

4

Fabricação digital: Design Paramétrico e Tecnologia de Manufatura Aditiva

Nesta seção fundamenta-se, tecnicamente, os conceitos de design paramétrico e das tecnologias de manufatura aditiva, que serão esteio para o capítulo de experimentação.

O uso de sistemas CAD (*Computer Aided Design*), foi o primeiro passo para o rompimento com os processos tradicionais de concepção do produto, antes, geralmente iniciado a partir de desenhos sobre o papel. A crescente exigência por produtos individualizados tem tornado o uso da tecnologia de design assistido por computador (CAD) um recurso basilar. A função de redimensionamento automático tornou-se uma parte essencial desses sistemas. Sua aplicação no design de vestuário representa a viabilidade de resposta rápida e eficiente no processo de individualização do produto.

Agora, tem-se o design paramétrico e a modelagem algorítmica, que correspondem a um conjunto de regras ou relações lógicas, geométricas e paramétricas, numa determinada sequência. Essas ferramentas apresentam, respectivamente, duas funções interessantes para os processos de customização em massa: automatizam a alteração de parâmetros e relacionam as alterações automaticamente em toda a superfície de um objeto.

Tais propriedades têm sido determinantes para que o desenho paramétrico esteja sendo apontado como uma das ferramentas pertencentes aos novos fundamentos do design contemporâneo. A técnica, de acordo com Henriques & Bueno (2010), começou a ser usada na arquitetura na década de 90. Mas, Tramontano (2015) destaca que apenas recentemente, em função da viabilidade de materialização proporcionada pela fabricação digital, passou a ser explorada como possibilidade concreta.

Hoje, a popularidade das ferramentas generativas e o modo como os designers podem explorar alternativas e desenvolver habilidades tem crescido exponencialmente. A consciência das possibilidades criativas das ferramentas digitais também reforça a sensibilidade de profissionais para a estética ascendente do design computacional⁶⁰, cada vez mais aceita como um estilo global emergente. É a afirmação da cultura do design digital, que pode e precisa confrontar o projeto e a realidade desde a fase inicial, dando respostas tanto ao desempenho como aos critérios funcionais e soluções adaptadas, para superar as restrições da indústria contemporânea.

Muitos dos aspectos aqui discutidos não estão exclusivamente relacionados ao design de vestuário. Buscou-se, por exemplo, a Arquitetura, em que os programas computacionais paramétricos são usados em disciplinas de ideação, e cujos profissionais foram os primeiros a explorar as potencialidades dessas ferramentas no projeto. Portanto, os conceitos podem ser aplicados de forma irrestrita em outros processos de fabricação.

4.1 Design paramétrico

O design paramétrico baseia-se em uma ideia-chave de projetar com códigos, considerando que a representação geométrica tridimensional dos elementos construtivos é associada a comportamentos específicos ou atributos que são denominados parâmetros.

O parâmetro pode ser entendido como um elemento variável de fator quantificável, capaz de configurar um sistema de relações entre elementos ou outras relações. Seu uso pode ampliar o campo de possibilidades formais através da manipulação de relações, esboçando geometrias associativas que não são soluções fixas. Por meio da inserção de alguns elementos, que mantêm seus atributos inerentes ao alcance de uma linguagem de programação⁶¹ definida, gera-se e produz-se alterações em toda a superfície de um modelo. De acordo com Woodbury (2010), assim introduz-se uma mudança fundamental pela qual partes se relacionam entre si e modificam-se de maneira sistemática, coordenando e restabelecendo conexões.

⁶⁰Design computacional: é a aplicação de estratégias computacionais ao projeto com o objetivo de melhorar continuamente os processos através da codificação de decisões de design usando uma linguagem de computador.

⁶¹Linguagem de programação: método padronizado para comunicar instrução para um computador. É um conjunto de regras sintéticas e semânticas usadas para definir um programa de computador.

Ainda na mesma lauda acima referenciada, Woodbury (2010) relata que o primeiro sistema de desenho assistido por computador (CAD) era paramétrico. O *Sketchpad*⁶² (Figura 25), forneceu um mecanismo baseado em propagação, e um solucionador simultâneo baseado no relaxamento. Isso tornou-se central para muitas linguagens de restrição – a operação de fusão que combina duas estruturas similares em uma única estrutura dirigida pela união de todos os parâmetros de restrição do desenho.

Tedeschi (2014) explica que o *Sketchpad*, foi desenhado para testar a interação humano-computador e permitir que o designer pudesse desenhar formas primitivas como: pontos, linhas e arcos, usando uma *light-pen* como input. Era uma característica de inovação que facilitava os links entre objetos, baseada numa lógica associativa avançada (modelagem de dados) chamada de *restrição atômica*. Entretanto, as inovações trazidas pelo primitivo programa CAD não foram imediatamente abraçadas pelos softwares comerciais, como o Autocad®.

Tedeschi (2014) continua descrevendo que o passo seguinte ocorreu em 1987, com a introdução do software Pro/ENGINEER®, desenvolvido por Samuel Geisberg, para o design de um sistema mecânico. O programa permitia ao usuário associar componentes paramétricos tridimensionais controlados pelo uso de inputs de controle. Cada input corresponde a um parâmetro que contém um potencial real para se tornar um dado que modifica outros parâmetros, porém cada um deles é uma entidade, e, portanto, são independentes entre si.

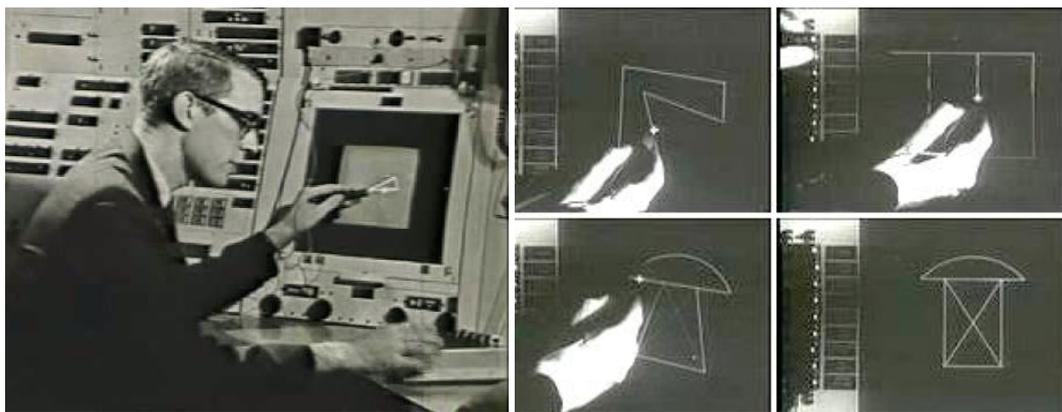


Figura 25 Interface do *Sketchpad*, Ivan Sutherland no Laboratório Lincoln MIT (1963).

Fonte: TEDESCHI (2014)

⁶²Sketchpad: editor gráfico desenvolvido por Ivan Sutherland, no MIT, durante seu curso de doutorado em 1963. Por vários motivos é o marco na informática, sendo o primeiro editor gráfico orientado a objetos, definido como “*A máquina de sistema de comunicação gráfica*”. Estava criado o elemental programa de desenho assistido por computador (CAD).

Os parâmetros contêm informações que não estão aparentes; baseiam-se fundamentalmente em configurações algébricas. São praticamente pura sintaxe sintetizada no fator digital algorítmico, o qual pode transmutar-se em variadas configurações formais, tornando-se uma potencial ferramenta generativa (SCHEEREN & SPERLING, 2013, p.256).

