



**Figura 35 - Anéis feitos em cera para fundição fabricados em manufatura aditiva**  
Fonte: (ENVISIONTEC, 2014)

No processo tradicional seria necessário construir um molde de borracha a partir da peça modelo, trabalho geralmente manual que possui vários cuidados e demanda experiência e técnica do modelador. Parte deste trabalho pode ser visualizado na Figura 36, que mostra algumas etapas e técnicas manuais para a fabricação do molde de borracha e a injeção das peças em cera para montagem da árvore de fundição.



**Figura 36 - Etapas e técnica de construção de molde de borracha e injeção de peças em cera**  
Fonte: (EOS, 2015)

### **3.4. Manufatura aditiva aplicada na Fabricação de Peças em Metal**

A etapa de fundição do processo por cera perdida, como as etapas anteriores de injeção das peças em cera e construção da peça modelo, também é composta de muitos processos e também demanda grande quantidade de trabalho manual

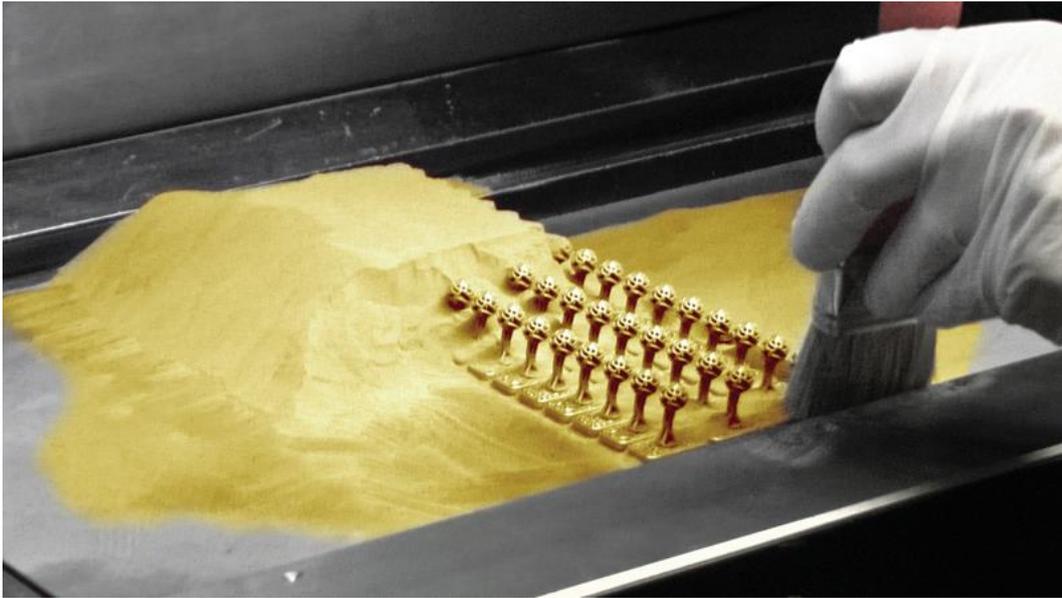


**Figura 37 - Etapas e técnicas para construção do molde, fundição, separação e limpeza das joias.**  
**Fonte: (GANOKSIN, 1996)**

O último momento de inserção da manufatura aditiva na joalheria foi a fabricação direta da peça já em metal, a técnica que rompe com a necessidade da fundição e vem gradativamente se tornando mais viável economicamente.

O desenvolvimento de máquinas para manufatura aditiva tem focado em soluções cada vez mais específicas. Já existem impressoras desenvolvidas para produzir estritamente com metais preciosos com principal foco no segmento joalheiro.

Segundo Snyder (2014), tecnologias que estavam disponíveis para outras indústrias como aeroespacial e naval foram adaptadas para as demandas específicas da joalheria, como a necessidade de excelente acabamento superficial e baixíssima perda de material. A Figura 38 ilustra a retirada da máquina de uma série de peças fabricadas em ouro por manufatura aditiva e a Figura 39 mostra o acabamento superficial das peças feitas na impressora de derretimento por laser.



**Figura 38 - Peças em ouro fabricadas em manufatura aditiva sendo retiradas da máquina**  
Fonte: (SNYDER, 2014)



**Figura 39- Peças fabricadas em ouro por manufatura aditiva**  
Fonte: (SNYDER, 2014)

Segundo Strauss (2013), há um grande interesse na manufatura aditiva de metais preciosos na joalheria, relojoaria e odontologia. A manufatura direta de peças funcionais em metal é feita com materiais de engenharia tradicionais como aços, ligas de titânio, cromo-cobalto, etc., no entanto a manufatura direta de ligas de metais preciosos possui requisitos específicos

e desafios únicos. Por exemplo, o acabamento superficial das peças é crítico; o tamanho e tipo de máquina podem afetar fortemente o custo; e a cadeia de suprimentos de pós metálicos está na sua infância.

Apesar de existirem no mercado diversos fabricantes que desenvolvem e comercializam impressoras 3D para metais com diferentes nomenclaturas, o processo utilizado é conceitualmente o mesmo, ou seja, todos eles funcionam com um feixe de laser direcionado em uma cama de pó de metal que vai processando seletivamente as áreas de cada camada do modelo tridimensional, processo citado no item 2.1.5.3 desta dissertação.

No entanto, no caso específico de trabalhar com pós metálicos, existem algumas particularidades que precisam ser observadas.

A primeira e mais significativa delas se refere à densidade do material depois de processado, esta característica depende de vários fatores sendo os mais importantes a potência do feixe de laser aplicado e o tipo de pó, que pode ser de um único metal ou uma liga metálica.

Kruth, *et al* (2004) expõe algumas classificações para o processamento do pó metálico por feixe de laser de acordo com os diferentes tipos de ligação entre as partículas. Segundo seu estudo, o pó metálico pode ser parcialmente ou completamente fundido.

Basicamente o processo que funde parcialmente o metal é chamado comercialmente de Sinterização Direta de Metal por Laser ou *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), e o processo que trabalha com a fusão completa é chamado Derretimento por Laser Seletivo ou *Selective Laser Melting* (SLM).

No primeiro, a sinterização não derrete completamente o pó metálico, trabalhando com temperaturas que variam entre 50 a 100% da temperatura de fusão, o pó metálico é aquecido até o ponto em que aconteça uma ligação pelo contato entre as partículas adjacentes, ou seja, o pó se une por uma fundição no nível molecular. Este método permite a utilização de uma grande variedade de ligas metálicas, também permite um controle sobre a porosidade final do material. Já no caso da fusão completa as partículas são liquefeitas e aderidas formando uma massa homogênea de um único metal com um único ponto de fusão (KRUTH, *et al.*, 2004).

Os dois processos são muito parecidos, ambos utilizam um feixe de laser para gerar calor e sinterizar ou fundir um pó metálico depositado em forma de cama, camada por camada. Ambos trabalham em câmaras isoladas preenchidas com um gás inerte para criar um ambiente sem oxigênio e evitar que o metal oxide durante a transformação.

Ambas impressoras seriam capazes de realizar o trabalho uma da outra. As pequenas diferenças então, seriam uma forma de limitar cada máquina para um tipo restrito de trabalho específico, para separar processos protegidos por patentes diferentes para que não infrinjam os direitos de outro fabricante. Ou seja, se você vai trabalhar com ligas metálicas provavelmente irá utilizar o DMSL, e se trabalhar com um metal puro, utilizará o SLM.

Podemos dizer que, as principais empresas referência em maquinário de manufatura aditiva em metal são a EOS (2015), ConceptLaser (2015), Realizer (2015) e SLM Solutions (2015) e, apesar de destacarem em seus sites nomes diferentes para suas tecnologias, todas se baseiam no método com feixe de laser aplicado sobre uma cama de pó metálico.

Segundo Hötter, Fateri e Gebhardt (2013) a impressão 3D de peças em metal ainda não se tornou uma aplicação acessível à maioria das pequenas e médias empresas, no entanto ela vem sendo cada vez mais necessária para garantir a sobrevivência destas empresas. Especialmente onde a demanda por produtos personalizados é característica do mercado, se torna grande a necessidade de incorporar este processo como fator de competitividade, além de abrir novas possibilidades para o design e a fabricação, como no caso da área dental e joalheria.

Neste contexto, novas impressoras de metal com preços mais acessíveis vêm sendo desenvolvidas para atender a esta oportunidade na manufatura aditiva, equipamentos desktop como o Realizer SLM50, estão sendo ofertados por preços até cerca de um terço dos concorrentes de chão de fábrica, para fabricação de peças pequenas em ligas metálicas como cobalto-cromo (CoCr) e prata.

A Figura 40 mostra uma peça de geometria complexa bem como o acabamento superficial conseguido com processos posteriores como eletro deposição e polimento, fabricada em ouro em uma impressora 3D de processo baseado em cama de pó metálico e sinterização ou derretimento por feixe de laser.



**Figura 40 - Pingente do designer Lionel T. Dean feito em AM com ouro 18 quilates  
Fonte: (FUTURE FACTORIES, 2014)**

### **3.4.1. Forma e Geometria**

Na joalheria, apesar do enorme conhecimento e técnicas acumuladas, não havia sido possível criar geometrias complexas e, mesmo que fosse possível realizar tais formas no nível do projeto ou protótipo, seria impossível fazer a replicação usando o molde de borracha tradicional, pela complexidade dos ângulos de saída da geometria da peça (HOHKRAUT, 2010).

Portanto, sem dúvida, uma das mais importantes contribuições para a joalheria é a possibilidade produção de formas orgânicas complexas e sofisticadas diretamente em metal sem tantas preocupações com questões técnicas de execução tais como, tamanhos dos canais para um perfeito escoamento do metal fundido, criação de respiros para garantir que não se formem bolhas, dentre outras. Formas assim seriam impossíveis de serem realizadas antes da chegada das impressoras 3D apenas com o processo de fabricação tradicional por fundição (HOHKRAUT, 2010). Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 41.



