

A integração das tecnologias computacionais no desenvolvimento de joias

The integration of computer technologies in jewelry development

RIGONI, Flávia Marieta Magalhães; Doutoranda; Universidade do Estado de Minas Gerais; flaviarigoni@yahoo.com.br

DIAS, Maria Regina Álvares Correia; Doutora; Universidade do Estado de Minas Gerais; regina.alvares@uemg.br

AMORIM, Wadson Gomes; Doutor; Universidade do Estado de Minas Gerais; wadson.amorim@uemg.br

Ao longo do tempo, foram empregadas diversas técnicas, processos e materiais no desenvolvimento das joias, que variaram de acordo com o período, o contexto e as tecnologias disponíveis. Atualmente, as tecnologias computacionais possibilitam o desenvolvimento integrado das joias no ambiente virtual, incorporando o projeto e a fabricação assistida por computador. Essas ferramentas auxiliam na criação, modificação e análise do projeto, possibilitando o aumento da produtividade e a simplificação do processo. O presente artigo visa apontar na revisão bibliográfica as principais tecnologias de modelagem e fabricação digital aplicadas no setor joalheiro, e demonstrar a partir de dois projetos de adornos como a integração dessas tecnologias podem ampliar a capacidade criativa do designer, que passa a ter maior liberdade ao trabalhar com a associação de diferentes processos e materiais.

Palavras-chave: Joia; Modelagem tridimensional; Fabricação digital.

Over time, various techniques, processes and materials were used in the development of jewelry, varying according to the period, context and available technologies. Currently, computer technologies enable the integrated development of jewelry in the virtual environment, incorporating computer-aided design and manufacturing. These tools help in the creation, modification and analysis of the project, enabling increased productivity and simplification of processes. This article aims to point out in the literature review the main technologies of modeling and digital manufacturing applied in the jewelry sector, and demonstrate from two adornment projects how the integration of these technologies can expand the creative capacity of the designer, who starts to have greater freedom when working with the association of different processes and materials.

Keywords: Jewel; Three-dimensional modeling; Digital fabrication.

1 Introdução

Influenciado pela natureza que o cerca, desde os primórdios, o homem institui padrões comunicacionais através da ornamentação corporal, por meio de pinturas, tatuagens, joias, acessórios e vestimentas. Na busca de suprir suas necessidades, interagir, comunicar e expressar sua individualidade ele se torna produtor de artefatos, intervindo sobre a natureza física do próprio corpo e na esfera do ser e do fazer (GOMBRICH, 2007; SIMON, 2006).

Através da joia, por exemplo, a pele torna-se suporte de objetos que portam, codificados através da sua forma ou do material, determinados símbolos e significados que traduzem quem os usa; sendo o adorno alvo de interpretações, usos e transformações sociais. Por ser um objeto carregado de valores materiais e emocionais, a joia ao vestir o sujeito acresce uma camada decorativa ou simbólica a sua aparência externa; atuando como indicação de pertencimento, individualidade, distinção social e reserva de valor. Essa peça ornamental pode ser produzida em materiais preciosos ou não, sendo normalmente ornada com gemas naturais ou sintéticas, e projetada para ser usada como adorno pessoal (UNGER, 2011; PASSOS, 2018; JOIA, 2022).

A diversidade de técnicas e materiais empregados, ao longo do tempo, no desenvolvimento desses adornos está relacionada à disponibilidade de matéria prima encontrada em cada contexto e à criatividade com que cada cultura aplicava o seu saber tácito, influenciada pela sua sensibilidade, domínio técnico e percepção do entorno; em uma conjunção da tecnologia, da arte e da artesania (TEIXEIRA, 2002). Cabe mencionar que o termo tecnologia é empregado para definir os conhecimentos, que abrangem técnicas, processos, métodos, meios e instrumentos, que possibilitam ao homem fabricar objetos e modificar seu entorno para satisfazer as suas necessidades (TECNOLOGIA, 2022).

Nos dias de hoje, as tecnologias computacionais possibilitam o desenvolvimento integrado de artefatos no ambiente virtual, por meio da modelagem tridimensional e da fabricação digital. Nesse espaço, o artefato é simulado a partir de características como forma, dimensão e material, que viabilizam avaliações estéticas, testes, correções e alterações antes da produção de um modelo físico. A materialização desse artefato ocorre por meio de máquinas específicas de corte, usinagem ou impressão tridimensional; o que torna possível alcançar a precisão em formas de alta complexidade, em menor tempo, com maior qualidade de acabamento e fidelidade à concepção projetual, se comparada ao processo artesanal (AMORIM; TEIXEIRA, 2007).

Esses processos que incorporam o projeto e a fabricação assistida por computador são possíveis a partir de *softwares* e *hardwares* que operam sistemas CAD/CAM (Desenho Auxiliado por Computador/ Manufatura Auxiliada por Computador). Eles auxiliam a criação, modificação, análise ou otimização de um projeto Design para aumentar sua produtividade, melhorar a qualidade, encurtar processo, melhorar a comunicação da ideia, obter informações, facilitar e agilizar a fabricação (Idem, 2007).

O presente artigo visa apontar as principais tecnologias de modelagem e fabricação digital aplicadas no setor joalheiro, e demonstrar a partir de dois projetos como a integração dessas tecnologias podem ampliar a capacidade criativa do designer, que passa a ter maior liberdade ao trabalhar com a associação de diferentes processos e materiais.

2 Metodologia

Esta pesquisa é de natureza aplicada por gerar conhecimentos para a aplicação prática; quanto aos seus objetivos é descritiva, uma vez que detalha o processo a partir da observação e participação do pesquisador; sua abordagem é qualitativa por ser um estudo aberto, voltado para o processo (SILVA; MENEZES, 2005).

O estudo se baseou na revisão bibliográfica, a partir de diversas fontes em publicações nacionais e internacionais, como livros, artigos acadêmicos, dissertações e teses relacionados à pesquisa. Definiu-se pelos seguintes temas: a modelagem tridimensional da joia e a sua materialização por meio de processos de fabricação digital. Outras fontes primárias foram obtidas, como observação participante em oficinas experimentais e empresas, registros em arquivo de projetos nos quais os autores participaram como designers, entre outras fontes.

Foram selecionados dois projetos de adorno que pudessem demonstrar a potencialidade criativa das associações tecnológicas. Optou-se por casos práticos vivenciado por um dos autores, e que aplicassem em sua concepção diferentes processos: a manufatura aditiva e a manufatura subtrativa.