A configuração dos parâmetros e suas relações podem ser suportadas pelas técnicas e ferramentas oferecidas pelas ciências mais recentes, em particular pelas lógicas, matemáticas [...] e computacionais. O computador dá a possibilidade de expressar parâmetros e suas relações através da configuração (autocorrigindo) de rotinas⁶³ (BUCCI & MULAZZANI in TEDESCHI, 2014, p.20).

Os designers perceberam que programas sofisticados poderiam gerir dados complexos além das capacidades humanas estruturando rotinas e procedimentos. Este tipo de modelagem computacional depende de linguagens de programação que expressam instruções numa forma que pode ser executada pelo computador, por meio de um processo passo-a-passo denominado algoritmo⁶⁴.

4.1.1 Modelagem algorítmica

O algoritmo é definido como um processo computacional para endereçamento de um problema cuja solução é definida por um número finito de etapas. Isto envolve a dedução, a indução, a abstração, a generalização e a estrutura lógica (Terdezis, 2006). Através da extração sistemática de princípios lógicos e o desenvolvimento de um plano de solução genérica, a modelagem algorítmica permite dividir o problema dentro de uma configuração de etapas simples, que podem ser facilmente computadas. Os algoritmos podem ser simbolizados com precisão a partir da linguagem de programação, que é um conjunto de regras sintáticas e semânticas usadas para definir um programa de computador.

Uma receita pode ser considerada como algo parecido com um algoritmo. Pode-se definir o procedimento para fazer um bolo com base numa lista simples de instruções como misturar os ingredientes, colocar numa assadeira, levar ao forno, remover do forno, deixar esfriar. Entretanto, Tedeschi (2014) elucida que essas informações não podem ser propriamente consideradas como um algoritmo, se as instruções não estiverem bem definidas. Quais ingredientes devem ser misturados? Quanto tempo deve ficar no forno? O autor explica que questões

⁶³Tradução livre da autora: 'The setting of parameters and their relations must be supported by the techniques and tools offered by the most current sciences, in particular by logics, mathematics [...] and computers. Computers give the possibility to express parameters and their relations through a set of (self- correcting) routines'. TEDESCHI, A. **Algorithms Aided Design**: parametric strategies using grasshopper. Italy [s.n.] 2014, p.20.

⁶⁴Algoritmo: O termo foi mencionado depois do século IX pelo matemático persa Al-Khwarizmi.

básicas como essas, apontam para a importância de quatro propriedades básicas dos algoritmos:

1. *Um algoritmo é um conjunto inequívoco de instruções devidamente definidas.*
Algoritmos dependem de instruções de input. O resultado vai ser incorreto se o algoritmo não está bem definido. Da mesma forma, se as etapas para a preparação do “bolo” forem invertidas ou ignoradas, as chances de o resultado ser bem-sucedido diminuem.
2. *Um algoritmo espera um conjunto definido de inputs.*
O input pode ser diferente pelo tipo e pela quantidade. A etapa {1} requer ingredientes, a etapa {2} requer a informação sobre a temperatura e a etapa {3}, o tempo que deve ficar no forno. Além disso, cada input tem uma pré-condição, ou seja, requisitos que devem ser atendidos, como por exemplo, a variação de temperatura para cozimento, que pode variar entre 160°C – 200°C.
3. *Um algoritmo gera uma saída bem definida (Figura 26).*



Figura 26 Representação esquemática de um algoritmo.
Fonte: TEDECCHI (2014). Adaptado pela autora.

4. *Um algoritmo pode produzir mensagens de erros e avisos dentro do editor específico.*
Um input é específico. Se as pré-condições não são atendidas, por exemplo, se os números são imputados no lugar do texto, o algoritmo vai retornar com uma mensagem de erro.

Quando os cálculos algorítmicos são executados pelo computador, um editor específico é usado para digitar as instruções. Os editores podem ser aplicativos autônomos ou incorporados em um aplicativo de software.

Os algoritmos consistem em diferentes classes. Uma classe de algoritmo que leva a um número, chamada de *procedimento de computação*; e um algoritmo que gera um sim ou não, chamado de *procedimento de decisão*.

Podem também resultar em geometrias. Se um editor integrado é usado no CAD ou outro software de modelagem, cria-se uma geometria 3D por manipulação, um conjunto padrão de primitivas fornecidas pelo software ou processualmente definidas por uma sequência de instruções.

Pode-se citar como exemplo uma linha, que pode ser definida por dois pontos, um inicial e um final; os pontos, por sua vez, podem ser definidos pelas suas coordenadas {x,y,z}. Os objetos já não são manipulados com um mouse, em vez disso, são definidos por procedimentos expressos em uma linguagem de programação específica: dentro do Autocad®, Maya®, Rhinoceros® ou outras plataformas de linguagens cruzada.

Essa abordagem – geralmente referida como script⁶⁵ – é completamente nova para designers. Ela transforma o link entre a ideia e o resultado final. Esse script consiste em dois ambientes de trabalho: o editor e o ambiente de modelagem 3D. Ademais, produz dois outputs: o algoritmo e o output do algoritmo, constituídos por geometria associativa 3D ou 2D.

É importante destacar que o output final não é apenas um “sinal digital”, mas pode ser considerado como um modelo digital interativo que responde às variações do input, manipulando todo o sistema.

Os algoritmos estabelecem relações associativas entre diferentes entidades, como números, primitivas geométricas⁶⁶ e dados. Geometrias complexas podem ser definidas por uma sequência de instruções sem ambiguidades que conduzem inter-relações. O design algorítmico permite que os usuários criem um processo, no lugar de apenas um único objeto.

O conceito central de design algorítmico está no seu potencial de gerar e controlar a complexidade do projeto, além das capacidades humanas. Uma sequência bem definida, associada a regras e restrições, pode levar a formas sem precedentes ou resultados imprevisíveis, porém coerentes com os parâmetros estabelecidos. O design algorítmico permite que projetistas possam encontrar novas soluções, além das limitações dos tradicionais softwares CAD e modeladores 3D.

A modelagem algorítmica exigirá a definição de uma estratégia capaz de sistematizar o processo, hierarquizar as informações, articular e associar os parâmetros envolvidos criando um sistema gerador automatizado.

A questão agora se volta para como melhorar os processos de design, ou mais rigorosamente, como explorar possíveis alternativas de design a partir da modelagem algorítmica.

4.1.2 Diagramas paramétricos

Desenvolvedores de software têm apresentado ferramentas visuais para fazer scripts mais acessíveis que possam ser utilizados por usuários com pouca ou nenhuma habilidade em programação. As regras e dependências associativas podem ser expressas usando um método gráfico baseado em diagramas de nó⁶⁷.

⁶⁵Script: conjunto de instruções para que uma função seja executada em determinado aplicativo.

⁶⁶Primitivas geométricas: formas geométricas básicas, como círculo, o triângulo e o quadrado.

⁶⁷Diagramas de nó: são a representação geométrica dos inputs, outputs e conexões que formam um fluxograma.

O Sketchpad, citado no item 4.1, representou todas as restrições definidas durante o processo de desenho. Através de um diagrama especial (Figura 27), o usuário não só poderia visualizar a árvore das dependências, mas poderia manipular o gráfico com efeitos instantâneos no desenho.