**Figura 41 - Imagens de esculturas com geometria complexa fabricadas em manufatura aditiva**  
Fonte: (GROSSMAN, 2014)

Muitas inovações também vêm sendo feitas também na área de softwares, para aplicação em conjunto com a impressão 3D, eles também estão se tornando cada vez mais específicos, direcionados para aplicações restritas. Alguns softwares de modelagem baseados em fractais, padrões geométricos e algoritmos matemáticos, já estão sendo desenvolvidos com o objetivo de facilitar a criação de formas complexas muito difíceis de ser modeladas virtualmente apenas com ferramentas de modelagem padrão.

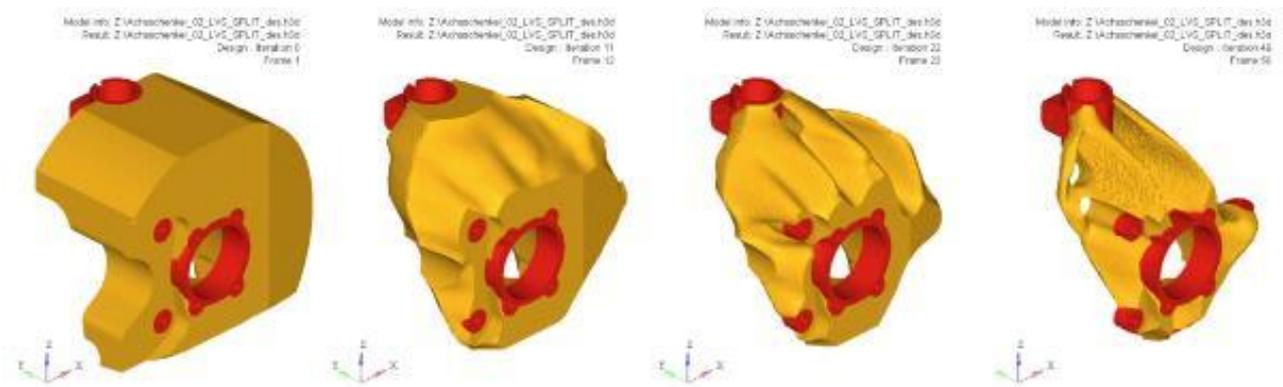
Um exemplo é descrito por Wannarumon (2010), que propõe uma ferramenta computadorizada para automatizar a geração de formas artísticas usadas no design de joias denominado Gerador de Formas Artísticas para a Joalheria ou *Jewelry Art Form Generator* (JAGF) que exibe as formas utilizando um processo de iteração fractal, bem como um avançado sistema de algoritmo e lógica que, juntamente com um módulo de construção de modelos, é integrado ao software de modelagem, fornecendo ao designer a opção de materialização do modelo através de usinagem CNC ou Manufatura Aditiva.

### **3.4.2. Topologia**

Atzeni e Salmi (2012) citam que uma notável redução de custos nas peças de metal fabricadas em impressoras 3D em comparação com processos tradicionais de fundição como a cera

perdida, pode ser obtida com a modificação da forma do objeto tendo em vista uma otimização na utilização da matéria prima através das capacidades da manufatura aditiva.

Atualmente existem softwares que tem por objetivo fazer uma otimização na forma da peça através de análises topológicas para que esta utilize o mínimo de material necessário ao seu funcionamento. Um deles é o software Altair OptiStruct que possui a funcionalidade de otimização topológica automática da geometria da peça em função dos esforços a que ela será submetida, e parte do processo pode ser visto na Figura 42.



**Figura 42: Sequência de imagens de processo de otimização topológica do software OptiStruct**  
Fonte: (ALTAIR ENGINEERING INC, 2015)

Na Figura 43 pode-se ver uma peça otimizada já fabricada em metal por um processo de manufatura aditiva.



**Figura 43: Componentes aeroespaciais topologicamente otimizados, pela Universidade de Loughborough, fabricada pelo processo SLM em liga de titânio (Ti/6Al/4V).**  
Fonte: (BROOKES, 2014)

### 3.4.3. Área de Impressão

Na manufatura aditiva, apesar de se ter muito menos restrições que os processos de fabricação tradicionais, algumas considerações intrínsecas ao tipo de sistema devem ser observadas para a configuração da fabricação das peças. Geralmente se as peças a serem fabricadas têm formas mais simples, mais componentes podem ser fabricados por ciclo, já se têm formas mais elaboradas e complexas, tendem a ter menos peças fabricadas por ciclo.

Outra questão também presente em quase todos os processos de AM se refere ao posicionamento das peças e localização dos suportes de material. Dependendo da intenção, pode-se posicionar os produtos e criar diferentes tipos de suportes de material como pode ser visto na Figura 44.

De um lado, 40 anéis podem ser fabricados ao mesmo tempo em uma placa relativamente pequena, pois foi aplicada uma distribuição que visa a produtividade, porém com um posicionamento das peças que necessita de mais suportes de material, e assim mais processamento pós impressão. Por outro lado, na mesma área foram dispostos apenas 9 anéis com geometria ligeiramente mais complexa, fabricados simultaneamente e assim evidenciando uma disposição menos produtiva, porém que necessita de menos suportes de material reduzindo a necessidade de limpeza e acabamento.



**Figura 44: 40 anéis em metal precioso feitos simultaneamente em uma só etapa à esquerda, e anéis mais complexos em lotes menores, porém com menos suportes de material à direita.**  
Fonte: (BROOKES, 2014)

Outro ponto que pode ser trabalhado na manufatura aditiva é a fabricação de produtos já montados, onde os componentes são fabricados simultaneamente já na posição em que

seriam encaixados para formar o conjunto. Um exemplo pode ser visto na Figura 45, que mostra um colar composto de diversas peças encaixadas fabricado em uma única etapa e excluindo a etapa de montagem das partes presente na maioria dos processos tradicionais de fabricação.



**Figura 45:** Colar em liga de titânio criado pelo designer Carrie Dickens feito em uma única etapa por manufatura aditiva.

Fonte: (BROOKES, 2014)

#### **3.4.4. Mercado Pós Metálicos**

Segundo Monteiro, Krucken e Lana (2014), apesar da manufatura aditiva estar sedimentada na indústria joalheira, as tecnologias utilizadas comercialmente ainda estão concentradas apenas na etapa de construção da peça modelo, e outras etapas mais avançadas do processo de fundição por cera perdida ainda não têm viabilidade econômica. Além disso, o mercado de suprimentos para manufatura aditiva de joias ainda é incipiente, e existem poucos fornecedores de matéria-prima e, de uma forma geral, os fabricantes de maquinário criam mecanismos de trava nas suas máquinas para que elas sejam incapazes de utilizar materiais de outros fornecedores.

Brookes (2014), cita que a indústria da metalurgia em pó ainda tem baixa representatividade no mercado e não se popularizou se comparada aos plásticos. Ela está sendo lenta em entender a revolução da manufatura aditiva e não seria uma surpresa que dentro de alguns anos o processo de derretimento de pós de metais por feixes laser ainda seja uma pequena

parte de uma indústria aditiva global. Ainda segundo o autor, no entanto, as soluções e técnicas apresentadas com metais são bastante relevantes, com muitas novidades e inovações, especialmente para a manufatura digital direta e com destaque para a liga de titânio Ti/6Al/4V de baixa densidade, alta temperatura e alta resistência, além de outras ligas metálicas. A Figura 46 mostra algumas peças de metal feitas em manufatura aditiva diretamente para o uso.



**Figura 46: brincos e anel fabricados por manufatura aditiva.**  
**Fonte: (BROOKES, 2014)**

Todas essas tecnologias de impressão em metal causam mudanças no cenário da joalheria, trazendo diversas vantagens se comparadas aos processos tradicionais. A impressão direta do produto em metal possui características desejáveis na fabricação de joias e que podemos destacar.

#### **3.4.5. Vantagens da Fabricação Digital Direta (FDD)**

Segundo Rosen (2014), devido à sua natureza aditiva, a AM possui vários recursos exclusivos que permitem que produtos tenham seu desempenho significativamente melhorado, para executar múltiplas funções, para serem personalizados e para serem fabricados com baixos custos gerais. Algumas capacidades são: praticamente qualquer forma pode ser fabricada; características podem ser fabricadas em várias escalas; o material pode ser depositado e/ou processado diferentemente em diversos pontos ou camadas o que permite peças com múltiplos materiais; e mecanismos, incluindo atuadores e sensores podem ser embutidos diretamente na fabricação.

Ainda segundo o autor, a AM pode ser interessante para o designer por uma razão muito simples, colocar material onde quiser, tudo que ele tem a fazer é definir onde o material é necessário. Isto abre uma ampla gama de espaços de design a serem explorados e várias oportunidades de pesquisa ainda serão identificadas.

Assim, a fabricação digital direta de peças de metal aplicada na indústria joalheira traz diversas vantagens e uma das principais é a eliminação de todas as etapas presentes no processo de fundição por cera perdida, além de outros pontos que merecem ser destacados conforme segue:

- Manufatura digital direta a partir de um modelo virtual 3D elimina todo trabalho das etapas anteriores presentes no processo de fundição por cera perdida.
- Liberdade na criação da geometria permitindo a fabricação de formas extremamente complexas que beneficiam muito a criação de joias.
- Possibilidade de aplicação da tecnologia para manufatura de itens de série como também itens personalizados em série.
- Alta qualidade na superfície sem a percepção das camadas no produto impresso nem distinção entre trabalho do ourives tradicional
- Permite uma redução do material gasto devido à definição de cavidades e estruturas entrelaçadas e colmeias.
- Tecnologia sustentável que aplica material apenas onde é necessário e o pó não utilizado é inteiramente reaproveitável em novos trabalhos sem nenhuma perda
- A complexidade não interfere diretamente no custo da peça, ou seja, no tempo ou quantidade de material gastos.
- Não necessita de desenvolvimento de ferramental específico para cada peça.
- As peças fabricadas têm até 99% da densidade do metal maciço e propriedade quase iguais ao metal tradicionalmente processado.
- As peças podem ser posteriormente trabalhadas por qualquer outro método, como acontece com aquelas fabricados convencionalmente. Como por exemplo usinagem, eletrodeposição, eletroerosão, dentre outros.
- Tecnologias com recursos que garantem a redução das tensões internas e controle da deformação e dimensões da peça.