3 O projeto e a produção auxiliados por computador

Nos últimos vinte anos aproximadamente, com a popularização de *software* de desenho auxiliado por computador (*Computer-Aided Design - CAD*), o setor joalheiro passou a adotar a modelagem tridimensional realizada no ambiente digital, que gradativamente passou a substituir a modelagem manual. No processo manual, o modelador traduz o desenho da peça e o materializa em um objeto físico, a partir de sua percepção espacial, experiência tácita e conhecimentos práticos na conformação da matéria (SIU; DILNOT, 2001).

A modelagem manual pode variar, de acordo com a complexidade da peça, tanto em etapas quanto em tempo gasto, esse modelo pode ser feito em diversos materiais como a cera ou no metal. A cera permite criar o modelo partindo de um bloco do qual o modelista deverá esculpir o objeto através de um processo subtrativo do material (Figura 1), sendo possível intervir em eventuais erros com a adição de cera (MONTEIRO, 2015). Já o modelo em metal é realizado em prata, opaca ou ouro; alguns modelistas preferem utilizar a prata por sua maior ductilidade e maleabilidade. A seleção do material geralmente depende da forma e da dificuldade da peça, esse processo envolve técnicas como a conformação, a soldagem, o corte, a cravação e o acabamento.

Figura 1 – Modelagem em cera



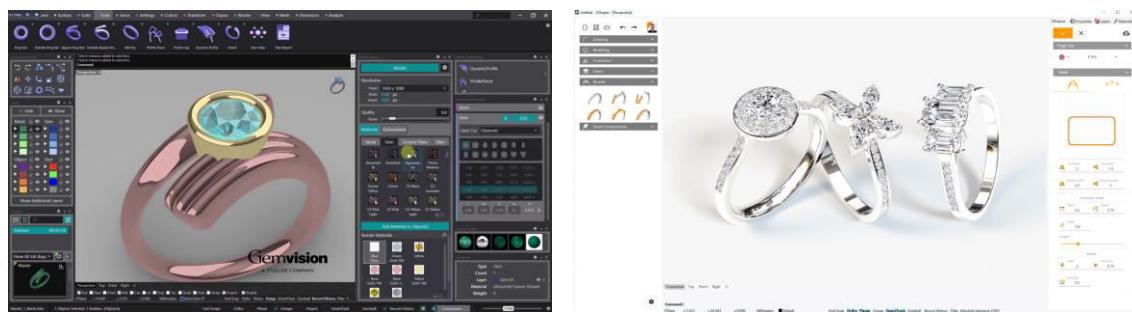
Fonte: www.joyeriplaor.com

A modelagem digital, por sua vez, consiste na construção de um desenho ou modelo de três dimensões através de um *software* 3D, que utiliza modelos matemáticos de representação, no desenvolvimento da malha tridimensional. Atualmente, existem vários programas de

modelagem desenvolvidos para aplicações e áreas projetuais diversas, tais como: Rhinoceros, 3DS Max, Blender, Revit, Maya, Cinema 4D, Zbrush.

Para otimizar o processo de modelagem de joias foram desenvolvidos *softwares* específicos para joalheria como o Jewel CAD, GemCAD, 3Design, CounterSketch, Firestorm CAD; e *plugins* para o Rhinoceros como o MatrixGold, Painter, 2Shapes (Figura 2). Eles possuem ferramentas voltadas às especificidades do setor, como bibliotecas de materiais e gemas, cravação automática, modelagem paramétrica de anéis e grifas, e cálculo do peso.

Figura 2 – Interface do MatrixGold | 2Shapes



Fonte: www.rhino3d.com/for/jewelry

Essas ferramentas CAD possibilitam preservar os dados e as configurações da peça; realizar alterações de forma ágil e prática durante o desenvolvimento do projeto; e produzir o modelo através da prototipagem rápida. Elas também permitem apresentar e visualizar a joia sob vários ângulos; estimar o volume dos materiais; simular a realidade com aplicação de materiais, cores e texturas; reduzir e ampliar para perceber os detalhes (MONTEIRO, 2015). Essas simulações facilitam a compreensão de aspectos físicos de difícil observação, na medida em que auxiliam a interpretação e extração de informações, permitindo avaliar escolhas técnicas, estéticas e materiais (AMORIM; TEIXEIRA, 2007).

Além disso, esses programas proporcionam uma liberdade formal na criação de joias, possibilitando gerar: recortes precisos em superfícies não planas; reprodução de texturas bordados, plissados, peles de animais; reprodução de padrões e estampas; criação de formas complexas; e inscrição de palavras (Figura 3).

Figura 3 – Exemplos de variações formais



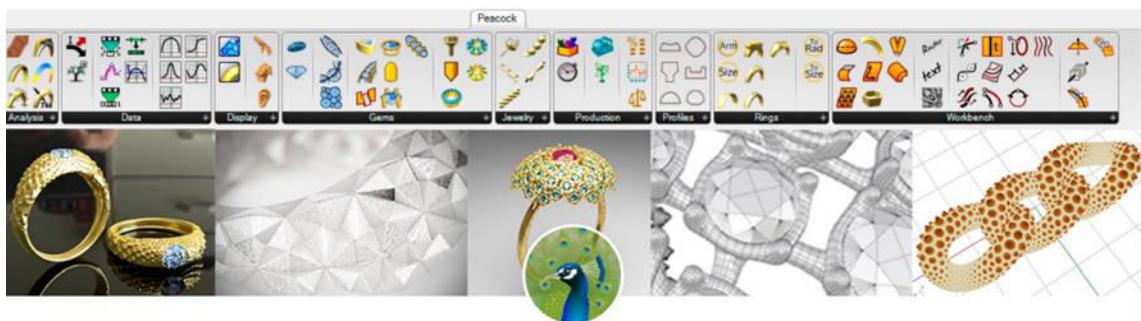
Fonte: www.pinterest.com

Com o intuito de propiciar novas maneiras de gerar formas complexas e adaptáveis, difíceis de serem alcançadas pelas ferramentas padrão na modelagem 3D, alguns *softwares* passaram a

aplicar abordagem de projeto assistido por algoritmos, denominada *Algorithm Aided Design* (AAD). Essas práticas envolvem a geração de um processo por meio de algoritmos, ou seja, ao invés de pensar o objeto, o foco passa ser a análise e desenvolvimento de um campo de exploração de soluções. A utilização dessa abordagem permite a exploração ágil de mudanças formais, a partir das alterações de parâmetros e valores de variáveis dos algoritmos (REAS; MCWILLIAMS, 2010; MINEIRO; MAGALHÃES, 2019).