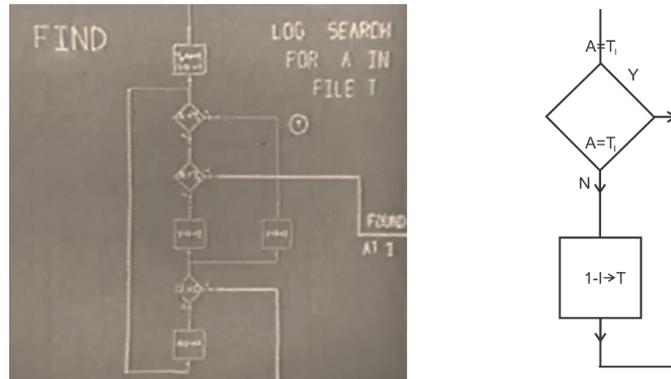


Figura 27 Visualização gráfica das restrições de projeto através de um fluxograma.
Fonte: TEDESCHI (2014). Adaptado pela autora.

Tedeschi (2014) explica que muitos softwares têm facilitado a interação entre usuários e objetos digitais, por meio de manipulação direta baseada em diagramas de nó. Os sistemas de softwares baseados em diagramas, como o Grasshopper® (que será tratado no próximo subitem), permite que os usuários criem geometrias complexas através da associação de primitivas paramétricas. O script visual torna possível o processo de construção de uma linha a partir da conexão de dois pontos, de um quadrado conectando-se quatro linhas, etc.

Semelhante ao script, o script visual baseia-se em dois ambientes de trabalho principais: o editor visual e o ambiente de modelagem 3D. Esse processo gera duas saídas: o diagrama de nó, também chamado de diagrama paramétrico ou algoritmo visual; e o diagrama paramétrico, constituído por uma geometria paramétrica 2D ou 3D.

Segundo Tedeschi (2014), o diagrama consiste em nós e conexões. Os nós quadrados são as principais funções: desenhar um círculo, dividir o círculo com uma linha. Os nós circulares são os parâmetros: o raio de cada círculo e o número de subdivisões (Figura 28). O diagrama de saída é a mesma geometria gerada através desse procedimento passo-a-passo.

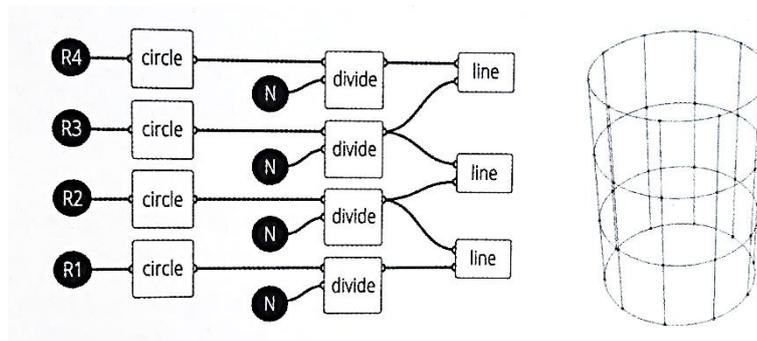


Figura 28 Representação dos nós e suas conexões.
Fonte: TEDESCHI (2014). Adaptado pela autora.

“A vantagem do diagrama de nó reside na lógica intuitiva que permite o usuário interagir rapidamente com os parâmetros. Se o parâmetro “N” na figura acima, por exemplo, é modificado, mais linhas seriam geradas” (TEDESCHI, 2014, p.28). O autor ainda explica que o diagrama paramétrico tem um potencial de criação de modelos associativos, que exploram múltiplas configurações através do controle dos parâmetros de input.

4.1.3 Modelagem algorítmica com Grasshopper®

No capítulo 2 falou-se sobre o início do uso de sistemas CAD/CAM, específicos para a produção de vestuário. Esses sistemas atuam em diversas frentes de produção e trazem outra perspectiva para os processos. Na ocasião, o uso daquelas ferramentas, trouxe uma outra perspectiva na produção. Principalmente, levando-se em conta, a necessidade de atender o abastecimento da produção em massa.

Tendo em vista a tendência atual que sinaliza um retorno ao consumo de itens de vestuário produzidos sob medida, só que agora em grande escala, e a manufatura digital, cada vez mais presente na produção, vê-se na modelagem algorítmica uma ferramenta que pode oferecer resposta rápida e eficiente nos processos de customização em massa.

Como observou Costa (2016), softwares antes utilizados apenas em projetos de engenharia e arquitetura, hoje têm sido explorados no campo do design de produtos, incluindo os de vestuário. Isso deve-se à capacidade desses sistemas de alterar toda a superfície da geometria, a partir da alteração de um ou mais parâmetros.

Neste item, vai-se deslindar algumas técnicas e estratégias para explorar scripts visuais utilizando o Grasshopper® (GH), que é uma das ferramentas de

modelagem algorítmica mais populares e avançadas. Esse software foi criado por David Rutten em 2007, e na ocasião foi nomeado de *Explicit History*, mas no ano seguinte foi renomeado como Grasshopper.

O GH é um plug-in que funciona no software de modelagem tridimensional Rhinoceros (Rhino). Um plug-in pode ser entendido como um programa de computador usado para adicionar funções a outros programas maiores, promovendo alguma funcionalidade especial ou muito específica.

A janela do GH é ativada, quando se escreve o nome do programa na linha de comando do Rhino e sempre funciona em paralelo com o software. Sua interface é dividida em quatro abas: (1) barra de menu, (2) aba de componentes, (3) barra de ferramentas e a (4) área de trabalho (Figura 29).

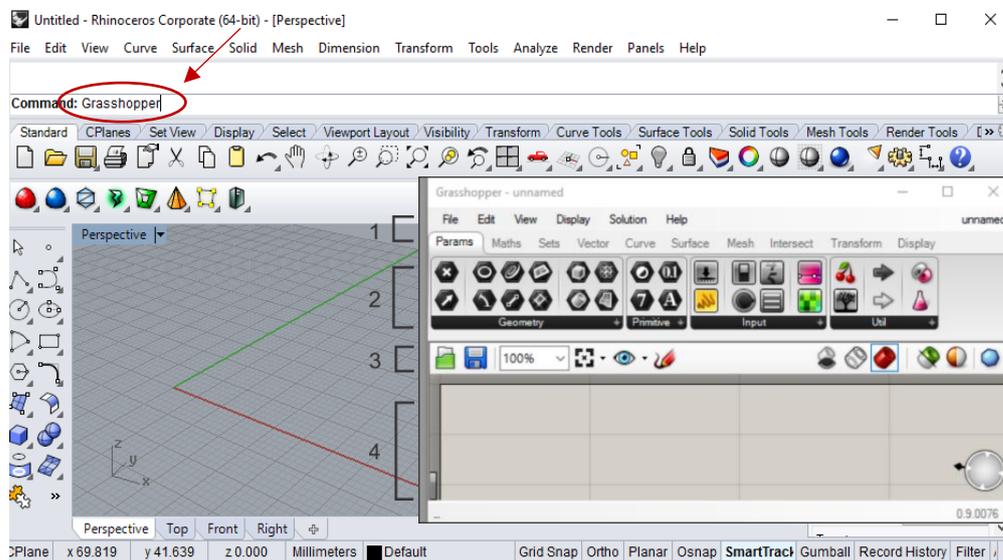


Figura 29 Ambiente de modelagem do Rhino e a interface do Grasshopper.
Fonte: TEDESCHI (2014,). Adaptado pela autora.

As formas criadas no GH através da conexão dos objetos gráficos, chamados de componentes, são visualizadas no ambiente de modelagem 3D do Rhino. Os componentes são, na realidade, os nós do diagrama paramétrico que definem e controlam a geometria 3D que está sendo construída. Podem representar primitivas (pontos, curvas, superfícies) operações geométricas (extrusão, rotação, revolução), funções lógicas etc.