- Capacidade de utilização de metais puros ou ligas metálicas o que permite escolha de materiais adequados a cada aplicação.

### **3.5. O processo Design com a Manufatura Aditiva**

Hague, Campbell e Dickens (2003) pontuam que durante as últimas décadas, designers têm sido educados para desenvolver produtos com geometrias restritas que resultam e peças fáceis de fabricar. Os autores consideram que a introdução da manufatura aditiva trará diversos efeitos sobre o design, destacando que tanto os métodos de design específicos quanto os gerais irão mudar, basicamente pelo fato da geometria deixar de ser limitadora da fabricação.

Benz (2009), trata dessa mudança do processo de design no segmento joalheiro. Sua abordagem, no entanto, tem foco mais nas mudanças pela introdução das ferramentas digitais de apoio ao projeto do que na impressão tridimensional em si. Seu estudo também é restrito ao processo de desenvolvimento de um novo modelo, comparando o modelo de atuação tradicional do designer antes da inserção das tecnologias digitais, conforme mostrado no fluxograma apresentado na Figura 47.

O processo proposto por Benz insere etapas relacionadas à utilização de ferramentas computadorizadas e manufatura aditiva no processo de desenvolvimento tradicional da joalheria citado por Wannarumon. Na figura, pode-se observar que a impressão 3D entra especificamente como ferramenta de prototipagem, a primeira função da tecnologia no processo de desenvolvimento e, não aborda seus outros momentos na fabricação de joias.

Algumas metodologias focadas no design para a manufatura aditiva começam a surgir, Rosen (2007) cita que novos métodos CAD devem ser desenvolvidos para adequar o design aos avanços tecnológicos e apresenta um método nomeado Design para Manufatura Aditiva (*Design for Additive Manufacturing - DFAM*). Método proposto para contemplar a modelagem, as especificações das peças, o planejamento do processo e a simulação da fabricação no qual são tratados processos conceituais, seleção de processos, estágios posteriores de design e design para manufatura, se baseando em um modelo sequencial de processo, estrutura, propriedade e comportamento, comum ao design de materiais, conforme pode ser visto na Figura 48.

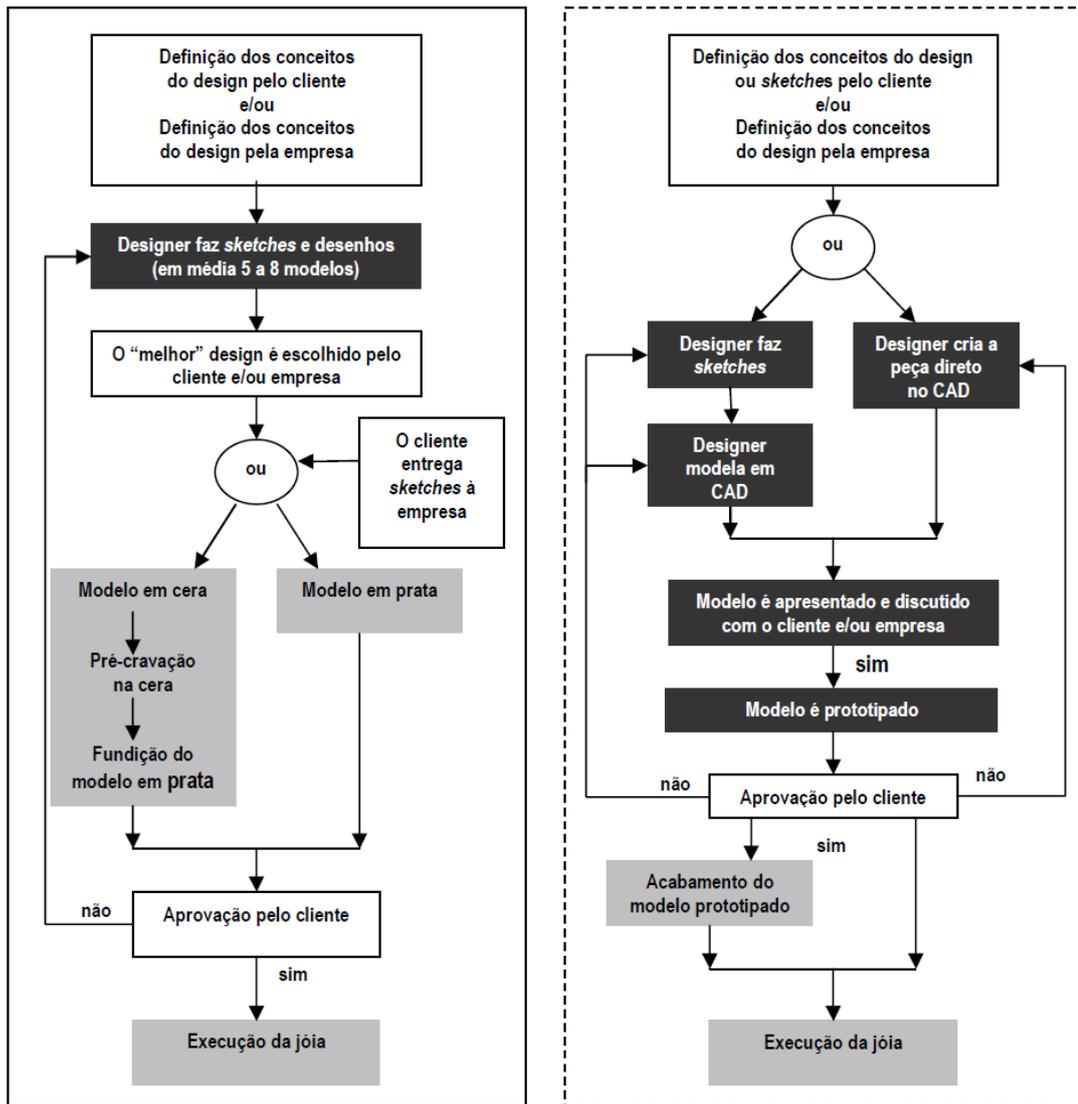


Figura 47 - Processo de design na fabricação tradicional e na fabricação com Prototipagem Rápida  
 Fonte: (BENZ, 2009, p. 85) e (WANNARUMON e BOHEZ, 2004, p. 570)

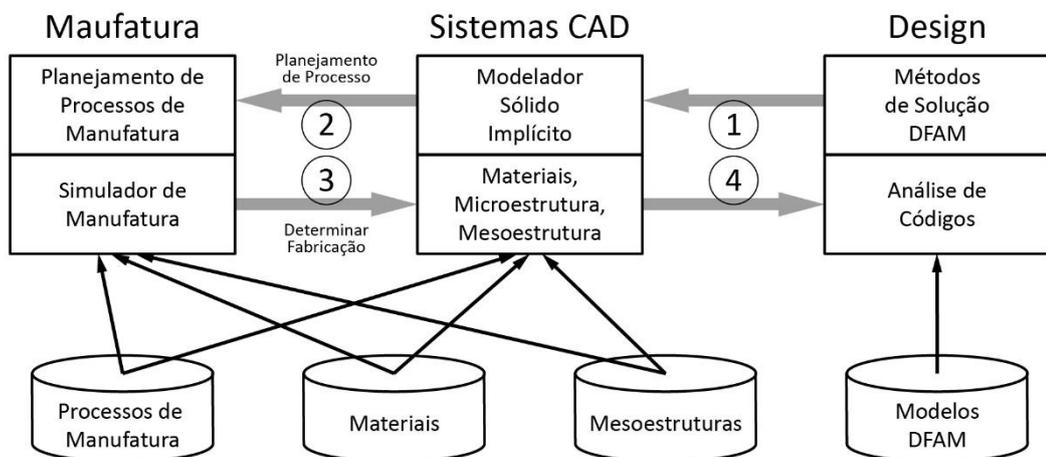
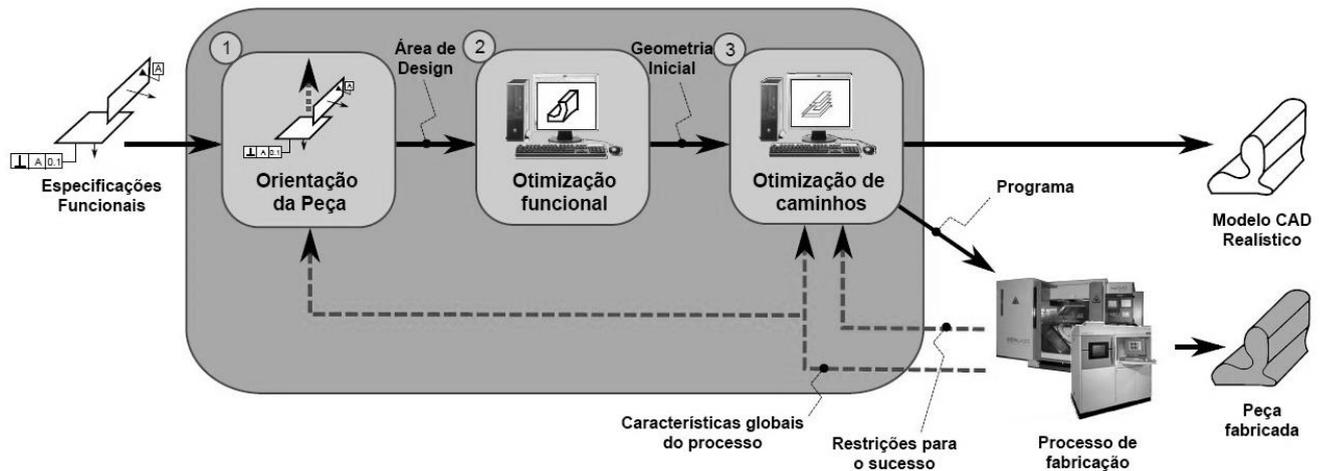


Figura 48 - Sistema Amplo de Projeto para Manufatura Aditiva e Ferramentas  
 Fonte: (ROSEN, 2007)

Já Ponche, *et al.* (2013), propõe uma nova metodologia também nomeada como DFAM que considera os requisitos de design e as especificidades da manufatura. No sistema proposto, as especificações funcionais são o ponto de partida, e então são abordadas questões referentes à manufatura aditiva como a orientação da peça, otimização funcional e otimização do processo de impressão. A Figura 49 mostra as etapas do processo proposto pelo autor.