O emprego mais simples dessa abordagem é o design paramétrico com encadeamento parâmetros funcionais, que se baseia na programação de rotinas customizadas, nos ambientes dos *softwares* como o Dynamo, o Generative Components e o Grasshopper, e nos *plugins* de joias Peacock (Figura 4), Free jewels e Grasshopper gold.

Figura 4 – Ferramentas do plugin Peacock



Fonte: www.rhino3d.com/for/jewelry

A partir de um conhecimento mais avançado de programação, é possível desenvolver parâmetros específicos para um projeto, criar ferramentas, sistemas, ambientes e novos modos de explorar o processo, superando as limitações dos programas. Já no design generativo ou evolucionário, por meio de algoritmos, o sistema computacional começa a criar combinações, e cada conjunto de combinações cria uma opção de design (DAVIS; PETERS, 2013; TEDESCHI, 2014).

No Grasshopper, por exemplo, variações formais podem ser controladas intuitivamente através gráficos deslizantes, permitindo que diversas modificações sejam produzidas a partir de uma única definição. Isso dá abertura para que os usuários criem suas próprias ferramentas de modelagem, em vez de empregar apenas um conjunto de recursos pré-estabelecidos, o que possibilita novas soluções ao projeto de joias. Sendo possível modelar um anel de forma complexa em um tamanho e, a partir deste, gerar anéis de numerações diversas, estabelecendo parâmetros que permitem o aumento do aro respeitando as medidas de espessura desejadas para o objeto. Sem este recurso, seria necessário modelar cada numeração de aro individualmente, já que simplesmente escalar o modelo não é um procedimento eficaz no método convencional (ALMEIDA, 2019).

Devido aos parâmetros específicos desses programas, os projetos desenvolvidos podem herdar a estética que carrega em si uma linguagem visual baseada em códigos, o que pode afetar facilmente o resultado físico final. Quando se começa a utilizar a tecnologia digital, é comum se interessar pela própria ferramenta e enfatizar a estética específica que ela oferece. Isso gera objetos com uma aparência homogeneizada, concentrada na expressão visual mais facilmente alcançável através do *software* ou máquina controlada por computador. Quando a fabricação digital é usada há mais tempo, é mais provável que seus usuários apliquem ideias que não se baseiam na estrutura principal das ferramentas digitais (PETTERSSON, 2019).

Uma vez que o modelo 3D é desenvolvido virtualmente, são empregados dois tipos de tecnologias de fabricação digital para a materialização do artefato: a manufatura subtrativa e a manufatura aditiva. Esses processos de produção utilizam o CAD, associados com a manufatura auxiliada por computador (*Computer Aided Manufacturing – CAM*) para a transformação da matéria prima em artefatos físicos, subtraindo ou adicionando material, com o uso do equipamento apropriado (BARROS, 2011).

A manufatura subtrativa extrai o material por meio de fresas, laser ou plasma executando operações de corte e/ou rebaixo, com auxílio de equipamentos de Controle Numérico Computadorizados (CNCs). Estes processos variam em função do tipo de material e da escala de trabalho adotada. Na joalheria, por exemplo, são mais utilizadas a CNC Milling, CNC Router e a cortadora a laser. A Figura 5 mostra exemplos de adornos corporais desenvolvidos a partir da manufatura subtrativa em diferentes materiais, como madeira, prata, acrílico e couro.

Figura 5 – Exemplos de adornos desenvolvidos por manufatura subtrativa



Fonte: www.pinterest.com

A CNC Milling é empregada para retirar material e criar formas tridimensionais em materiais no formato de bloco por meio de fresas que se movimentam em vários eixos, com diferentes velocidades e pressão (Figura 6a). A CNC Router executa trabalhos de gravação, corte e usinagem em chapas, placas e painéis através de fresas com movimento 2D (Figura 6b). Já a cortadora a laser emite um raio laser no material a ser cortado ou gravado, deixando uma borda com um acabamento superficial de alta qualidade (BARROS, 2011).

Figura 6 – a. CNC Milling; b.CNC Router



Fonte: www.3erp.com

A manufatura aditiva constrói a peça a partir da adição sucessiva de camadas de material, até completar a forma do objeto. Nesse processo o modelo tridimensional é convertido em um modelo de malha geométrica de triângulos *Standard Triangle Language (STL)* que é fatiado em

seções planas, de onde são extraídas curvas bidimensionais que definem o local onde será ou não depositado o material (MONTEIRO, 2015; SILVA, 2020).

Esse processo pode ser organizado em cinco etapas: (1) a modelagem tridimensional da peça; (2) a geração do modelo geométrico 3D no formato STL; (3) o planejamento do processo que envolve o fatiamento e a definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material; (4) a fabricação do objeto no equipamento de manufatura aditiva; e (5) o pós-processamento, que variará de acordo com a tecnologia utilizada, podendo envolver limpeza, cura, acabamento ou usinagem (VOLPATO, 2017).

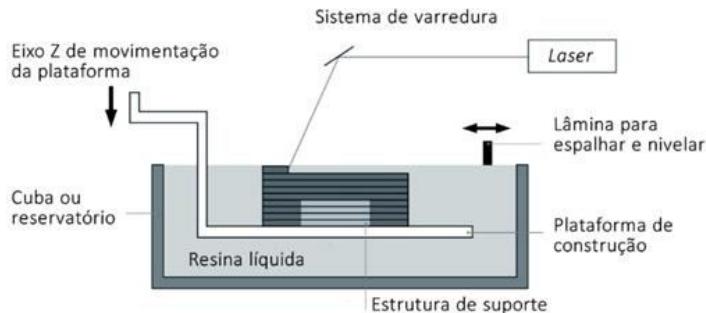
Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2015 (E), os processos de manufatura aditiva podem ser classificados de acordo com o princípio de processamento das camadas em sete categorias: (1) Fotopolimerização em cuba – o polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz; (2) Extrusão de material – o material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado; (3) Jateamento de material – o material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva; (4) Jateamento de aglutinante – um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó; (5) Fusão de leito de pó – a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó; (6) Adição de lâminas – lâminas recortadas de papel são coladas para formar um objeto; (7) Deposição com energia direcionada – a energia térmica é usada para fundir materiais a medida que são depositados. No desenvolvimento de adornos corporais frequentemente são empregados os processos por fotopolimerização em cuba e por fusão de leito de pó, que serão detalhadas a seguir (Idem, 2017).