Os componentes (Figura 30) não funcionam como botões. Para capacitá-los, o usuário deve arrastar o ícone desejado para a área de trabalho. Cada componente torna-se um nó usado para construir um conjunto de instruções, como um algoritmo visual. Cada painel da aba de componentes, pode ser expandido para exibir todo um conjunto de funções disponíveis.

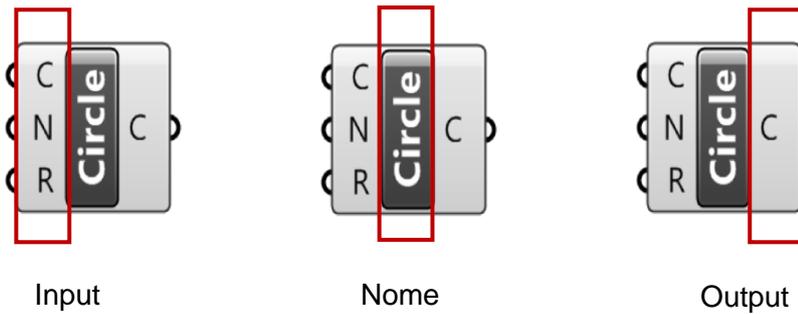


Figura 30 Componente padrão *Circle* e suas seções. Fonte: elaborado pela autora.

A *definition* (conjunto de algoritmos) pode ser salva na extensão padrão do GH que é “.gh”. Este formato não é executável para abrir um algoritmo salvo, o usuário tem que iniciar o Rhino, abrir o Grasshopper e então selecionar o arquivo.

Uma geometria construída no GH não pode ser previamente editada a partir das funções do Rhino. Isso acontece porque o plug-in não gera apenas uma geometria, mas um conjunto de geometrias que podem ser alteradas pela mudança dos parâmetros de input. Por conta disso, é necessário utilizar a função “bake” do GH, através de um clique com o botão direito sobre o componente desejado, para que seja possível habilitar a edição a partir do Rhino.

Costa (2016) ressalta que na modelagem algorítmica, uma vez que a geometria esteja com suas funções inter-relacionadas, ela apresenta uma série de informações definidas em função de parâmetros. Quando algum desses parâmetros é alterado, toda a geometria é automaticamente atualizada. Esse processo confere grande liberdade de adaptação do objeto que está sendo construído de forma rápida e assertiva.

4.2 Manufatura aditiva

Este item vai introduzir os conceitos básicos da manufatura aditiva, visto que essa tecnologia se apresenta, cada vez mais, como uma importante ferramenta em diversos segmentos. O discurso inicia-se com as implicações do uso da manufatura aditiva no design, com o intuito de ajudar no entendimento de como essa tecnologia tem mudado todo o processo de desenvolvimento do produto.

Manufatura aditiva (MA) é o termo científico para o que costumava ser chamado de prototipagem rápida e o que hoje popularmente intitula-se de impressão 3D. Os sistemas de prototipagem rápida surgiram no final da década de 80, com a introdução da tecnologia de estereolitografia, um processo de solidificação de camadas de material sensível à luz usando tecnologia a laser.

Gibson et al. (2015) explicam que o termo prototipagem rápida (RP) é usado por uma variedade de indústrias para descrever um sistema que cria rapidamente a representação de parte do produto antes do lançamento final ou da sua comercialização. Em outras palavras, a ênfase está na concepção rápida de algum produto, cujo resultado é um protótipo ou uma modelo base para outras amostras, e eventualmente base a partir da qual o modelo final será derivado. Faz-se necessário revisitar esse conceito, para destacar que a diferença crucial é que no lugar de protótipos, hoje já é possível construir objetos a partir de processos de MA aptos para o uso final.

A impressora 3D é capaz de materializar objetos tridimensionais a partir de formas projetadas no ambiente virtual, em sistemas de desenho auxiliado por computador (CAD). A tecnologia MA até pouco tempo era restrita às grandes indústrias por conta do alto custo dos equipamentos. Mas, desde 2003, com a expiração da patente de Chuck Hull, vê-se uma constante redução de preços aliada à crescente variedade de modelos de impressoras 3D cada vez mais acessíveis. As pessoas podem modelar, compartilhar e fabricar seus próprios produtos, potencializando a capacidade humana de gerar inovação.

Em 2015 estudos prospectivos indicavam que o mercado de MA cresceria cerca de 30% ao ano impulsionado por pesquisas científicas, desde então, a tecnologia tem apresentado avanços significativos. A indústria automobilística já realiza testes com peças produzidas a partir de processos de MA em impressoras com capacidade de produção em escala industrial. O design de produtos para necessidades especiais tem projetado cadeiras de rodas e próteses mais confortáveis e fáceis de manusear, customizadas para cada usuário. Na medicina, cópias fidedignas de órgãos e outras partes do corpo, estão sendo usadas para auxiliar na definição de estratégias em procedimentos cirúrgicos ou para fins educativos. A administração de alimentos e medicamentos dos Estados Unidos autorizou em 2015 a produção de pílulas solúveis impressas em 3D para tratar crises de epilepsia. Na arquitetura, estruturas inteiras já foram construídas com base nos processos de manufatura aditiva, como a ponte criada na Holanda em 2017, por Joris Laarman.

Como se vê, o campo de aplicação é bem extenso e não se restringe aos exemplos que foram acima citados. Acredita-se que dentro de poucos anos a MA será uma tecnologia de produção em larga escala estabelecida na indústria. A adoção desse sistema tende a mudar não só a cadeia de produção industrial, mais também a forma de fazer negócios, com novos produtores que incorporam a figura de “proprietário-fabricante”. A eliminação da necessidade de estoques e redução

de gastos com transporte são outras consequências que podem ocorrer com o uso da manufatura aditiva na produção industrial.

Do mesmo modo que a internet eliminou as distâncias e as barreiras para a informação, as impressoras 3D estão começando a eliminar as do mundo material. Assim como pode-se enviar um arquivo “PDF” (*Portable Document Format*) virtualmente por e-mail e imprimir em uma impressora 2D, um arquivo “STL” (*stereolithography apparatus*), que é o formato mais amplamente utilizado nas impressoras 3D, pode ser enviado para qualquer parte do mundo pela internet e ser materializado em três dimensões (Chicca Junior & Castillo, 2014). Os softwares CAM (*computer aided manufacturing*) são o elo entre o projetista e a máquina que vai dar a existência material ao objeto desenvolvido virtualmente.

Há três caminhos para se manufaturar objetos em impressoras 3D, a digitalização, o download de arquivos no formato “stl”, ou a partir da criação ou edição do objeto em um software de modelagem tridimensional. Grellmann (2001) explica que a MA requer um volume fechado do modelo, isto é, os dados devem especificar um lado interno, um lado externo e as fronteiras do modelo. Este requisito assegura que todas as seções transversais são curvas fechadas, criando, assim, um objeto sólido.

O autor ressalta que outros pontos devem ser considerados quando se prepara um objeto para manufatura-lo aditivamente, como a orientação das peças, a necessidade de suportes, a verificação de existência de paredes finas, detalhes pequenos como furos ou aberturas de dimensões muito reduzidas, texturas, etc.