**Figura 49 - Metodologia de Design para Manufatura Aditiva (DFAM) proposta.**  
**Fonte: (PONCHE, *et al.*, 2013)**

Em outro artigo, Rosen (2007) aborda a questão da capacidade de fabricar formas complexas da manufatura aditiva, porém foca no estudo da construção de estruturas celulares com geometria muito complexa construídas através da manufatura aditiva. Além de citar o método DFAM, o autor trata a necessidade de uma representação intermediária dos elementos componentes das estruturas celulares, denominados Elementos Manufaturáveis ou Manufacturable Elements (MELs), eles são justificados para representar partes da estrutura celular final e são aplicados para permitir a simulação dos processos.

Seepersad (2014) também destaca a fabricação de geometrias complexas, sua arquitetura interna bem como a distribuição espacial da sua composição de material. O desafio neste contexto é representar e otimizar geometrias intrincadas e estruturas com variação gradual, através da incorporação do conhecimento do Design para a AM dentro do processo de design

Jing, *et al.* (2014) pontua que a impressão 3D tem promovido a oportunidade de repensar os métodos de design para maximizar o desempenho dos produtos através das capacidades inerentes aos processos AM, como a síntese da composição, estrutura e dimensões dos

materiais, bem como discutir os métodos de design de produtos, propondo novas direções para o desenvolvimento do design de produto no futuro.

Rosen (2014) destaca que o design para manufatura convencional foca em entender os efeitos das restrições de manufatura, porém, se nos basearmos nas características específicas da impressão 3D, um objetivo geral do design para a manufatura aditiva pode ser estabelecido e vários conceitos articulados. Assim o objetivo do DFAM pode ser a maximização do desempenho dos produtos através da síntese das formas, tamanhos, estruturas e composições de material conseguidas através das capacidades das intrínsecas das tecnologias de manufatura aditiva.

O autor ainda destaca algumas linhas guias para os designers no emprego das capacidades únicas da AM que se agrupam basicamente como geometrias complexas, composição de múltiplos materiais e personalização da fabricação. No entanto, cita que ainda existem muitos espaços no campo do design a serem explorados, sendo necessário a elaboração de novos conceitos e sua pesquisa na prática.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Já foram feitas algumas propostas de classificação da Impressão 3D dentre os processos de fabricação, no entanto as formas de classificação podem ter ficado desatualizadas com a evolução dos processos de impressão 3D e sua organização poderia ser melhor entendida se os agrupamentos fossem feitos por conceitos mais genéricos. Uma possibilidade melhor para classificar os materiais poderia ser a combinação do estado do material a ser transformado com o meio pelo qual a transformação acontece, conforme ilustrado na Tabela 5.

	Térmico	Químico
Líquido		Estereolitografia (STL) Impressão por Jato de Tinta (IJP)
Partículas	Sinterização por Laser Seletivo (SLS) Derretimento por Laser Seletivo (SLM) Modelagem Laser Engenharia (LENS)	Impressão Tridimensional (3DP)
Sólido	Deposição de material fundido (FDM)	
Chapas		Objeto Modelado por Laminação (LOM)

**Tabela 5 - Classificação de processos 3DP por tipo de material e meio de transformação.**

Fonte: do Autor

Com relação às nomenclaturas aplicadas às tecnologias, observa-se que o termo que vem sendo mais empregado é Manufatura Aditiva, no entanto, ele faz referência a questão da adição e, conforme apresentado na Tabela 1, existem outros processos de transformação que também são “aditivos”, mas que têm características muito distintas da Impressão 3D, como a eletrodeposição, injeção, cravamento, dentre outros. Uma solução poderia ser o termo *Layer-based Manufacturing* ou Manufatura baseada em camadas, porém esta referência apenas a questão da construção em camadas, e existem outros processos que também adicionam material por camadas, como a eletrodeposição, a pintura, etc.

Os conceitos fundamentais que mais caracterizam a impressão 3D são; A subdivisão da geometria em partes menores (seções), a intenção de adicionar material gradualmente (camadas) e o controle de todo esse processo feito por máquinas (automatização). Portanto

uma nomenclatura que seria mais adequada para classificar os processos atuais poderia ser “Manufatura Automatizada por Adição de Camadas”.

Uma grande vantagem da manufatura aditiva é a redução no número de etapas para se fabricar uma peça. A complexidade não importa muito e geralmente é conseguida em uma única etapa, enquanto a maior parte dos sistemas tradicionais requerem várias etapas de fabricação e que precisam ser acompanhadas. Conforme se eleva o número de detalhes da peça, os estágios de fabricação tendem também a aumentar e, conseqüentemente, os custos.

Além da diminuição das etapas construtivas de uma peça, manufatura aditiva pode oferecer uma maneira mais sustentável de se fabricar. Pois se usa muito pouco ou quase nenhum material além do necessário para a produção da peça, a facilidade de fabricar produtos personalizados pode aumentar a afeição do usuário fazendo com que ele o mantenha por mais tempo. Por outro lado, a facilidade de produzir pode gerar um excesso de produtos com descarte prematuro, aumentando a utilização dos recursos naturais.

Outra característica que pode amenizar os impactos é a capacidade de se produzir localmente, próximo ao consumidor e sob demanda, reduzindo os custos de transporte e manutenção de estoques de produtos e peças de reposição.

Os principais sistemas de impressão 3D, apesar de trabalharem através do mesmo conceito, possuem técnicas diferentes, o que os leva a ter características distintas que auxiliam ou prejudicam em algumas aplicações. Algumas considerações podem ser feitas sobre suas características específicas.

A estereolitografia foi a primeira tecnologia utilizada regularmente no processo de desenvolvimento de produtos para a construção de modelos e protótipos para os mais diferentes fins. Para o design ainda é uma opção na criação de peças feitas em diferentes resinas, porém, atualmente, aparenta estar sendo substituída por tecnologias mais recentes que além de mais rápidas e com maior resolução, têm a possibilidade de utilizar diferentes materiais com diferentes propriedades, como resinas rígidas, elastômeros, dentre outros.

O FDM é um processo com tecnologia muito simples, similar às impressoras jato de tinta. Esta característica aliada ao baixo custo da matéria prima utilizada, um fio de termoplástico, deixa este tipo de impressora muito acessível, tornando-a muito popular.

Os processos que utilizam laser seletivo, como o SLS, SLM e o DMLS, são muito versáteis em relação à utilização de materiais, pois podem ser trabalhados resinas, minerais, metais, dentre outros, o que confere a este tipo de processo uma boa flexibilidade, tornando este tipo uma boa opção para aquisição.

Já para a Impressão por Jato de Tinta ou IJP, sua grande vantagem é, sem dúvida é a impressão em cores, como esta impressora trabalha depositando uma resina líquida aglutinadora, esta pode ser pigmentada no momento da aplicação, semelhante ao que acontece uma impressora jato de tinta, permitindo a variação de cor em uma mesma peça. Essa característica pode ser explorada pelo designer em aplicações onde este aspecto seja desejado.

Uma característica que deve ser destacada no processo LENS é que, as camadas não são depositadas necessariamente em planos horizontais como em todos os outros processos AM, como o bico aplicador trabalha com deslocamento nos três eixos, ele pode depositar material não apenas nos eixos X e Y, mas também no eixo Z e seguir diversos caminhos. O designer pode se valer desta característica na criação das formas, pois este sistema não tem tantas restrições na colocação de suportes como os que trabalham baseado em planos.

Como a técnica LOM utiliza chapas de material coladas entre si, as propriedades da peça construída ficam sujeitas ao posicionamento e direção das camadas, criando assim restrições físicas, principalmente estruturais na aplicação da peça para determinados usos.

As tecnologias continuam a se desenvolver e multiplicar, máquinas cada vez mais específicas são criadas e, apesar da diversificação, a evolução das aplicações da impressão 3D segue em direção a fabricação de produtos diretamente para o consumo. Dessa forma podemos classificar 3 momentos evolutivos distintos. O primeiro, quando e para que a tecnologia foi criada, a fabricação de protótipos na fase de desenvolvimento de produtos; o segundo quando se passa a aplicar a tecnologia em alguma etapa de fabricação dos métodos tradicionais da indústria e por último, a fabricação direta de produtos de consumo, ou Fabricação Digital Direta (FDD) como alguns estudiosos estão chamando.