Os processos de fotopolimerização se baseiam na construção de objetos, a partir de resinas poliméricas em estado líquido, solidificados por meio da irradiação de uma fonte de luz ultravioleta (UV) ou visível. A incidência da luz fornece a energia capaz de iniciar uma reação química de cura na resina que permite sua solidificação em uma cuba ou reservatório (RODRIGUES; NEHMANN, 2003).

Os equipamentos aplicados na fotopolimerização podem ser baseados em: escaneamento vetorial – em que a radiação de energia laser é focada pontualmente em uma região a ser curada; ou projeção de máscaras ou imagens – na qual a energia é direcionada em toda a extensão de uma camada da peça a ser construída. Além disso, eles se diferenciam com relação ao sentido de construção das peças no eixo Z, alguns movimentam a plataforma de construção de cima para baixo, outros de baixo para cima (VOLPATO, 2017).

No escaneamento vetorial, denominado estereolitografia, a resina fotocurável é inserida em um reservatório que contém uma plataforma mergulhada, que se desloca para baixo conforme as camadas são construídas. O feixe de laser é movido por um conjunto óptico que reproduz a geometria 2D obtida no fatiamento da peça, e o sistema de varredura desloca o feixe de laser preenchendo a camada correspondente sobre a superfície da cuba com a resina fotocurável. Ao ser exposta ao feixe de laser, a resina polimeriza e gera uma camada (Figura 7). Logo depois, a plataforma de construção desce um valor correspondente à próxima camada a ser constituída, recobrindo com a resina líquida a camada anteriormente solidificada. Essas etapas são repetidas sucessivamente até que a peça seja formada por completo (VOLPATO, 2017).

Figura 7 – Processo de estereolitografia

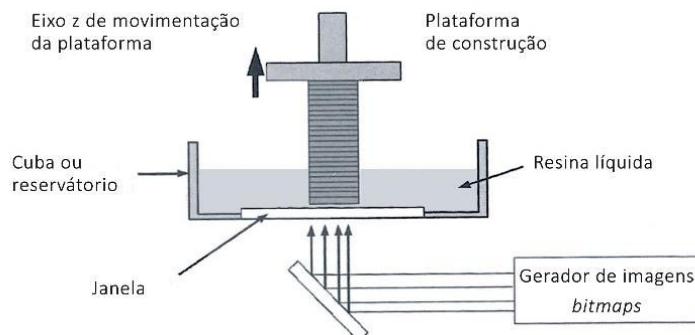


Fonte: Volpato (2017, p. 132)

No processo baseado em projeção de máscaras ou imagens, a partir dos dados geométricos do seccionamento da peça, cada seção fatiada é armazenada na forma de bitmaps, formando uma imagem ou máscara a ser disponibilizada em um visor ou tela digital. Essas imagens ou máscaras são alternadas por meio de um dispositivo de micro espelho digital controlado por um processador de luz digital (*digital light processing* – DLP). A imagem de cada camada armazenada no visor é transferida e projetada na superfície da resina líquida promovendo a sua cura e solidificação. A Figura 8 mostra que a parte inferior da cuba possui uma janela de material transparente que possibilita que a resina seja iluminada verticalmente pela luz proveniente das lâmpadas UV (Idem, 2017).

No início do processo, a plataforma de construção desce no eixo x, e adentra na cuba que contém a resina mantendo uma distância de uma camada entre a plataforma e a janela transparente. Após a irradiação, a camada da resina cura e se adere à plataforma, que sobe para que uma nova camada de resina líquida ocupe o espaço entre a janela e a camada solidificada. Essas fases se repetem até que a peça seja construída (SILVA, 2020; VOLPATO, 2017).

Figura 8 – Processo por projeção de máscaras ou imagens



Fonte: Volpato (2017, p. 136)

Nas duas abordagens apresentadas, após retirar a peça da máquina, é realizada inicialmente uma limpeza com solvente, como o álcool isopropílico, para a remoção da resina não curada. Em seguida, retira-se manualmente o suporte com ferramentas de recorte. Logo após, a peça é levada a uma câmara de fotopolimerização para obter a cura completa da resina e a melhoria das propriedades físicas da peça. Por fim, é dado um acabamento superficial delicado com lixa fina e solvente (SCAGLIUSI, 2015).

Atualmente, os materiais disponíveis para os diferentes equipamentos baseados na fotopolimerização são resinas a base de acrilatos (acrílica) e epóxi (VOLPATO, 2017). De modo geral, os tipos de resinas podem ser divididos em: resinas padrão (*standard*) usadas para prototipagem geral; resinas de engenharia que possuem propriedades mecânicas e térmicas específicas; resinas odontológicas e médicas biocompatíveis; e resinas calcináveis que podem ser fundidas (RODRIGUES, 2019).

Na joalheria são aplicadas as resinas padrão e calcináveis. A resina standard produz impressões de alta resolução, acabamento de superfície lisa, alta resistência à tração; contudo é frágil, não sendo adequada para peças funcionais. Por terem o custo mais baixo viabilizam a prototipação e teste de modelos diversos. Algumas resinas possuem uma temperatura de distorção pelo calor entre 200-300°C, sendo indicadas para a fabricação de moldes, através de processo de vulcanização e outras aplicações que exigem alta estabilidade térmica e operam em altas temperaturas. Já a resina calcinável é fundível e possibilita a fundição direta das peças impressas com detalhes nítidos e acabamento suave (Figura 9). Ela possui baixa resistência ao desgaste, e é quase isenta de cinzas e resíduos após o processo de fundição por investimento, menos de 0,02%.

Figura 9 – a. Molde feito com joia em resina padrão; b. Peças impressas com resina calcinável

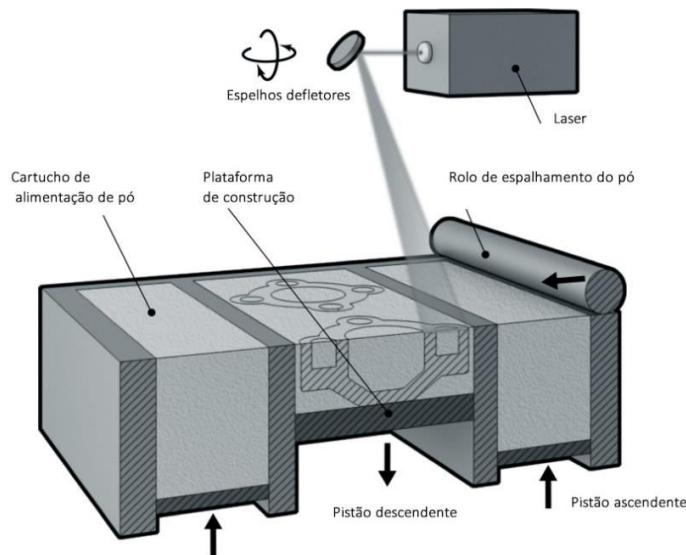


Fonte: a. Power Resins; b. FormLabs

A manufatura por fusão de leito em pó viabiliza a construção da peça a partir de matéria prima na forma de pó fino, que pode ser metálico ou não metálico. A Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering – SLS*), por exemplo, utiliza o pó não metálico. Nela, um feixe de laser CO₂, guiado pela informação geométrica contida no modelo 3D, incide na superfície do leito de pó e funde seletivamente as partículas de pó, camada por camada, transformando o material em um objeto sólido (YAP; YEONG, 2014).