Como foi dito brevemente no capítulo 3, o processo de construção do objeto a partir da MA, ocorre a partir da deposição de sucessivas camadas, assim sendo, depois da modelagem, a ação final é dividir o modelo em camadas bidimensionais (Figura 31), utilizando um software que gera um comando numérico, com base em coordenadas, que contém todas as informações que a impressora precisa para construir o objeto e seus suportes, quando for o caso.

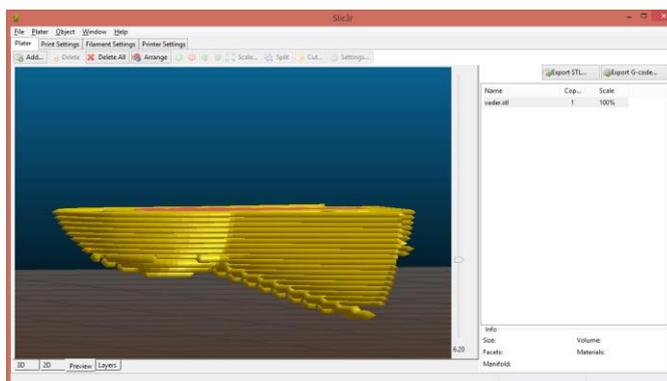


Figura 31 Interface de software de “fatiamento” Fonte: arquivo pessoal.

O tempo de impressão vai depender do tamanho e da complexidade do modelo. Outros fatores que incidem diretamente nessa questão são as configurações de densidade e a resolução (qualidade) da impressão. A densidade (*infill*) que se refere a estrutura interna do modelo, pode ser dispersa ou substancial. Uma porcentagem superior vai resultar em um objeto mais sólido, enquanto que 0% vai gerar um objeto completamente oco. Já a resolução, é atribuída à espessura da camada de impressão. A mais comumente usada é a de 0,2mm, em que há um equilíbrio entre a qualidade da superfície e a velocidade de impressão do objeto.

As tecnologias de manufatura aditiva se diferenciam umas das outras na forma como constroem suas camadas e/ou pela natureza da matéria-prima utilizada. Os processos de MA dividem-se em três categorias, os sistemas baseados em líquidos, sistemas baseados em pó e sistemas baseados em sólidos. Nos itens a seguir, vai-se discorrer sobre cada um desses sistemas, explicitando suas principais características e seus métodos.

4.2.1 Sistemas de Manufatura Aditiva

Nos subitens a seguir, vai-se discutir os processos que atualmente são usados na tecnologia de MA, mas que foram originalmente desenvolvidos para serem usados na pregressa prototipagem rápida. Algumas tecnologias que serão aqui citadas são aquelas que atualmente têm demonstrado potencial de uso generalizado na fabricação de produtos de uso final.

Sistemas baseados em líquidos

As abordagens de fabricação de aditivos de camada à base de líquido, quase que exclusivamente, envolvem a formação de um sólido por meio da cura seletiva de regiões dos polímeros fotossensíveis (HOPKINSON et al., 2006). Em outras palavras, o líquido é convertido para um estado sólido durante o processo.

A estereolitografia (*Stereolithography* - SLA), gênese de todas os métodos de prototipagem rápida foi patenteada em 1986 por Chuck Hull. O processo utiliza um feixe de laser ultravioleta para iniciar a cura e solidificação das camadas do objeto sobre uma plataforma (Figura 32). Segundo Takagari (2012), essa técnica

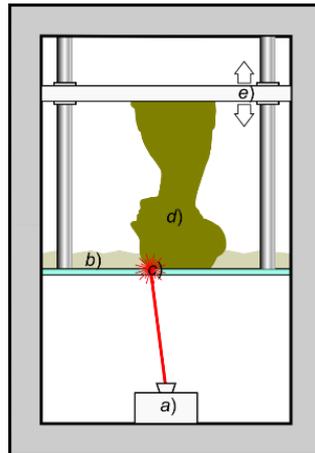


Figura 32 Representação do sistema de impressão à base de líquidos, onde (a) dispositivo emissor de luz (Laser ou DPL); (b) banho de resina líquida foto polimerizadora; (c) reservatório (d) objeto em construção; (e) plataforma móvel de elevação. Fonte: wikipedia.com.

é a mais popular nas aplicações de precisão porque permite figuras com fatias de até 60microns⁶⁸. Entretanto, seu custo ainda é muito dispendioso.

Comparada com outros processos, possui precisão e definição superior. Apesar disso, as propriedades dos materiais utilizados, tendem a ser inferiores quando comparados com outros métodos, e a sensibilidade à umidade também pode ser um problema no uso de resinas fotocuráveis. Como exemplo dos principais sistemas que utilizam os princípios dessa tecnologia, pode-se citar o *Jetting System*, *Direct Light Processing*, *High-Viscosity Jetting*, e o *Maple Process*.

Outro sistema que tem sido amplamente explorado nessa categoria é o Processamento de Luz Direta (*Direct Light Processing* – DPL) com versões desktop. Enquanto no sistema SLA, a forma de "ativar" a reação de fotopolimerização (cura) é usando um laser para "desenhar" as camadas do objeto; no DPL, um projetor de luz UV digital, incide a iluminação sobre toda a fatia do objeto. No quadro 2, apresenta-se algumas das principais impressoras que utilizam os sistemas mais usuais com base em líquidos.

⁶⁸Mícron: é uma unidade de tamanho equivalente a 1 milésimo de milímetro, é representado pelo símbolo μ .

Impressora 3D	Método	Resina	Área de construção	Resolução (µm)	Custo aproximado
Formlabs Form 2	SLA	Padrão; transparente; resistente; flexível; moldável; dental; cerâmica.	145x145x175	25-100	R\$15,745,00
3D Systems ProJet 1200	SLA	Padrão; transparente; resistente; moldável.	43x27x150	30	R\$ 22.050,00
XYZPrintig Nobel 1.0A	SLA	Acrílicas multicoloridas; flexível; moldável	128x128x200	130	R\$9.000,00
MoonRay S	DPL	Padrão; transparente; resistente; moldável; dental.	127x81x203	100	R\$18.000,00
B9Creator v1.2	DPL	Padrão; transparente; resistente; dental.	57x32x203	30-70	R\$20.700,00

Quadro 2 Relação das impressoras que utilizam os sistemas baseados em líquido mais usuais.
Fonte: Desenvolvido pela autora.

Sistemas baseados em pó

As propriedades do material e a estabilidade das peças que podem ser alcançadas com os processos baseados em pó têm-se apresentado como um método de MA de grande potencial. Apesar do pó representar um conjunto de partículas sólidas, Grellmanne (2001) explica que esta categoria foi intencionalmente criada como uma classe separada dos sistemas baseados em sólidos, pelo fato do pó ser representado por grânulos com dimensões muito menores em relação às partículas sólidas.

As impressoras 3D com sistemas baseados em pó podem criar objetos utilizando uma grande variedade de materiais. Estes incluem cera, poliestireno, nylon, vidro, cerâmica, aço inoxidável, titânio, alumínio e diversas ligas, incluindo a liga cromo cobalto. A matéria-prima em pó é sinterizada ou fundida por um laser, que varre seletivamente a superfície de um leito recoberto de pó para criar uma forma sólida (Figura 33).

Nesta categoria, pode-se dizer que a Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* – SLS) é o sistema mais empregado com um processo que é em muitos aspectos é, em muitos casos, similar a estereolitografia.

Uma das características do sistema SLS, é que não há a necessidade de estruturas de suporte, já que o pó (polímero, cerâmica, vidro ou metal) atua como material auto suportado, permitindo o processamento de estruturas extremamente complexas e suprimindo a preocupação com possíveis danos que poderiam acontecer no momento de remover a estrutura de sustentação. Além disso, permite a impressão de estruturas articuláveis já montadas, com acabamento superior ao de outros processos, por não precisar de estruturas de suporte.

