

Citar como:

Kunkel M.E, Cano APD, Ganga TAF, Artioli BO, Juvenal EAO. Manufatura Aditiva do Tipo FDM na Engenharia Biomédica. In: Maria Elizete Kunkel. (Org.). Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica: v.1, 1ed. Seattle, United States: Kindle Direct Publishing, 2020, p. 50-69.

Capítulo

4

Manufatura Aditiva do Tipo FDM na Engenharia Biomédica

Maria Elizete Kunkel, Ana Paula D Cano e Thabata Alcantara F Ganga
Instituto de Ciência e Tecnologia
Universidade Federal de São Paulo – Unifesp

Bárbara Olivetti Artioli e Eliane Alves de Oliveira Juvenal
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Universidade Federal do ABC – Ufabc

Abstract

Additive manufacturing technology or 3D printing is a manufacturing principle used in many biomedical engineering applications for product and prototype customization. The additive manufacturing allows the production of parts with complex geometries, in a shorter production time and costs. The Fused Deposition Modeling (FDM) process is the most common and affordable technology that uses thermomoldable polymers heated and deposited in layers to form a real object. This chapter will discuss some of these applications in biomedical engineering as well as their limitations and future perspectives.

Resumo

A tecnologia de manufatura aditiva ou impressão 3D é um princípio de fabricação utilizado em várias aplicações de engenharia biomédica para customização de produtos e protótipos. A manufatura aditiva permite a produção de peças com geometria complexas com menor tempo de produção e custo. O processo de modelagem por fusão e deposição (FDM) é o mais comum e acessível que utiliza polímeros termomoldáveis aquecidos e depositados em camadas para formar um objeto real. Neste capítulo serão discutidas algumas destas aplicações na engenharia biomédica bem como suas limitações e perspectivas futuras.

4.1. INTRODUÇÃO

A primeira revolução industrial teve início no final do século XVIII, no Reino Unido. Ela foi caracterizada pelo uso da máquina a vapor para substituir parcialmente o trabalho humano na indústria têxtil. A segunda revolução industrial ocorreu entre o final do século XIX e início do século XX, com o uso de energia elétrica e a criação do conceito de linhas de produção. A partir de 1970, com a evolução dos sistemas computacionais, teve início a fase de automação na indústria. Em 2000 se estabeleceu a terceira revolução industrial, a revolução da informática, com a incorporação de tecnologias digitais na produção de novos produtos. Hoje se faz necessária uma integração completa e inteligente da produção em todos os níveis, com o uso de técnicas de inteligência artificial, sensores e equipamentos em rede. A convergência desses fatores gerou a quarta revolução industrial, a indústria 4.0, que inclui tecnologias digitais como integração por meio de internet das coisas, computação em nuvem, análise de grandes massas de dados (big data), robótica autônoma, realidade virtual e aumentada, simulações computacionais, e manufatura aditiva [1].

A manufatura aditiva, conhecida por impressão 3D, é uma tecnologia totalmente digital e fundamental da indústria 4.0. A tecnologia permite que um modelo virtual de um objeto previamente criado em um software de desenho assistido por computador (computer-aided design - CAD), possa ser enviado para uma impressora 3D que o reproduz na forma de um objeto físico utilizando diversos tipos de materiais. A manufatura aditiva tem evoluído rapidamente e mudado o foco dos métodos tradicionais de produção, oferecendo a possibilidade de criação de peças com geometria complexas em menor tempo e com custo reduzidos. Essa tecnologia permite a criação de ambientes propícios à inovação e tem grande potencial de crescimento em áreas específicas do mercado com tendências de customização de produtos. Nos últimos anos, a manufatura aditiva tem sido utilizada em aplicações de engenharia para criação de protótipos. Hoje, ela é utilizada em vários setores de fabricação, como aeroespacial, automóvel, marinha, construção, elétrica, sanitária, equipamentos de esporte e saúde [2].