A impressora SLS possui um compartimento isolado que possibilita o controle da temperatura e da atmosfera interior, e um rolo de alimentação que distribui as camadas de pó na plataforma (Figura 10). Uma vez que a seção da peça tenha sido solidificada pelo aquecimento do laser, o sistema desce a plataforma e distribui mais uma camada de pó acima da anterior. As etapas, então, são repetidas até a finalização da peça. Nesse processo, o pó não derretido serve como estrutura de apoio para a peça que está sendo construída, não sendo necessários suportes para o modelo (SCAGLIUSI, 2015; SILVA, 2020).

Figura 10 – Processo esquemático da SLS



Fonte: www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls

Na SLS é utilizado materiais em pó, muitas vezes obtidos a partir de substâncias plásticas, como o náilon, polietileno, polipropileno, ABS, policarbonato e poliamida, que se destaca por seu custo razoavelmente acessível, pela facilidade de pós-processamento, e por aceitar bem tratamentos de superfície como pintura e deposição metálicas (VOLPATO, 2017). Como exemplo de empresas que aplicam o processo SLS no desenvolvimento de adornos corporais temos a Nervous system, a Maison 203, a Noiga, a Lynne MacLachlan Studio, cujas peças podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 – Empresas que aplicam a SLS no desenvolvimento de adornos corporais



Nervous System

Maison 203

Noiga

Lynne MacLachlan Studio

Fonte: www.pinterest.com

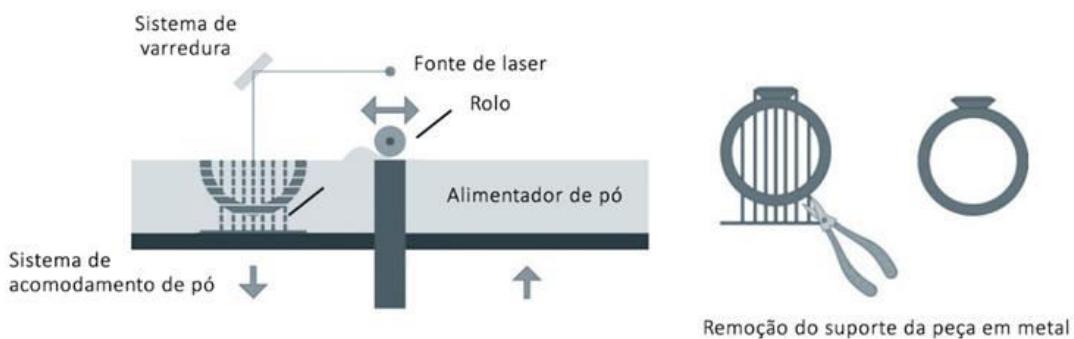
O processamento do pó metálico por feixe de laser, por sua vez, varia de acordo com os diferentes tipos de ligação entre as partículas, o processo que funde parcialmente o metal é chamado de Sinterização Direta de Metal por Laser (*Direct Metal Laser Sintering* – DMLS), e o que realiza a fusão completa é chamado Derretimento por Laser Seletivo (*Selective Laser Melting* – SLM).

A DMLS trabalha com temperaturas que variam de 50 a 100% da temperatura de fusão. Nele o pó metálico é aquecido até o ponto em que aconteça uma ligação pelo contato entre as partículas adjacentes, ou seja, sinterização não derrete completamente o pó metálico, que se une por uma fundição no nível molecular. Já na SLM 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 similares, ambos utilizam um feixe de laser para gerar calor e sinterizar ou fundir um pó metálico depositado camada por camada (Figura 12); operam em câmaras isoladas preenchidas com um gás inerte para criar um ambiente sem oxigênio e evitar a oxidação do material; e seriam capazes de executar o trabalho uma da outra. As pequenas diferenças seriam um modo de limitar cada equipamento para um tipo específico de trabalho, com o intuito de separar processos protegidos por diferentes patentes. O DMSL costuma ser empregado para trabalhar com ligas metálicas, e o SLM para usar um metal puro (MONTEIRO, 2015).

Figura 12 – Esquema do processamento do pó metálico por feixe de laser



Fonte: Adaptado de Scagliusi (2015, p. 63)

Essas técnicas demandam a construção de suportes em determinadas partes da peça a ser construída. Tais estruturas exercem várias funções durante o processamento, como: fixar a peça na plataforma de construção; atuar como dissipadoras de calor do material fundido; reduzir os gradientes térmicos; e evitar que geometrias com faces negativas e inclinação abaixo de um certo ângulo sejam comprometidas.

Desde que sejam respeitadas as capacidades desses equipamentos, podem ser aplicados materiais de ligas comerciais à base de titânio, níquel, alumínio, cobre e aço inoxidável; e desenvolvidas novas ligas de acordo com as especificidades das aplicações e suas necessidades. As peças obtidas podem necessitar de pós-processamentos, como tratamento térmico para alívio de tensões residuais, e tratamentos de superfície como jateamento e polimento (VOLPATO, 2017).

As técnicas desses processos estão evoluindo de forma contínua, e já são encontradas no mercado impressoras direcionadas a fabricação de joias (Figura 13), bijuterias e relógios, nas quais é possível trabalhar com metais preciosos, como ouro 18k ou 14k em cores diversas, prata, platina e até mesmo latão (TAVARES; MAGALHÃES, 2019).

Figura 13 – Peças em ouro fabricadas por fusão de leito de pó metálico



Fonte: Snyder, 2014

A fabricação digital direta de peças de metal no setor joalheiro possibilita: eliminar todas as etapas presentes no processo de fundição por cera perdida; produzir qualquer tipo de forma por mais complexas que sejam; fabricar itens personalizáveis em várias escalas; e escolher materiais adequados a cada aplicação (MONTEIRO, 2015; ROSEN, 2014).