Com a fabricação digital direta, ou seja, a fabricação a partir de arquivos digitais contendo a geometria da peça, é clara a redução das etapas intermediárias e consequente simplificação dos processos de fabricação. Neste sentido, as considerações inerentes à fabricação que antes eram abordadas em momentos mais avançados, passam a ser abordadas em etapas mais iniciais do desenvolvimento do produto. O design, portanto, cada vez mais passa a contemplar essas questões técnicas inerentes à manufatura aditiva, por outro lado também se beneficia das vantagens que esta tecnologia proporciona, especialmente a maior liberdade de criação.

Pelas pesquisas realizadas, a fabricação digital direta ainda não é uma realidade no setor, porém os primeiros passos já foram dados e se observa uma clara tendência de expansão do uso da impressão 3D nesta direção.

A manufatura aditiva entrou na joalheria como em outros segmentos, como ferramenta de prototipagem, depois, conforme os custos foram baixando, passou a ser ferramenta na etapa modelagem, substituindo a modelagem manual.

No momento a impressão 3D é parte integrante do processo de fundição da joalheria, mais especificamente na etapa de modelagem, e vem sendo bem empregada em função das suas características que encaixaram com as necessidades específicas do segmento.

- Tamanho reduzido das peças: como os custos operacionais de impressão 3D ainda são consideravelmente elevados, o tamanho reduzido das joias ajuda a reduzir o impacto do custo de matéria-prima aplicado em cada peça.
- Fidelidade na reprodução: como o processo de impressão é quase que inteiramente automatizado, a reprodução de uma determinada geometria é muito mais fiel e menos suscetível a variações, garantindo assim a qualidade e padronização das peças.
- Facilidade de criar formas complexas: uma característica que apresenta grande vantagem é a capacidade de criar formas complexas, que no caso da joalheria, como são utilizadas em processo de fundição com molde não permanente, podem ser fundidas sem muitos problemas de ângulos de extração e assim possibilitam diferenciação nas formas criadas com seu auxílio.

Por outro lado, a joalheria também pode ser considerada um segmento de referência em relação aos processos AM, pois em alguns aspectos ela exige muito da capacidade das impressoras 3D como:

- **Qualidade superficial:** a joia é um dos produtos que mais exigem da impressão 3D no que tange a qualidade superficial das peças construídas. Normalmente as peças precisam ter acabamento bastante liso e sem irregularidades ou aspereza e, esse aspecto, de certa maneira, força a tecnologia a se desenvolver.
- **Alta resolução e espessura da camada:** estes são os componentes mais importantes para alcançar a necessidade de alta qualidade da superfície da peça, e um ponto crucial a ser desenvolvido para a ampliação do uso da tecnologia que as exigências da joalheria ajuda a melhorar.
- **Velocidade de construção:** este ponto também é um dos mais importantes para a ampliação do uso da tecnologia, pois muitas técnicas ainda são consideradas muito lentas se comparadas aos métodos tradicionais de fabricação e, quanto mais rápida a impressão se tornar, maior será sua produtividade e menor os custos por peça.

Podemos observar que a fundição por cera perdida é um processo muito longo, com muitas etapas, e muitas delas com grande volume de trabalho manual e, devido à toda essa complexidade do processo, acabam por surgir muitas considerações que devem ser abordadas para garantir a qualidade e uniformidade das peças. Dentre elas a contração dos diversos materiais utilizados, integridade nos diversos estágios de transferência da forma, fluidez no vazamento do metal fundido, preenchimento e formação de bolhas e extração das peças, bem como diversas outras restrições técnicas.

Antes da primeira aplicação da impressão 3D na joalheria, a etapa de construção da peça modelo, a modelagem podia ser feita através de diferentes técnicas manuais, e hoje é feita quase que exclusivamente com o auxílio da manufatura aditiva, inclusive com máquinas desenvolvidas especialmente para esta finalidade. Todas as etapas manuais empregadas na obtenção da peça modelo foram substituídas por algumas poucas etapas de fabricação aditiva, e hoje ela já tem sua utilização consolidada como importante ferramenta na construção do modelo.

Uma característica que deve ser destacada no processo de fundição por cera perdida na joalheria é o fato dele ser composto de muitas transferências de forma, ou seja, a peça a ser fabricada tem sua forma construída tridimensionalmente e então, é utilizada na construção de um molde para replicar a forma em outro material, e este processo se repete algumas vezes até que se tenha a peça fabricada no material final.

Como o processo é longo e baseado em muitas transferências de forma, as tarefas presentes em todo processo podem ser agrupadas pela intenção básica, construções ou reproduções da forma, alternadamente aplicadas, conforme demonstrado na Tabela 6.

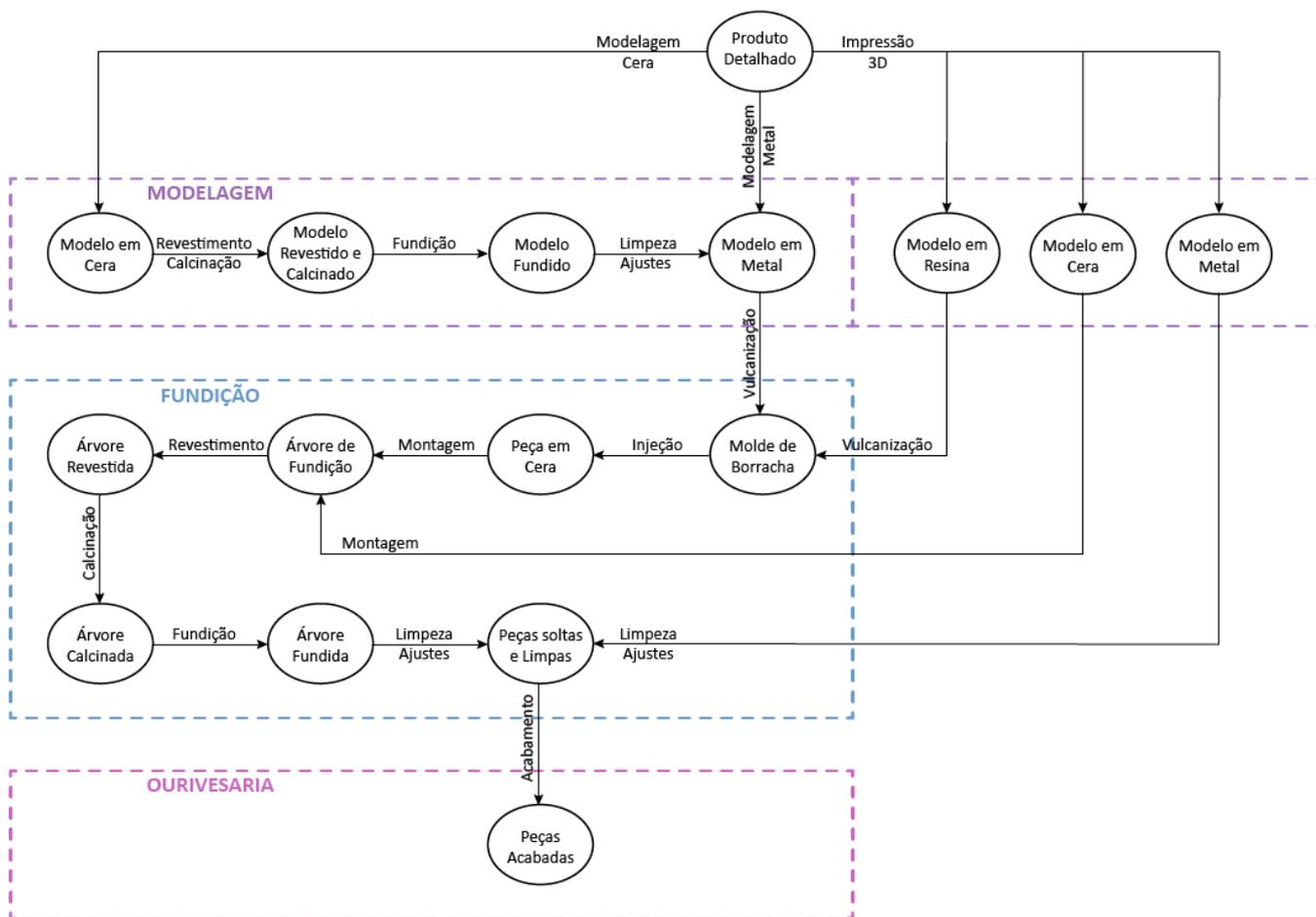
Passos	1º	2º	3º	4º	5º
Intenção	Construção	Reprodução	Construção	Reprodução	Construção
Etapa	Construção do Modelo	Molde de Borracha	Fabricação das peças em Cera	Molde Cerâmico	Fabricação das peças em Metal

**Tabela 6 - Quadro simplificado dos passos e intenções do processo de fundição por cera perdida**  
**Fonte: do Autor**

A partir desta tabela podemos observar que a impressão tridimensional na joalheria não foi muito aplicada nos passos de reprodução da peça, mas sim, encontrou espaço exatamente nas etapas de construção, ou seja, passos 1, 3 e 5.

Pode-se observar que o avanço da manufatura aditiva nos diferentes estágios do processo de fundição por cera perdida, foi um processo progressivo com cada passo dado na direção da fabricação digital direta. Ela veio fazendo com que sucessivas etapas do processo fossem sendo eliminadas, tornando-o mais simples até o ponto da eliminação de todas as etapas de fundição, a fabricação digital direta.

A Figura 50 mostra um macro fluxograma do processo tradicional de fundição por cera perdida em paralelo com as tecnologias de impressão 3D aplicadas comercialmente na joalheria.



**Figura 50 - Macrofluxo do processo de Fundição por Cera Perdida com interferência da Impressão 3D**  
 Fonte: do Autor

A manufatura aditiva, portanto, vem gradativamente ocupando mais espaços nas etapas de fabricação da joia. A fabricação diretamente em metais preciosos é a aplicação que causa maior ruptura na indústria joalheira, pois elimina todas as etapas do processo de fundição, bem como as limitações inerentes a elas, como a dificuldade de economia por alívio de material, problemas na fundição como bolhas e problemas de fluxo, além da dificuldade e inúmeras restrições de reprodução de geometrias complexas.