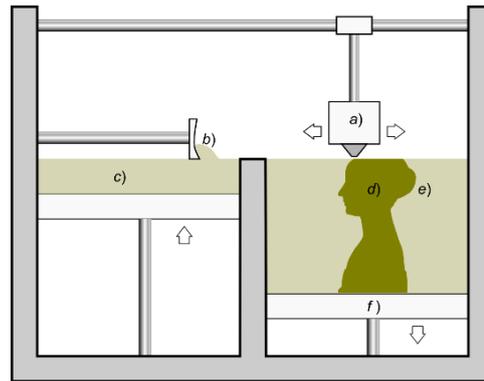


Figura 33 Representação esquemática do sistema de impressão à base de pó, onde (a) cabeça móvel que expurga um ligante ou partículas de laser para sinterizar o pó na superfície do leito; (b) pistão que desloca o polímero em forma de pó; (c) leito recoberto de pó; (d) objeto em construção; (e) material não fundido; (f) plataforma móvel. Fonte: wikipedia.com.

Uma variação da Sinterização Seletiva a Laser foi desenvolvida com a capacidade de produzir peças de metal sem a necessidade de um revestimento aglutinante e de pós processamento, é o sistema Sinterização Direta de Metal a Laser (*Direct Metal Laser Sintering – DMLS*). Nesse método, os objetos criados a partir de uma impressora DMLS, tem densidade próxima a 99,9%. Por conta disso, contribui para que as peças produzidas possam ser utilizadas na substituição de peças metálicas tradicionais. Diferentes materiais estão disponíveis para esta tecnologia, como aço, titânio, alumínio, cromo-cobalto e ligas de níquel.

Outra variação da técnica SLS, é conhecida como Sinterização por Fusão a Laser (*Selective Laser Melting – SLM*). Nesse caso um laser é utilizado para derreter totalmente os grânulos de pó que formam um objeto final, em seguida, aquecendo-os apenas o suficiente para fundi-los em conjunto. Uma variante da técnica SLM, é a técnica chamada de Sinterização Seletiva de Calor (*Selective Sintering of Heat – SHS*), que utiliza uma cabeça de impressão térmica em vez de um laser para aplicar calor às sucessivas camadas de um pó termoplástico.

Os sistemas de impressão baseados em pó são métodos que sugerem processos adequados para aplicações relativamente exigentes. Outras variações desses sistemas são o *Fused Metal Deposition Systems*, *Selective Masking Sintering*, *Multijet Modeling* etc. No quadro 3, alguns exemplos de impressoras 3D com sistemas baseados em pó e os materiais utilizados em seus processos.

Impressora 3D	Método	Material	Área de construção (mm)	Custo aproximado
ProX SLS 500	SLS	Poliamida; compósitos; compósitos revestidos de vidro	381x330x460	xxx
Fuse 1	SLS	Poliamida	165x165x320	R\$45.000,00
ProX DMP 300	DMLS	Metal de alta resistência; aço inoxidável; ligas de cromo cobalto	250x250x330	xxx
EOS M 400	DMLS	Metal	400x400x400	xxx
SLM 500HL	SLM	Metal	500x280x365	xxx

Quadro 3 Relação das impressoras que utilizam os sistemas baseados em pó.
Fonte: desenvolvido pela autora.

Sistemas baseados em sólidos

Com exceção ao pó, os sistemas de MA dessa categoria abrangem todas as formas de materiais no estado sólido, incluindo nesse contexto, filamentos termoplástico e lâminas. Esses sistemas são os mais populares, com equipamentos desktop e materiais com custo acessível.

Os princípios de manufatura nesta classe de sistemas dividem-se em fabricação por corte e colagem de lâminas ou folhas; e fabricação por fusão e solidificação de filamentos.

Na Manufatura de Objetos Laminados (*Lamineted Object Manufacturing – LOM*), os perfis das secções transversais do material são produzidos a partir da deposição de sucessivas camadas de papel – revestido de adesivo, plástico ou laminado de metal – são coladas e cortadas com um laser de CO2 (Figura 34).

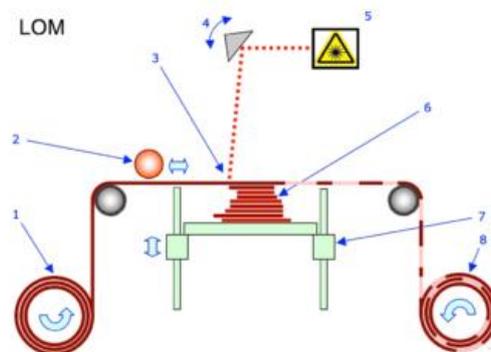


Figura 34 Representação esquemática do sistema de impressão com laminados, onde: (1) rolo de alimentação do papel ou plástico laminado com cola ativada por calor; (2) rolo aquecido; (3) rastreamento do contorno da camada pelo sistema óptico (4) espelho móvel c/ cabeça óptica; (5) laser; (6) objeto em construção; (7) plataforma móvel com as camadas completas do objeto; (8) rolo de papel a ser descartado. Fonte: 3dinsider.com

Os objetos impressos com esta técnica podem ser pós-processados de forma complementar por usinagem ou perfuração. Para alcançar o acabamento final, são também lixadas e recebem um banho de laca. Este sistema é capaz de produzir peças grandes a baixo custo, contudo a precisão do objeto é inferior em relação aos outros processos de MA.

No caso da manufatura de um objeto a partir da Modelagem de Deposição por Fusão (*Fused Deposition Modeling – FDM*), o material polimérico em forma de fio é extrudado através de uma cabeça de impressão que se movimenta nos eixos X e Y para criar cada camada bidimensional do objeto. A fusão do material acontece a uma temperatura específica sobre uma plataforma (que pode ser aquecida ou não) semi-aderente ao material (Figura 35). Os suportes, quando necessários, podem ser removidos manualmente ou, quando se usa suportes solúveis em água, eles podem simplesmente serem dissolvidos.

A precisão deste processo depende da espessura que o fio que é expurgado, e que geralmente, consegue atingir a ordem de 0,1 mm. Takagari (2012) conta que alguns fabricantes experimentaram variações do sistema FDM, substituindo a cabeça de impressão por uma com o bico extrusor adaptado para liberar materiais como chocolate, queijos fundidos e outros insumos com desenhos personalizados.

Os termoplásticos utilizados no processo de manufatura aditiva FDM são plásticos resistentes e estáveis, como os usados nos processos de moldagem por injeção por moldagem⁶⁹, CNC e em outros processos convencionais de manufatura, como resultado têm-se peças duráveis prontas para o uso final.

Há uma grande variedade de materiais utilizados na produção de filamentos, como madeira, policarbonato, fibra de carbono, polipropileno, poliamida, com propriedades de condução, magnéticos, halocrômicos, etc., entretanto, os de uso mais comum são os polímeros ABS (acrilonitrila butadieno estireno), menos viscoso, resistente a impactos e brilhante; e o PLA (ácido polilático), que libera menos gases em sua queima e é biodegradável.

⁶⁹Moldagem por injeção: é uma técnica de moldagem que consiste basicamente em forçar, através de uma rosca simples (monorosca), a entrada de material fundido para o interior da cavidade de um molde. Disponível em: <ferramentalrápido.ufba.br>. Acesso em: 29 jul. 2017.