Por fim, cabe reforçar que o emprego das tecnologias de modelagem e fabricação digital abordadas transformam o modo de criar, fazer e comercializar as joias, ampliando suas potencialidades; uma vez que diminui e simplifica os processos, possibilita a análise e visualização prévia dos modelos, facilita a geração de alternativas e os testes, antecipa problemas, permite modificações ágeis, e viabiliza uma produção mais flexível e variada.

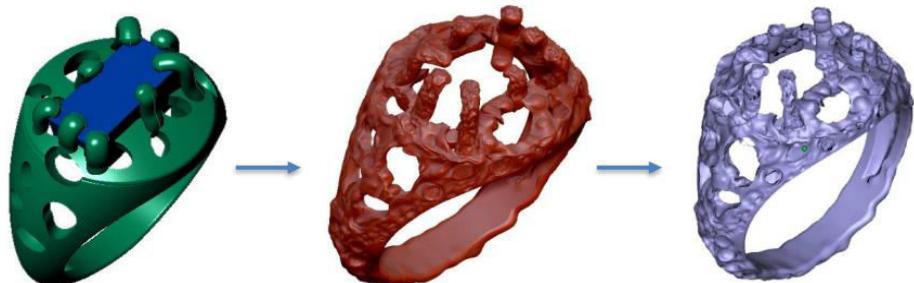
4 Casos de aplicação e integração das tecnologias

Para ilustrar a aplicação e a integração das tecnologias digitais no processo de criação de joias, a seguir será descrito dois processos de desenvolvimento de joias, um que aplica a manufatura aditiva e ou outro a subtrativa, ambos envolvem também o processo manual, evidenciando a associação entre o digital e o artesanal.

O primeiro foi desenvolvido pelo artista plástico e designer Junior De Souza Rodrigues, como projeto de conclusão de curso apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Design de Gemas e Joias da Universidade do Estado de Minas Gerais em 2018. Rodrigues optou por mesclar processos manuais e digitais, no desenvolvimento de uma coleção autoral que traduzisse sua identidade e origem e seus valores artísticos, resgatando os valores iconográficos e culturais presentes nos trabalhos manuais desenvolvidos no norte de Minas, na sua cidade de origem, Palmópolis. Para compor a estética da coleção foram trabalhadas texturas, resíduos óxidos e marcas intencionais de ferramentas na superfície reforçam a estética imperfeita e assimétrica assumida pelo autor.

Realizado de modo empírico, o desenvolvimento dos modelos foi dividido em quatro etapas: desenvolvimento 3d, confecção do molde, fundição e acabamentos. O desenvolvimento 3D envolveu a utilização de diferentes *softwares*, que atendiam as demandas do projeto. Para resolver questões técnicas como a espessura de chapa e a estrutura do modelo foi empregado inicialmente o Matrix 8.0. Este programa possui ferramentas e tecnologias específicas para o setor joalheiro, oferecendo resultados técnicos minuciosos. Em seguida, o arquivo foi exportado em OBJ para preservar as malhas poligonais do modelo. A partir dessas malhas, utilizando a mesa digitalizadora e o *software* Zbrush, o autor trabalhou a superfície de maneira livre, aplicando texturas e deformidades na peça, de modo a deixá-la com aspecto orgânico (RODRIGUES, 2018).

Figura 14 – Fases do processo de desenvolvimento da modelagem 3D

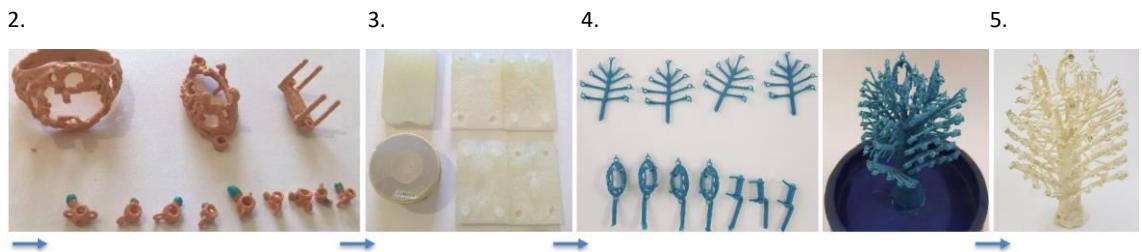


Fonte: Rodrigues (2018, p. 21)

Para finalizar e preparar o modelo para impressão 3D, foi empregado o Magics 20.3. Nesse programa foi realizado o fechamento poligonal e gerado o formato STL do arquivo. Essa extensão é formada por um sistema de triângulos vinculados, que recria a geometria da superfície do arquivo em um único sólido, possibilitando sua impressão 3D. Para a prototipagem foi empregada a resina padrão e a fotopolimerização por projeção de máscaras ou imagens (Idem, 2018).

As etapas do desenvolvimento do projeto podem ser organizadas em: (1) modelagem 3D; (2) prototipagem do modelo em resina; (3) confecção do molde de silicone; (4) injeção de cera no molde e montagem da árvore de cera; (5) fundição por cera perdida; (6) montagem e cravação das peças; (7) oxidação e acabamentos.

Figura 15 – Etapas 2, 3, 4 e 5 do desenvolvimento do projeto



Fonte: Rodrigues (2018, p. 23)

Após a fundição, as peças passaram pelas fases de montagem manual e acabamento com sulfureto de potássio para oxidação da prata. Posteriormente, parte da oxidação foi retirada pelo designer durante o polimento, de modo não controlado. Nas etapas finais os topázios imperiais foram cravados e as peças polidas novamente, de modo a realçar o brilho da superfície, destacando as características rudimentares propostas pelo autor (Figura 16).

Figura 16 – Modelos em prata 925 e processo de oxidação.



Fonte: Rodrigues (2018, p. 24)

O resultado do desenvolvimento pode ser observado na Figuras 17. Este projeto resultou da combinação de elementos percebidos e absorvidos pelo designer, somados à tecnologia e aos recursos disponíveis no contexto em que estava inserido no setor joalheiro. A modelagem virtual 3D foi utilizada como ferramentas de apoio ao saber tradicional, no qual o autor buscou traduzir valores simbólicos e subjetivos identificados na história familiar. Além disso, o emprego das texturas e os aspectos rudimentares contribuíram para o ganho na produtividade e o baixo custo da produção, uma vez que as imperfeições geradas na fundição como poros e buracos cooperaram para estética dos modelos.