Desde seu surgimento até hoje, uma das principais funções da joia é servir como adorno, abordando a questão estética e simbólica como pilares, assim, podemos considerar que uma joia se define basicamente por atribuir valor à um objeto de ornamentação.

Como os atributos estéticos são determinantes no projeto de joias, a capacidade de fabricação de formas complexas conseguida com a AM gera um impacto direto no projeto, rompendo

antigas limitações na fabricação das peças e permitindo novas possibilidades criativas que trazem valor para as peças fabricadas com este tipo de tecnologia.

A impressão de peças diretamente em metal está trazendo uma grande mudança para o segmento joalheiro. Ao passo que os preços vão sendo diminuídos e a tecnologia vem se tornando acessível, boa parte dos segmentos dentro da joalheria utilizarão máquinas de manufatura aditiva em alguma demanda ou momento específico, essa tendência de migração de processos impactará boa parte do processo tradicional de fabricação.

As mudanças interferem não apenas diretamente no processo de design, mas também indiretamente nele, pelas mudanças na fabricação em si. Se antes o design se concentrava mais nas questões estéticas e simbólicas da joia e as considerações técnicas mais importantes eram responsabilidade do modelador ou técnico responsável pela construção do modelo, agora, com a fabricação automatizada do modelo, essas considerações técnicas devem ser abordadas já na fase de modelagem virtual.

No entanto estas considerações técnicas não são tantas e tão complexas como na fundição tradicional, onde eram necessárias considerações sobre espessuras, ângulos e curvaturas, fluxo do metal fundido, contrações dentre outros. Com a fabricação digital direta as considerações passam basicamente por questões de posicionamento da peça para impressão, colocação dos suportes de material, resistência da peça impressa e algumas outras. Estas questões precisam ser consideradas já na fase de projeto, e trabalhadas na concepção da joia juntamente com os aspectos estéticos e simbólicos, todos sendo harmonizados na solução formal do produto.

A mudança dos processos também influencia o design de produto, que já vem buscando novas formas de se adaptar à chegada dessas novas ferramentas, não apenas a manufatura aditiva, mas também softwares avançados que simplificam etapas de processos de desenvolvimento e fabricação estão cada vez mais presentes no dia a dia da atividade.

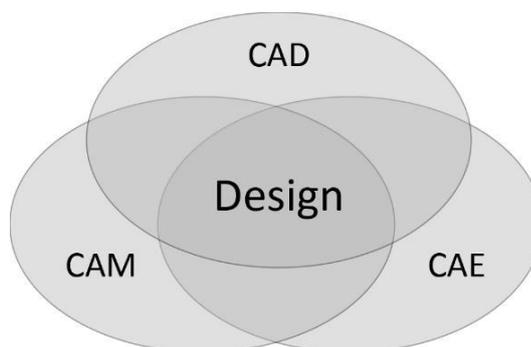
Alguns autores começam a propor novos métodos que contemplem a aplicação de tecnologias associadas à fabricação digital direta no processo de desenvolvimento de produto.

O método de Rosen (2007) citado anteriormente, tem uma abordagem mais aplicável ao desenvolvimento de estruturas complexas compostas por módulos ou células para a obtenção de determinadas propriedades dos materiais pois, como pode ser observado, este sistema tem um viés de análise estrutural, considerando as ferramentas de otimização formais aplicadas na definição da forma de uma estrutura para a geometria da peça a ser fabricada.

Já no método de PONCHE, *et al.* (2013), apenas algumas considerações são contempladas, como a orientação da peça e otimizações para impressão 3D como posicionamento de suportes, deixando de fora outras questões que poderiam ser consideradas, como avaliações de funcionamento da peça, resistência da estrutura, otimização do volume de material, dentre outras, todas inerentes ao projeto do produto, além do processo proposto ser linear com apenas uma direção, sem considerar a interação entre as atividades das etapas na definição formal do produto.

Com as ferramentas computadorizadas auxiliando em diferentes tarefas do desenvolvimento de produtos e com a manufatura aditiva reduzindo as etapas e simplificando os processos de fabricação, o design passa a abordar mais diretamente os universos “*Computer Aided*” e considerar estas questões nos seus processos.

A Figura 51 ilustra uma maior integração entre o design e as considerações dos universos “CA” (Computer Aided).



**Figura 51 - Integração do design nas considerações dos universos “*Computer Aided*”**  
**Fonte: do Autor**

Podemos agrupar as diferentes ferramentas computadorizadas de auxílio no projeto conforme sua aplicação, sendo algumas delas:

CAD - ferramentas de modelagem, paramétrica, modelagem orgânica, escaneamento e captura de geometrias, algoritmos geradores de estruturas matemáticas fractais, etc.

CAE - ferramentas de análise de elementos finitos, análise termodinâmica, aerodinâmica, dentre outras, otimização topológica, estudo de movimento, etc.

CAM - ferramentas de setup e otimização de manufatura aditiva como posicionamento, localização, distribuição e criação de suportes, etc.

Assim, inserindo o processo de design no contexto da fabricação digital direta de joias podemos considerar uma estrutura com abordagem conforme a Figura 52.

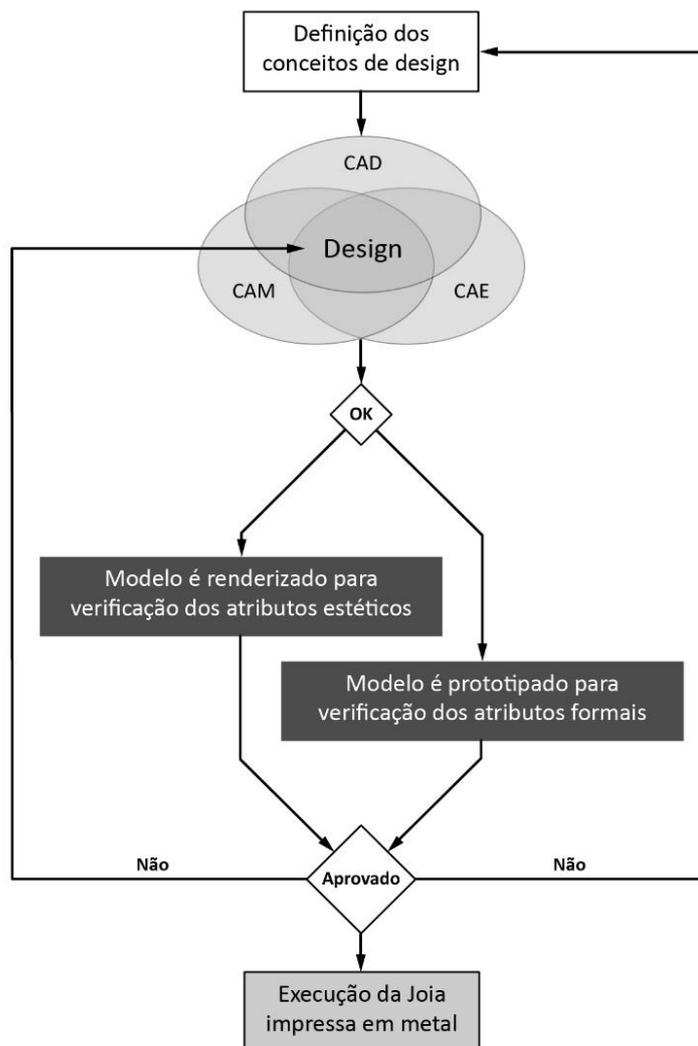


Figura 52 - Novo fluxo de atuação do designer dentro do processo de fabricação digital direta de joias  
Fonte: do Autor

Na manufatura digital direta, a criação da forma do produto necessariamente deve passar pela criação da geometria tridimensional digital, pois esta é a ponte para a comunicação com a impressora. Nesse sentido, parece haver uma clara tendência pela utilização de ferramentas digitais e muitas delas estão surgindo, cada vez mais complexas, com o intuito de auxiliar etapas específicas do processo de desenvolvimento.

A ferramenta de XU et al. (2014), apresentada anteriormente, é uma boa referência para ilustrar uma quebra no paradigma atual da modelagem digital, pois muda os conceitos atuais de modelagem, trazendo-os para o desenho em perspectiva, aproximando a expressão natural do design de produtos para a linguagem da modelagem digital. Isso possibilita uma mais rápida e integrada conceituação e geração de alternativas já dentro no universo 3D, e por consequência também mais condizente com a realidade da fabricação digital.

Através da aplicação de softwares no desenvolvimento do produto, processo se tornou mais integrado, o tempo de desenvolvimento, processos e os custos foram reduzidos, bem como a qualidade foi aumentada. A melhoria da eficiência e redução de erros nestas etapas, torna estas ferramentas importantes meios para vencer os obstáculos encontrados no processo de desenvolvimento da joia. Portanto, é importante que o designer domine essas ferramentas e técnicas para poder integrar e antecipar melhor as fases posteriores do processo, melhorando a comunicação na equipe de desenvolvimento.

Neste sentido da redução de custos, é importante que o designer aborde a forma peça levando em consideração não apenas as questões estéticas, mas também estruturais, topológicas, e de redução de material aplicado, bem como também as limitações pontuais do processo de fabricação em camadas.

Com a utilização de softwares de análise, como a análise topológica por exemplo, o design pode criar e avaliar as inter-relações formais/estruturais já na fase de definição da forma, aumentando o nível de liberdade projetual pela integração de considerações estruturais no momento da definição da forma do produto.

Isto pode impactar drasticamente o design pois abre novas possibilidades para a criação de formas que podem ser esteticamente mais interessantes, ao mesmo tempo estruturalmente mais eficientes e com a utilização de menos material que nos processos tradicionais.