A manufatura aditiva é uma tecnologia de fabricação pela adição sucessiva de material em camadas por meio de diferentes processos. A tecnologia pode ser classificada pela forma da matéria prima utilizada (líquido, sólido e pó) ou pelo princípio de energia utilizado no processamento das camadas [2]. A aplicação da manufatura aditiva na área da saúde proporciona muitos benefícios como: customização e personalização de produtos médicos, medicamentos e equipamentos, além de melhor custo-efetividade, aumento de produtividade, e

democratização do design e da fabricação [1]. As principais áreas de aplicação são: Criação de órteses, próteses e implantes; modelos anatômicos personalizados; produção de tecidos e órgãos; e pesquisas na área farmacêutica. Neste Capítulo serão apresentadas vantagens, limitações e perspectivas futuras do uso do processo de modelagem por fusão e deposição (*Fused Deposition Modeling*, FDM) na engenharia biomédica. Atualmente, este é o processo de manufatura aditiva mais comum e acessível devido ao custo do material e equipamento necessário.

4.2. FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)

Três processos de manufatura aditiva se destacam, no desenvolvimento de novos produtos, tanto na indústria quanto na pesquisa. O processo FDM utiliza um polímero termomoldável como matéria prima que ao ser aquecido, é derretido e depositado em camadas sucessivas para formar o objeto. A estereolitografia, (*stereolithography*, SLA) é um processo no qual um fotopolímero (resina líquida) é solidificado a partir de um feixe de laser UV formando o objeto. Esse processo permite alta acurácia, mas tem um elevado custo do material e equipamento [3]. O terceiro processo é a sinterização seletiva a laser (*selective laser sintering*, SLS) que é similar ao processo SLA, mas tem custo um pouco menor, que utiliza como matéria prima um pó que pode ser composto por materiais termoplásticos, metal, cerâmica e outros [4].

O processo FDM, criado na década de 1980, foi comercializado pela empresa americana Stratasys no início dos anos 90. Hoje existem vários tipos de impressoras 3D do tipo desktop, inclusive de produção nacional, com custo variando entre R\$ 2.000,00 e 45.000,00, que utilizam o processo FDM. Para a manufatura de um objeto que foi previamente modelado em um software CAD, um filamento termoplástico é aquecido e derretido ao passar por uma cabeça de extrusão. Esse material é depositado ordenadamente em sucessivas camadas em uma plataforma através do bico de extrusão (Fig. 4.2). Na maioria das impressoras 3D, o bico de extrusão se movimenta ao longo dos eixos X e Y, enquanto a plataforma de impressão se movimenta ao longo do eixo Z. Devido às características típicas do processo FDM, as peças produzidas em material termoplástico apresentam uma grande variação de suas propriedades materiais. A resistência mecânica entre as camadas (eixo Z) é significativamente menor do que nas regiões em direção ao eixo X e Y, assim qualquer tentativa de melhorar a resistência mecânica de peças feitas pelo processo FDM deve ser feita considerando este fato [5].

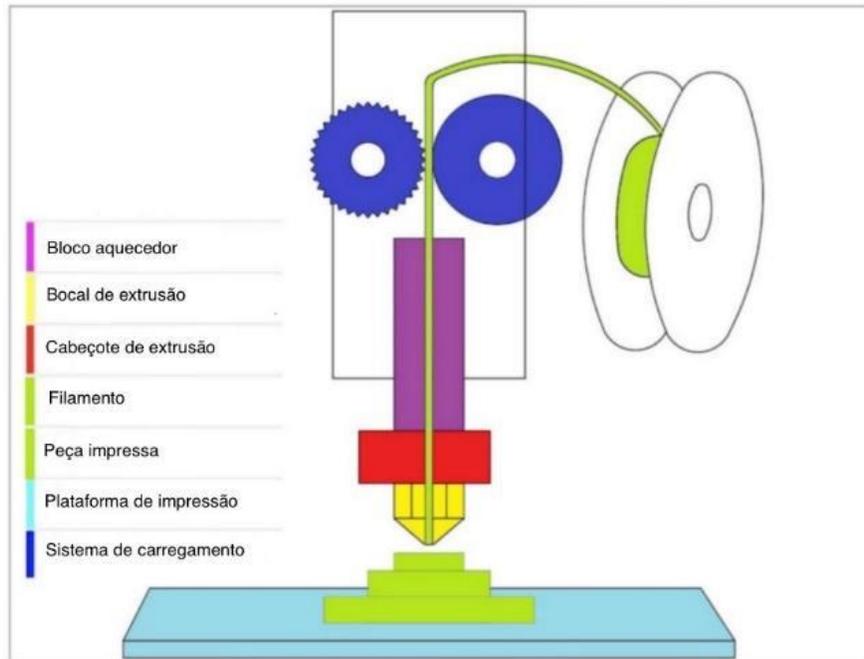


Figura 4.2 – Representação esquemática do processo FDM. Figura adaptada de [5] por Thiago Leme.