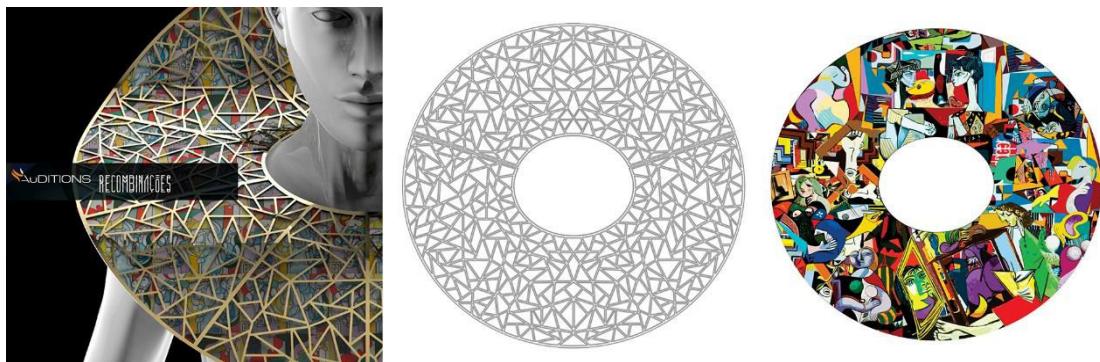
Figura 17 – Joias de prata 925 com topázio imperial



Fonte: Rodrigues (2018, p. 26)

O segundo projeto foi o colar Magide, criado pela designer Flávia Marieta Rigoni, no ano de 2015, para a última edição do AngloGold Auditions, que é o maior concurso de design de joias em ouro do mundo realizado pela empresa mineiradora AngloGold Ashanti. O adorno conceitual foi inspirado na geometrização das formas e volumes, nas pinturas e cores vivas do cubismo. Para o seu desenvolvimento a designer utilizou os softwares Rhinoceros, Photoshop e Illustrator. A peça pode ser dividida em duas partes, a parte da trama de ouro e a parte colorida de aço inox impresso digitalmente (Figura 18).

Figura 18 – Partes que compõem o colar Magide



Fonte: Elaborado pela designer Flávia Rigoni (2015)

A trama foi projetada no Rhinoceros e exportada em curvas 2D, que foram utilizadas como dados para a máquina de CNC Router, que realizou o corte por fresas. Devido as restrições de largura da chapa, a peça teve que ser dividida em inúmeras partes, e posteriormente montadas como um quebra cabeça. Já a imagem da parte colorida foi estruturada a partir de colagens e fotocomposições realizadas no Photoshop que tiveram como base as pinturas de Picasso. A colagem digital foi posteriormente vetorizada no Illustrator e impressa digitalmente em uma chapa de aço inox, que após a impressão foi cortada a laser (Figura 19).

Figura 19 – Partes da trama de ouro; b. chapa impressa digitalmente em aço inox



Fonte: Elaborado pela designer Flávia Rigoni (2015)

Uma vez montado o quebra cabeça da trama de ouro e conformada as partes coloridas, os ourives juntaram os dois materiais, utilizando a solda a laser e rebites colocados manualmente de forma cuidadosa, uma vez que a peça colorida não poderia receber calor e ser riscada por causa da superfície impressa (Figura 20).

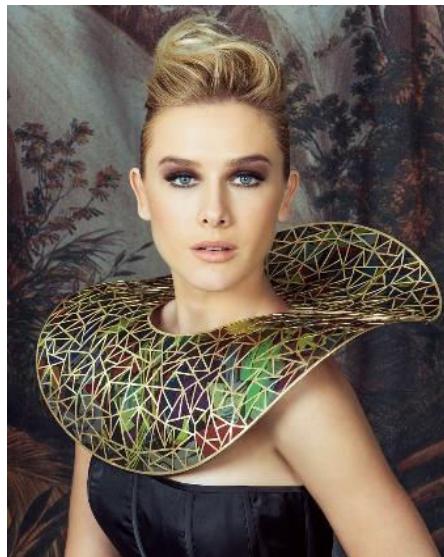
Figura 20 – Montagem e junção das partes



Fonte: Elaborado pela designer Flávia Rigoni (2015)

Na figura 21 é possível ver o resultado do colar Magide que integra em sua concepção diferentes ferramentas e processos. Na materialização da peça a experiência e a habilidade dos ourives foram essenciais na parte de montagem e acabamento, de modo que o trabalho manual tem o seu valor e importância no processo de desenvolvimento de um joia, esse conhecimento tácito não é substituído por uma máquina.

Figura 21 – Resultado do Colar Magide



Fonte: AngloGold Auditions (2015)

5 Considerações finais

O momento de transição para a quarta revolução industrial vivenciada pela sociedade nos dias de hoje, é caracterizada pela aplicação e a integração de tecnologias da informação, automação e controle, que visam promover a comunicação direta entre os sistemas, as máquinas, os produtos e as pessoas, viabilizando processos cada vez mais eficientes, autônomos e customizáveis (CAKMAKCI, 2019). No âmbito da joalheria, o desenho e a manufatura auxiliados por computador, somados à comunicação via web, ampliaram o acesso às joias, tendo em vista a redução nos custos de projeto, produção e divulgação, como também por uma condição mais colaborativa e participativa do usuário nesse processo, que torna se cada vez mais personalizado (DEMARCO *et al.*, 2019).

Essas transformações digitais permitem aos designers novas possibilidades de criar e modificar suas próprias ferramentas, investigando padrões estéticos para os diferentes métodos de produção e, ao fazer isso, descobrir territórios e criar conhecimentos. Nesse ambiente, ocorre uma fusão de aspectos da economia artesanal pré-industrial com métodos de produção industrial de alta tecnologia e redes de comunicação digital. Combinação que tem o potencial de transferir a energia de produtores industriais para o pequeno produtor e o consumidor, dando aos joalheiros e designers a oportunidade de produzir com características industriais em pequena escala e de forma customizada (BERNABEI, 2014; VERBRUGGEN, 2014).

A mão do criador não mais, necessariamente, precisa interagir diretamente com material; em vez disso, ele pode desenvolver objetos digitais com refinados movimentos do cursor através do uso de um *mouse* ou *tablet*. Assim como no martelo e a serra, as ferramentas de fabricação digital dependem da mão do fabricante e, da mesma maneira, introduzem limitações específicas (PETTERSSON, 2019).