O designer pode iniciar a concepção com as necessidades estruturais do objeto e confrontar o resultado dado pelo software com as outras necessidades projetuais. Por exemplo, determinar as restrições estruturais para o produto a ser desenvolvido, lançar no software e este, gerar uma geometria para ser utilizada como ponto de partida da definição formal do objeto, criando novas possibilidades conceituais para o produto.

A Tabela 7 sintetiza algumas das principais influências da manufatura aditiva no processo de fabricação e no processo de design nos estágios onde ela foi inserida na fabricação de joias pelo processo de fundição por cera perdida.

Estágio	Fabricação	Design
Construção da peça Modelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uniformidade na reprodução da forma na etapa de modelagem para os diferentes lotes de fabricação</li> <li>• Redução do trabalho referente à etapa de modelagem manual</li> <li>• Diminuição da dependência da técnica e experiência do modelador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhora na comunicação dos atributos formais com a equipe de projeto</li> <li>• Ganho de capacidade de execução de formas mais complexas difíceis de serem reproduzidas manualmente</li> </ul>
Construção da peça em Cera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uniformidade na reprodução da forma na etapa de Cera para os diferentes lotes de fabricação</li> <li>• Redução do trabalho referente à etapa de replicação em cera e eliminação da modelagem manual</li> <li>• Diminuição dos riscos inerentes a injeção de cera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior integração do projeto com a manufatura, melhora a comunicação e a manufatura do produto</li> <li>• Aumento na capacidade de execução de formas complexas</li> </ul>
Construção da peça em Metal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uniformidade na reprodução da forma nos diferentes lotes de fabricação na etapa de fundição e nas anteriores.</li> <li>• Redução do trabalho referente à etapa de fundição e eliminação da replicação em cera e modelagem manual</li> <li>• Diminuição dos riscos inerentes à etapa de fundição</li> <li>• Novas possibilidades na construção de estruturas ocas e alívio de material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ampla integração do projeto com a engenharia e manufatura, torna o desenvolvimento mais sinérgico</li> <li>• Liberdade pela capacidade de execução de formas extremamente complexas</li> <li>• Novas possibilidades estéticas pela combinação de ferramentas digitais e fabricação digital direta</li> </ul>

**Tabela 7 - Quadro síntese da influência da Impressão 3D nos estágios da fundição por cera perdida na fabricação e no design**  
**Fonte: do Autor**

Juntando-se a digitalização dos produtos com a facilidade de comunicação proporcionada pela internet, podemos abordar uma certa ruptura na ligação entre o benefício condido no produto e o objeto físico em si, pois, de certa forma, a digitalização desmaterializa o produto, transferindo seus atributos físicos para o meio digital.

Assim, entende-se que os produtos podem ser, cada vez mais, entendidos como uma propriedade intelectual (ideia) convertida em objeto (matéria), as informações necessárias à produção de um determinado objeto passam a estar contidas no design do produto, embutidas no arquivo digital com a geometria a ser reproduzida pela impressora 3D.

A partir dessa perspectiva, uma desmaterialização dos produtos passa a se configurar, o design de produtos tende então a ser distanciado da fabricação tradicional, e aproximado da fabricação digital. Em função das impressoras 3D possuírem muito menos limitações e construírem diretamente a partir da geometria digital da peça, o antigo vínculo do design com os processos de fabricação tradicionais, especialmente os de massa, tende a não mais a nortear a criação dos objetos.

## **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A manufatura aditiva vem criando novos paradigmas para na fabricação, sua utilização já se encontra sedimentada e é aplicada comercialmente em muitos segmentos.

Como as tecnologias presentes na manufatura aditiva trabalham por sistemas automatizados de fabricação, a utilização dessas tecnologias acaba induzindo a uma transposição de boa parte do trabalho para meios digitais. Influenciando assim na atuação do designer e potencializando uma tendência pela utilização de ferramentas digitais de auxílio no processo de desenvolvimento de produtos.

Não apenas ferramentas computadorizadas de auxílio ao design, mas também à engenharia e manufatura. Novos softwares e aplicações vem sendo desenvolvidos, com automações e interfaces cada vez mais simplificadas, trazendo funcionalidades e inovações como a utilização de algoritmos complexos. Estas ferramentas computadorizadas de auxílio (*Computer Aided* ou CA's), estão diversificando as possibilidades no que tange as áreas envolvidas no desenvolvimento de produtos.

O exemplo do segmento joalheiro demonstra a tendência de simplificação dos processos de fabricação pela utilização da manufatura aditiva, os processos se tornam mais simples, no entanto, o processo de design se torna mais complexo, necessitando assim incorporar ferramentas CA para abordar questões de engenharia e manufatura ainda na fase de definição formal do objeto.

Boa parte do desenvolvimento da forma, antes limitada pelos métodos de fabricação tradicional, ganham uma liberdade nunca antes vista e agora a fabricação não é mais tão limitadora como antes.

Também o ponto de partida não precisa mais ter foco na exploração estética e simbólica do objeto. Com novas ferramentas disponíveis o projeto pode ser iniciado com diferentes abordagens distintas, agora muito mais integradas ao processo de design, um bom exemplo são as aplicações de otimização de material, na qual uma geometria básica e as restrições estruturais se tornam o ponto de partida para que o aplicativo defina a forma estruturalmente mais eficiente e, este resultado então é utilizado no refinamento formal do produto.

E com a manufatura aditiva, a forma, por mais orgânica ou complexa que forma possa ser, pode ser construída com muito poucas restrições que não inviabilizam a produção como aconteceria nos processos de fabricação tradicionais.

Neste sentido, novas abordagens devem ser pensadas e trazidas para os métodos de design, e estes, necessitam ser revistos para representar as novas formas de projeto, bem como as novas possibilidades de atuação do designer. O profissional deve se capacitar para entender o funcionamento e recursos que estas ferramentas oferecem para poder usar mão deles conforme a necessidade de cada projeto.

A autoprodução é um dos pontos no qual também o design precisa se adaptar e criar novas formas de atuação, vez que o cenário industrial tradicional onde ele foi formatado como conhecemos hoje vem sendo progressivamente modificado, é fundamental que se encontre novos modelos e novos papéis para o designer.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, S.; FRYÉ, T. **The revolution of CAD/CAM in the casting of fine jewelry**. Rapid Prototyping and Manufacturing 2006. Chicago: Society of Manufacturing Engineers. 2006. p. 24.
- ALTAIR ENGINEERING INC. Altair OptiStruct - CAE Optimization Technology. **Altair Engineering, Inc.**, 2015. Disponível em: <<http://www.altairhyperworks.com/Product,19,OptiStruct.aspx>>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.
- AMERICA MAKES. AmericaMakes - When America Makes, America Works. **America Makes**, 2015. Disponível em: <<https://americamakes.us/>>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.
- ANDERSON, C. **Makers: A nova revolução industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASTM. ASTM International. **Standards Worldwide**, 1996. Disponível em: <<http://www.astm.org>>. Acesso em: 10 junho 2014.
- ATZENI, E.; SALMI, A. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 62, n. 9-12, p. 1147-1155, 08 fevereiro 2012. ISSN 10.1007/s00170-011-3878-1. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3878-1>>.
- BALC, N.; CAMPBELL, R. I. **From CAD and RP to Innovative Manufacturing**. Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '04. Brasov: [s.n.]. 2004. p. 10.
- BBC. BBC Technology. **US government orders removal of Defcad 3D-gun designs**, 10 maio 2013. Disponível em: <<http://www.bbc.co.uk/news/technology-22478310>>. Acesso em: 10 maio 2013.
- BENZ, I. E. **Inovação no processo de design de joias através da modelagem 3D e da prototipagem rápida**. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, p. 161. 2009.
- BLANTHER, J. E. **Manufacture of contour relief-maps**. US000473901, 24 abril 1890.
- BOURELL, L. D. et al. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. **RapidTech 2009: US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies**, Istanbul, 24 setembro 2009. 7.
- BROOKES, K. 3D Print Show. **Metal Powder Report**, Londres, v. 69, p. 33-35, fevereiro 2014.
- CODINA, C. **A Joalheria**. 1ª. ed. Barcelona: Parramón Ediciones, 2000.
- CONCEPTLASER. Concept Laser - Machine Solutions for Laser Melting Metal, Additive Manufacturing. **ConceptLaser**, 2015. Disponível em: <<http://www.concept-laser.de/en/home.html>>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.
- COPRUCHINSKI, L. **A Arte de Desenhar joias**. Curitiba: Léia Copruchinski, 2011.
- CUBIFY. Cubify. **Express yourself in 3D**, 2013. Disponível em: <<http://cubify.com/>>. Acesso em: 17 abril 2013.
- DAY, P. BBC News. **Will 3D printing revolutionise manufacturing?**, 2011. Disponível em: <<http://www.bbc.co.uk/news/business-14282091>>. Acesso em: 27 abril 2013.

DEFCAD. Defcad. **Defcad.com**, 2012. Disponível em: <[www.defcad.com](http://www.defcad.com)>. Acesso em: 17 abril 2013.

DIMATTEO, L. P. **Method of generating and constructing three-dimensional bodies**. US3932923 A, 21 outubro 1974.

DIMITROV, D.; SCHREVE, K.; DE BEER, N. Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives. **Rapid Prototyping Journal**, Stellenbosch, v. 12, n. 3, p. 12, 2006. ISSN 1355-2546.

DRIZO, A.; PEGNA, J. Environmental impacts of rapid prototyping: an overview of research to date. **Rapid Prototyping Journal**, Canada, 2006. 64-71.

ENVISIONTEC. Professional Grade 3D Printers EnvisionTEC. **Envisiontec**, 2014. Disponível em: <<http://envisiontec.com/>>. Acesso em: 13 novembro 2014.