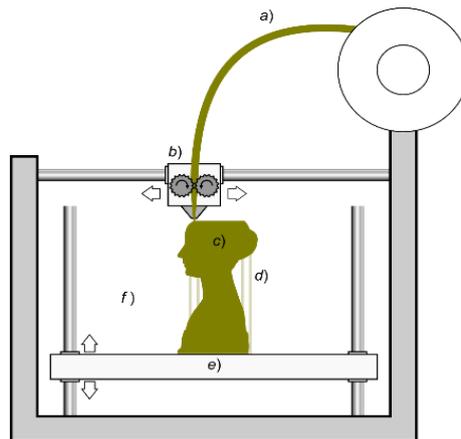


Figura 35 Representação esquemática do sistema de impressão FDM, onde (a) filamento de material polimérico; (b) cabeça de impressão com bico extrusor; (c) objeto em construção; (d) suporte; (e) plataforma móvel; (f) área de construção. Fonte: wikipedia.com.

O ABS é uma resina sintética feita a partir do petróleo. Apesar do nome complicado, o ABS está presente na vida cotidiana bem mais do que se imagina. Trata-se do material que é usado para revestir uma série de aparelhos que se tem em casa, como é o caso dos telefones fixos, televisores, aparelhos de ar condicionado, alguns mouses, calculadoras, ventoinhas de placa mãe (coolers) e os mais diversos materiais para escritório.

O tradicional brinquedo Lego[®] usa o ABS como matéria-prima evidenciando a sua durabilidade. Inclusive, a rigidez e a durabilidade podem ser consideradas as características mais relevantes desse material. O principal problema no seu uso é o fato de não ser biodegradável. Um objeto produzido com ABS permanecerá na natureza, dependendo do ambiente, por centenas e até milhares de anos. Além disso, a queima dos hidrocarbonetos⁷⁰ presentes na sua estrutura molecular, gera entre outros produtos, o dióxido de carbono (CO₂).

Já o PLA é um composto de biopolímeros⁷¹. É um poliéster termoplástico de estrutura molecular semelhante ao ABS, porém sua rigidez, durabilidade e resistência são inferiores.

Além da biodegradabilidade, uma vantagem relevante no uso do PLA é o fato de ser compostável. Proveniente de fonte renovável (milho, mandioca, beterraba etc.), pode ser reciclado (desde que essa reciclagem ocorra com plásticos de PLA puro ou na proporção de até 1% de PLA com 99% de resinas

⁷⁰Hidrocarbonetos: são moléculas que contém apenas os elementos carbono (C) e o hidrogênio (H). Na reação de combustão dos hidrocarbonetos ocorre a formação de gases, que vão depender dos outros componentes presentes na sua estrutura molecular. Fonte: CAREY, Francis A. **Química Orgânica**. 7.ed. São Paulo [s.n.], 2011.

⁷¹Biopolímeros: são polímeros nos quais as unidades nanométricas são açúcares, aminoácidos e peptídeos.

convencionais)⁷². A biodegradabilidade do PLA é comprovada por normas americanas (ASTM D-6400) e europeias (EM-13432), que pressupõe que o material sofra degradação em até 180 dias, em condições de compostagem (umidade de 80% e temperatura constante superior a 60° C) sem produzir resíduos tóxicos. Seu ponto de fusão também é menor que o do ABS.

Apesar da possibilidade de ser feito a partir do amido, o PLA é diferente do plástico de amido, conhecido como amido termoplástico, que perde as qualidades físicas quando entra em contato com a água. O processo de produção do PLA usa o amido simplesmente como uma das possibilidades para se chegar ao ácido láctico, diferentemente do plástico de amido termoplástico, que tem o amido como matéria-prima principal.

No quadro 4, é possível observar a listagem de alguns equipamentos e os seus respectivos materiais utilizados nos sistemas a base de sólidos. Os poucos termoplásticos imprimíveis feitos de material biológico apresentam aplicações limitadas, levando a preocupações com questões ambientais, semelhantes às enfrentadas nos métodos de fabricação convencional. Novos biopolímeros, atualmente em desenvolvimento, podem oferecer oportunidades interessantes para expandir o uso em aplicações de impressão em 3D na área da saúde⁷³.

Ao mesmo tempo que novas impressoras 3D são desenvolvidas, há uma grande quantidade de pesquisa ativa em curso para estender as opções de materiais com os quais os sistemas de MA poderão trabalhar. Com isso as possibilidades de aplicações serão potencializadas. A flexibilidade no uso de materiais, junto com a precisão e o acabamento final da superfície, começam a deixar de ser fatores críticos no uso da tecnologia de manufatura aditiva.

Em 2003, houve um aumento significativo no consumo de impressoras do tipo *Fused Deposition Modeling*. No momento, esta é a tecnologia de MA mais acessível e tem se proliferado no mercado. Estima-se que nos próximos 10 anos, seja tão comum ter uma impressora FDM nas casas, assim como é ter um aparelho de micro-ondas nos dias atuais.

⁷²Jornal da Unicamp – INCT-Institutos Nacionais de ciência e Tecnologia. Disponível em: <biofabris.com.br>. Acesso em: 12 jul. 2015.

⁷³HORVATH, D; HENTZ, O. Publicação eletrônica em 3DPrinting Industry. **Discovering opportunities for biopolymers in 3d printing**. [S.l.], jul. 2017. Disponível em: <[3DPrinting Industry](http://3DPrintingIndustry.com)>. Acesso em: 28 jul. 2017.

Impressora 3D	Método	Material	Área de construção (mm)	Custo aproximado
Matrix 300+	LOM	Papel adesivo à base d'água	256x169x150	xxx
SD 300	LOM	Folha de PVC	170x220x145	R\$67.500,00
Ultimaker 2+	FDM	PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, Nylon, TPU 95 ^a	223x223x205	R\$17.857,00
MakerBot Replicator	FDM	PLA	294x193x165	R\$11.245,00
Felix Pro2	FDM	PLA	237x244x235	R\$10.795,00

Quadro 4 Relação das impressoras que utilizam os sistemas baseados em sólidos.

Fonte: desenvolvido pela autora

4.2.2

A manufatura aditiva está mudando o mundo?

Embora os processos de manufatura aditiva estejam disponíveis no mercado há mais de três décadas, estar-se a ver apenas o prelúdio de soluções projetadas para que o próprio usuário possa desenvolver e produzir seus bens materiais.

Desde os primeiros anos deste século, estudos futurísticos previam mudanças sensíveis nos processos de manufatura para os 20 anos subsequentes. Embora ainda não se tenha uma estimativa comprovada desse prognóstico, a perspectiva de tal revolução na produção de bens de consumo já começa a ser percebida em diversos segmentos.

Por diversos aspectos, vê-se uma orientação comum em direção ao crescimento da produção *on demand* (sob demanda). Os resultados diretos desse modelo é a eliminação da necessidade de estoques e reflexos na queda dos custos de produção de forma significativa. As cadeias produtivas tendem a ser simplificadas, com ciclos de produção mais curtos e processos de manufatura acontecendo mais perto do consumidor em “fábricas inteligentes”. Em entrevista ao *International Top Trends*, um representante do Instituto de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil - Cetiqt-RJ, discorria sobre um futuro em que as “fábricas inteligentes” poderão ser um diferencial para uma economia local, onde o cliente busca a individualização, qualidade e compra imediata. O próximo passo dessa transição seria a produção individual, feita pelo próprio usuário através de ferramentas digitais de produção em versão desktop, mais presumivelmente, a partir de impressoras 3D.