Por fim, cabe reforçar que para se adaptar e acompanhar essas transformações digitais, o setor joalheiro e os profissionais que nele atuam necessitam modernizar os processos tradicionais de criação e fabricação com o apoio de tecnologias digitais, de modo a aperfeiçoar as atividades por meio do acréscimo constante e incremental da tecnologia na concepção, produção e comercialização do adorno corporal (ESPINOZA, 2013; VILLAMIZAR; RODRÍGUEZ, 2015).

6 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Os autores também agradecem ao artista plástico e designer Junior De Souza Rodrigues por disponibilizar seu projeto, apresentado nesse artigo como estudo de caso.

7 Referências

- ALMEIDA, B. M. **Tecnologias tridimensionais e o designer de joias empreendedor fluminense.** 2019. 123f. Dissertação (Mestrado em Design) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- AMORIM, W. G.; TEIXEIRA, M. B. S. **Integração de tecnologias na fundição simulada de joias de ouro.** Relatório técnico final de pesquisa de iniciação científica. Belo Horizonte: UEMG, 2007.
- AMORIM, W. G. **Territórios de invenção.** Design experimental de joias contemporâneas na Escola de Design, UEMG. 2022. 286f. Tese (Doutorado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- BARROS, A. M. **Fabricação digital:** sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental. 2011. 102f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BERNABEI, R. **Digital jewellery:** the democratisation of authorship and ownership. In: BUNNELL, K.; MARSHALL, J. (Org.) All makers now? Craft values in 21st century production. Conference Proceedings, Falmouth University, 10-11 July 2014, Conference Journal 1, p. 17-22, 2014.
- CAKMAKCI, M. Interaction in project management approach within industry 4.0. In: TROJANOWSKA, J. et al. (org.). **Advances in Manufacturing II**, v. 1, 2019, p. 176-189.
- DAVIS, D.; PETERS, B. Design Ecosystems: customising the architectural design environment with software plug-ins. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, 2013.
- DEMARCO, F.; BERTACCHINI, F.; SCURO, C.; BIOLTA, E.; PANTANO, P. **Algorithms for jewelry industry 4.0.** In: Sergeev, Y. D. Kvasov, D. E. (Org.) Numerical Computations: Theory and Algorithms. Third International Conference, NUMTA 2019 Crotone, Italy, June 15–21, Revised Selected Papers, Part I, 2019.
- ESPINOZA, C. **Inovação na criação de joias: uma reflexão sobre design, cultura e tecnologia.** Dissertação (Mestrado em Design de Equipamento) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- GOMBRICH, E. H. **Arte e ilusão:** um estudo da psicologia da representação pictórica. São Paulo: Martins Fontes, 2007.
- JOIA. In: **Merriam Webster Dictionary.** Merriam-Webster, c2022. Disponível em: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/jewelry>. Acesso em: 19 mar. 2022.

KRUTH, J. P. et al. **Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting.** Solid Freeform Fabrication. Austin: University of Texas. 2004.

MINEIRO, E. F.; MAGALHÃES, C. F. Design paramétrico e generativo: modos de explorar a complexidade. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 14, n. 2, p. 6-16, 2019.

MONTEIRO, M. T. F. **A impressão 3D no meio produtivo e o design:** um estudo na fabricação de joias. 2015. 129f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Design, Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

PASSOS, A. C. B. M. **Da Matéria ao Afeto:** a construção do significado da joia. Tese (Doutorado em Educação, Arte e História da Cultura) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018.

PETTERSSON, A. Craft in the age of digital reproduction - a research into digital reproduction and its aesthetics. **Journal of Jewellery Research**, v. 2, p. 76-91, 2019.

REAS, C.; MCWILLIAMS, C. **Form+Code in design, art and architecture.** New York: Princeton Architectural Press, 2010.

RODRIGUES, J. S. **Design autoral:** identidade, processos e tecnologias aplicados ao desenvolvimento de joias. 2018. 40f. Monografia (Especialista em Design de Joias) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

RODRIGUES, M. R.; NEUMANN, M.G. Fotopolimerização: princípios e métodos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 276-286, 2003.

RODRIGUES, A. Prototipagem rápida de joias. **Jóias com Rhinoceros**, 2019. Disponível em: <https://www.joiascomrhinoceros.com/prototipagem-rapida-de-jóias/>. Acesso em: 15 mar. 2022

ROSEN, D. Design for Additive Manufacturing: Past, Present, and Future Directions. **Journal of Mechanical Design**, v. 136, n. 9, setembro 2014.

SCAGLIUSI, N. **Do cinzel ao bit:** a revolução das tecnologias digitais no design de joias. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, D. N. **A tridimensionalidade da superfície vestível e a impressão 3D:** Processos, estratégias e experimentações. 2020. 173 f. Tese (Doutorado em Design) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2020.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** Florianópolis: UFSC, 2005.

SIMON, Herbert. **Las ciencias de lo artificial.** Granada: Editorial Comares, 2006.

SIU, N. W. C.; DILNOT C. **The challenge of the codification of tacit knowledge in designing and making: a case study of CAD systems in the Hong Kong jewellery industry.** The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 2001.

TAVARES, T.; MAGALHÃES, C. O design de adornos corporais em um cenário de mudanças tecnológicas. In: **Anais do 13º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design**, 2018. São Paulo: Blucher, 2019.

TECNOLOGIA. In: **Conceito.de:** Dicionário de conceitos online. Conceito.de, c2022. Disponível em: <https://conceito.de/tecnologia>. Acesso em: 18 mar. 2022.

TEDESCHI, A. **AAD Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies using Grasshopper**, Italy: Le Penseur, 2014.

TEIXEIRA, M. B. S. **Os objetos intermediários da concepção na construção coletiva da identidade do produto de joalheria**. 2002. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

VERBRUGGEN, D. The digital craftsman and his tools. In BUNNELL, K.; Marshall, J. (Org.), **All makers now: craft values in 21st century production**, International Conference Proceedings, Autonomic Research Group, Falmouth University, 10/11, p. 173-177. Falmouth: Falmouth University, 2014.

VOLPATO, Neri (Org.). **Manufatura Aditiva: Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

UNGER, M. Temptation. In: LINDEMANN, WILHELM (Ed.). **Thinking jewellery: on the way towards a theory of jewellery**. Stuttgart: Arnoldsche, 2011, p. 303-319.

YAP, Y. I.; YEONG, W.Y. Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review. **Virtual and Physical Prototyping**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 195-201, 2014.