EOS. e-Manufacturing Solutions. **EOS**, 2015. Disponível em: <<http://www.eos.info/en>>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.

ESPAÇO RITA SANTOS. Escola de Joalheria - Cursos de Joias Modelagem em Cera. **Espaço Rita Santos**, 2014. Disponível em: <<http://www.espacoritasantos.com.br/#!modelagem-em-cera>>. Acesso em: 12 Agosto 2014.

FAKTOR, S. Forbes. **How HP Could Reinvent 3D Printing and Itself**, 2012. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/stevefaktor/2012/10/15/how-hp-could-reinvent-3d-printing-and-itself/>>. Acesso em: 12 maio 2014.

FUTURE FACTORIES. Future Factories. **Future Factories**, 2014. Disponível em: <<http://www.futurefactories.com/>>. Acesso em: 13 novembro 2014.

GANOKSIN. Ganoksin. **The complete Gem and Jewelry Making Information Resource**, 1996. Disponível em: <<http://www.ganoksin.com/>>. Acesso em: 17 maio 2014.

GEOMATIC. Geomagic. **Geomagic 3D software from 3D Systems**, 2014. Disponível em: <<http://www.geomagic.com>>. Acesso em: 7 maio 2014.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer Heidelberg Dordrecht London, 2010.

GOLA, E. **A joia: História e Design**. São paulo: SENAC, 2008.

GROSSMAN, B. Bathsheba Sculpture. **Bathsheba Sculpture - Bathsheba Sculpture LLC**, 2014. Disponível em: <<https://www.bathsheba.com/>>. Acesso em: 12 novembro 2014.

GRYNOL, B. **Disruptive manufacturing The effects of 3D printing**. Deloitte. Ottawa, p. 20. 2013.

GSV. GSV Capital. **A Whole New Dimension**, 2013. Disponível em: <<http://gsvcap.com/>>. Acesso em: 10 junho 2014.

GUSTIN, S. Time: Business and Money. **How the 'Maker' Movement Plans to Transform the U.S. Economy**, 2012. Disponível em: <<http://business.time.com/2012/10/01/how-the-maker-movement-plans-to-transform-the-u-s-economy/>>. Acesso em: 18 abr. 2013.

- HAGUE, R.; CAMPBELL, I.; DICKENS, P. Implications on design of rapid manufacturing. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, Loughborough, v. 217, p. 25-30, Janeiro 2003.
- HOHKRAUT, U. **Rapid Prototyping and Jewelry Design**. Annals of DAAAM for 2010 and Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium. Zadar: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing (DAAAM). 2010. p. 2.
- HOPKINSON, N.; DICKENS, P. Rapid prototyping for direct manufacture. **Rapid Prototyping Journal**, v. 7, n. 4, p. 197-202, 2001. ISSN 1355-2546.
- HÖTTER, J.-S.; FATERI, M.; GEBHARDT, A. **Selective laser melting of metals: Desktop machines open up new chances even for small companies**. Advanced Materials Research. Nova Delhi: [s.n.]. 2013. p. 461-465.
- HULL, C. W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**, 8 agosto 1984.
- I.MATERIALISE. i.materialise. **3D Printing Service**, 2013. Disponível em: <<http://i.materialise.com/>>. Acesso em: 17 abril 2013.
- IGOE, T.; MOTA, C. strategy+business. **A Strategist's Guide to Digital Fabrication**, p. 12, 2011.
- IMPRIMA3D. Imprima3D. **Impressão 3D e Prototipagem**, 2013. Disponível em: <<http://www.imprima3d.com/>>. Acesso em: 17 abril 2013.
- JADE TRADING. Jade-Trading. **Investment Casting, Lost Wax Casting**, 2011. Disponível em: <<http://www.jade-trading.com/index.php?casting=investment-castings-lost-wax-casting>>. Acesso em: 8 junho 2014.
- JING, S. K. et al. A Review of Product Design for Additive Manufacturing. **Applied Mechanics and Materials**, v. 635-637, p. 97-100, setembro 2014.
- KLIAUGA, A.; FERRANTE, M. **Metalurgia Básica para Ourives e Designers: do metal à joia**. São Paulo: Blucher, 2009.
- KRUTH, J. P. et al. **Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting**. Solid Freeform Fabrication. Austin: University of Texas. 2004.
- KUDO3D. Kudo3D. **Kudo3D – High Resolution, High Speed DLP SLA 3D Printer**, 2014. Disponível em: <<http://www.kudo3d.com/>>. Acesso em: 12 novembro 2014.
- LIPSON, H.; KURMAN, M. **Fabricated: The New World of 3D Printing**. Indianápolis: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- MONTEIRO, M. T. F.; KRUCKEN, L.; LANA, S. **POTENCIALIDADES DA IMPRESSÃO 3D SOB A PERSPECTIVA DO DESIGN: uma análise do setor de joalheria em Belo Horizonte**. 11<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. Gramado: UFGRS. 2014. p. 11.
- MORIOKA, I. **Process for manufacturing a relief by the aid of photography**. US2015457 A, 24 setembro 1935.
- MUNZ, O. J. **Photo-glyph recording**. US2775758 A, 25 maio 1951.

- OPEN SOURCE. Open Source. **The Open Source Initiative**, 2014. Disponível em: <<http://opensource.org/>>. Acesso em: 10 junho 2014.
- PHAM, D. T.; GAULT, R. S. A Comparison of rapid Prototyping technologies. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cardiff, 38, n. 38, 15 outubro 1998. 31.
- PONCHE, R. et al. **A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing Process**. Institut de Recherche en Communications et Cybernetique. Nantes. 2013.
- REALIZER. ReaLizer GmbH. **Realizer**, 2015. Disponível em: <<http://www.realizer.com/en>>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.
- ROSEN, D. Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures. **Computer-Aided Design & Applications**, v. 4, n. 5, p. 585, 2007.
- ROSEN, D. Design for Additive Manufacturing: Past, Present, and Future Directions. **Journal of Mechanical Design**, v. 136, n. 9, setembro 2014.
- ROSEN, D. W. **Design for Additive Manufacturing**: a method to explore unexplored regions of the design space. International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas. 2007. p. 402-415.
- SAMPAIO, E. **Noções de Cartografia**. Departamento de Geociências - Universidade de Évora. Évora, p. 24. 2005.
- SEEPERSAD, C. Challenges and Opportunities in Design for Additive Manufacturing. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 1, n. 1, p. 10-13, março 2014.
- SHAPEWAYS. Shapeways. **Make, buy, and sell products with 3D Printing**, 2013. Disponível em: <<http://www.shapeways.com/>>. Acesso em: 17 abril 2013.
- SIAS, F. R. **Lost-Wax Casting**: old, new, and inexpensive methods. Pendleton: Woodsmere Press, 2005.
- SILVA, E.; MENEZES, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2005.
- SLM SOLUTIONS. SLM Solutions GmbH Home. **SLM Solutions**, 2015. Disponível em: <[http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?index\\_en](http://www.stage.slm-solutions.com/index.php?index_en)>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.
- SNYDER, T. W. The Ganoksin Project. **Additive Manufacturing Beams Down to the Jewelry Scene Growing Up**, 2014. Disponível em: <<http://www.ganoksin.com/borisat/nenam/jewelry-additive-manufacturing-system.htm>>. Acesso em: 17 maio 2014.
- SOLIDSCAPE. Rapid Prototyping 3D Prototyping Wax Casting Stereolithography. **SolidScape**, 2014. Disponível em: <<http://www.solid-scape.com/>>. Acesso em: 13 novembro 2014.
- STRAUSS, J. Precious metals in additive manufacturing. **SME Technical Papers**, 2013.
- SWAINSON, W. K. **Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product**, 23 julho 1971.
- TAKAGAKI, L. K. CAPÍTULO 3. Tecnologia de Impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 28 - 40, dez 2012. ISSN 21792895.

TEIXEIRA, B.; FREESZ, R.; GUERRA, M. Tecnologia da Metalurgia e Ourivesaria (Prelo). In: CEDGEM **Cadernos de Joalheria**. Belo Horizonte: Centro de Estudos em Design de Gemas e Joias / UEMG - Escola de Design, 2014.

THRE3D. Thre3D. **THRE3D - 3D Printing, Simplified.**, 2014. Disponível em: <<https://thre3d.com>>. Acesso em: 17 maio 2014.

UNTRACHT, O. **Jewelry Concepts and Technology**. New York: Doubleday & Company Inc., 1985.

USPTO. USPTO. **United States Patent and Trademark Office**, 2014. Disponível em: <<http://www.uspto.gov/>>. Acesso em: 15 maio 2014.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

WALLACE, J. et al. Validating continuous digital light processing (cDLP) additive manufacturing accuracy and tissue engineering utility of a dye-initiator package. **Biofabrication**, 6, 15 janeiro 2014.

WANNARUMON, S. An aesthetics driven approach to jewelry design. **Computer-Aided Design and Applications**, 7, n. 4, 2010. 489-503.

WANNARUMON, S.; BOHEZ, E. L. J. **Rapid Prototyping and Tooling Technology in Jewelry CAD**. Asian Institute of Technology. [S.l.], p. 569-575. 2004.

WOHLERS, T. Recent trends in additive manufacturing. **17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing**, Paris, 12-14 junho 2012. 6.

XU, B. et al. **True2Form: 3D Curve Networks from 2D Sketches via Selective Regularization**. SIGGRAPH 2014 - 41<sup>ª</sup> International Conference and Exhibition on Computers Graphics and Interactive Techniques. Vancouver: ACM Trans. julho 2014. p. 13.

ZHAI, Y.; LADOS, D. A.; LAGOY, L. J. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation. **The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society**, v. 66, n. 5, p. 808-816, março 2014.