Voltando-se o olhar para a indústria musical, por exemplo, vê-se que desde a virada do século têm acontecido sucessivas transformações, intimamente relacionadas com o desenvolvimento das tecnologias digitais. Os artistas tornaram-se mais autônomos. Seus álbuns passaram a ser produzidos de forma independente e na maioria das vezes, disponibilizados na rede gratuitamente para download. Disco vinil, fitas cassete, CDs, DVDs. Com a evolução tecnológica, as novas plataformas de internet, suas aplicações e inovações, corroboraram para que a mídia física perdesse espaço para os formatos digitais. Hoje temos o *streaming*, uma forma de transmissão de dados multimídia através da internet, sem a necessidade de download do arquivo. Não é mais necessário armazenar conteúdo, agora é possível apenas consumir.

A disseminação da tecnologia de manufatura aditiva pode ter implicações de proporções semelhantes, em relação à forma de criar, produzir e consumir os artefatos. No lugar de adquirir produtos físicos padronizados, o usuário poderá materializar os objetos, a partir de arquivos adquiridos em sites de diversos segmentos, em formato pronto para ser executado em uma impressão 3D.

Entre outras expectativas de expansão do processo de manufatura aditiva, existe a de que um dia, no campo de vestuário, a tecnologia possa permitir que o consumidor entre numa loja, verifique suas medidas por meio de um digitalizador corporal 3D e saia com uma peça de vestuário única feita na hora.

Ainda não se chegou exatamente a este ponto, mas o cenário começa a indicar a possibilidade de implantação de sistemas inteligentes como o que foi citado. Algumas marcas disruptivas, incluindo a Adidas® e a New Balance®, estão experimentando processos de MA na produção de calçados customizados de alta performance.

A marca de calçados americana *Feetz*® já oferece o serviço de customização e fabricação digital por meio de um aplicativo. O usuário fotografa seu pé sobre uma folha de papel branco em três posições pré-estabelecidas e o sistema é capaz de reconstruir a estrutura do pé com precisão. O calçado é produzido a partir do processo de MA e recebe alguns acabamentos manuais. Em duas semanas, o usuário recebe o calçado que foi produzido sob medida em casa.

Danit Peleg, designer israelense, levou seu nome ao mundo quando lançou uma coleção de cinco conjuntos de roupa (conforme discutido no capítulo 3 deste trabalho) produzidos inteiramente a partir de uma impressora 3D FDM pessoal. Sua ideia era justamente demonstrar o quanto a manufatura aditiva de baixo custo, poderia encurtar o caminho entre a criação e a produção e também promover a produção sem intermediários. Hoje, é possível adquirir em seu site, em edição

limitada, uma jaqueta produzida a partir da técnica de impressão 3D FDM, com filamento flexível à base de PLA e possibilidade de personalização do produto.

Estes são alguns passos iniciais de um longo caminho que segue o rumo da produção sustentável, que parece ter grandes chance de substituir modelos pré-existentes. Pelo menos em teoria, os benefícios do uso da manufatura aditiva são evidentes: a impressão 3D permite que os consumidores alterem os itens de acordo com as suas preferências, atendendo à crescente demanda por produtos customizados; admite que as lojas tenham menos estoques, uma vez que a peça só é criada quando há um cliente pronto para adquiri-la evitando estoque parado; transforma o varejo numa experiência, fazendo com que alguns usuários queiram visitar as lojas físicas e construir uma conexão pessoal com estes espaços; atende com eficiência àqueles que preferem a comodidade das compras online.

Uma economia industrial, que passa a ser individual. Fato que sinaliza um momento de passagem para outro nível de valor econômico. Toma-se o rumo da economia baseada na experiência que, segundo Pine (2004), a tornar-se a oferta econômica predominante. Agora, frente a tantas mudanças, a questão é sobre como criar autenticidade.

Para isso, o que pode ser mais essencial do que não ter limites? Os processos de manufatura aditiva oferecem perspectivas de criação que vão além das expectativas do projetista, com possibilidades praticamente ilimitadas de criar formas geométricas. Designa novas oportunidades, trabalha com novos materiais e novos métodos de produção. A tecnologia de manufatura aditiva tende a estimular novas áreas de pesquisa e formatos de negócio inovadores.

A tecnologia é o meio, e não o destino. O destino é a maximização da experiência do usuário, que pode ter, ao alcance das mãos, a possibilidade de materializar seus bens de consumo.

4.2.3

Manufatura aditiva em casa

Com a expiração das patentes criadas para as formas de produção de objetos através da adição de camadas sob controle automático do computador, novas técnicas de manufatura aditiva continuam a ser emitidas.

Os processos de fabricação com base em filamentos fundidos (FDM), sistema comparativamente simples, têm-se tornado cada vez mais inteligíveis. O custo de todos os materiais necessários para desenvolver uma impressora

RepRap⁷⁴ é de cerca de €400. Um custo relativamente acessível para pessoa física, bem como para pequenas comunidades no mundo em desenvolvimento. A RepRap produz objetos com a qualidade ligeiramente inferior em relação as máquinas comerciais, entretanto seu custo é equivalente a 1% do preço de um equipamento industrial que utiliza o mesmo sistema de impressão.

À medida que a tecnologia de manufatura aditiva se tornou mais miniaturizada, sua funcionalidade e a possibilidade de versões desktop desse produto aumentou consideravelmente. A MA chegou a uma fase de uso sensível e especializado. O número de pesquisas que relacionam esta ferramenta com diversos campos de conhecimento, tem demonstrado seu caráter flexível e de grande poder de resolução. Na medicina, na aviação e em experimentos aeroespaciais, na indústria automotiva, na arquitetura, no design de vestuário, na educação e em tantos outros segmentos, a tecnologia de manufatura aditiva tem feito parte do processo de fabricação e contribuído em algum aspecto para a tomada de decisões.

Analistas que estudam as expectativas do mercado de MA para os próximos anos acreditam que haverá um aumento significativo na velocidade do processo, no desenvolvimento de insumos e na interação da tecnologia com métodos tradicionais de produção. Espera-se também o aumento de centros especializados para execução de serviços ou unidades de produção conectadas, proporcionando ao usuário acesso rápido a uma produção em pequena escala, com baixo custo.

Todos esses avanços convergem para a redução do investimento necessário para adquirir uma impressora 3D pessoal. Além da liberdade de criação, a possibilidade de produzir réplicas de peças danificadas ou perdidas, de um produto que muitas vezes ainda está em bom estado, mas que o fabricante não possui um sistema de peças sobressalentes para poder fazer a substituição.

Como a variedade de materiais disponíveis para imprimir em 3D tornar-se mais extensa e menos dispendiosa, tanto as roupas *open-source*, quanto as de propriedade das marcas, estarão amplamente disponíveis em arquivos online em apenas 10 anos (RAY KURZWEIL in JACKSON (2017)

⁷⁴RepRap: é abreviação de *Replicating Rapid-prototyper*. uma impressora 3D desktop de código aberto, que tem a capacidade de imprimir objetos, a partir de sistemas com base em sólidos (FDM).

Em 2016, Kurzweil profetizava que até 2020 haveria toda uma série de produtos disponíveis para compra, por um custo inferior a um dólar, para que o usuário pudesse imprimir imediatamente. Isto seria segundo ele, o preceito para que as pessoas tivessem impressoras em casa. A simplicidade do processo torna essas previsões mais factíveis. Qualquer pessoa, mesmo sem experiência, é capaz de materializar objetos a partir de uma impressora 3D.