A resistência mecânica do filamento utilizado no processo FDM não é o parâmetro mais importante para a determinação da resistência mecânica da peça impressa. A resistência e estabilidade obtida entre as camadas da peça são fatores determinados por parâmetros de impressão como orientação, velocidade, preenchimento e outros. Apesar de oferecer essas limitações, o processo FDM tem sido utilizado para a produção de peças em vários setores da indústria devido à confiabilidade, custo acessível, efetividade de produção com boa resolução e estabilidade dimensional, possibilidade de customização, e por permitir a fabricação de geometrias complexas [6-8].

4.3. MATERIAIS UTILIZADOS NO PROCESSO FDM

A cabeça de extrusão dos equipamentos de impressão 3D que utilizam o processo FDM opera com uma temperatura máxima de cerca de 300°C. Por isso, os únicos materiais que podem ser utilizados nesse processo são aqueles com baixa temperatura de fusão, como polímeros termoplásticos e outros [9]. Além disso, somente alguns tipos de materiais poliméricos, que são controlados termicamente,

possuem parâmetros adequados para serem aproveitados no processo FDM. Características da peça impressa tais como resistência, acabamento da superfície e porosidade são extremamente dependentes dos parâmetros do material utilizado e apresentam várias limitações relacionadas com velocidade de produção e o tipo de materiais [10]. No caso de uso industrial, uma das principais limitações é o número limitado de materiais disponíveis, apesar da indústria estar desenvolvendo cada vez mais novos materiais para atender essa demanda. Em muitos casos, peças fabricadas pelo processo FDM ainda não são funcionais, de modo que elas são utilizadas como componentes de engenharia, demonstração, modelo conceitual ou protótipo. Além disso, o processo FDM é relativamente lento pois depende de um sistema mecânico de movimentação cartesiana para preencher a área de cada camada que vai formar um objeto [2].

Algumas impressoras 3D de processo FDM utilizam dois tipos de filamento com materiais diferentes, com o objetivo de construir a peça e fazer um suporte para regiões necessárias durante a manufatura com inclinações e curvas. No entanto, em impressoras mais simples, o mesmo material polimérico extrudado com quantidade diferente de preenchimento pode ser utilizado para fazer a peça principal e o suporte de impressão [6]. Os materiais poliméricos mais utilizados no processo FDM são o acrilonitrila butadieno estireno (*acrylonitrile-butadiene styrene*, ABS), ácido polilático (*polylactic acid*, PLA) e uma variação do polietileno tereftalato (*polyethylene terephthalate*, PET) chamado de PETG [11].

O ABS é um material termoplástico, derivado do petróleo, com temperatura de transição vítrea aproximada de 105 °C, com boa resistência ao impacto e ao calor, de fácil processamento, leve e que apresenta um pouco de flexibilidade. Algumas desvantagens do ABS são a variação dimensional de peças impressas e o efeito *warp* de deformação da peça ao resfriar, por isso, esse material não é indicado para produção de peças muito pequenas. No mercado existem filamentos ABS de vários tipos e cores, por exemplo, reforçado com fibras de carbono, com diferentes propriedades mecânicas, biocompatibilidade e alguns suportam processos de esterilização simples para uso na área médica. O polímero PLA é biodegradável, derivado de fontes renováveis como amido de milho, mandioca e cana de açúcar, tem temperatura de transição vítrea próxima de 60° C e pode ser utilizado em várias aplicações na saúde. Para uso na área médica, o PLA oferece a vantagem de ser resistente à limpeza com desinfetantes comuns, mas não pode ser esterilizado em uma autoclave pois não resiste às temperaturas acima de 60° C. Se o objeto impresso em PLA for mantido em ambiente seco, com temperatura ambiente e sem receber luz solar direta, ele pode manter as propriedades

mecânicas por anos [12]. O PETG apresenta boa resistência e durabilidade alta com flexibilidade média.

Outros materiais utilizados no processo FDM são a poliamida, (*polyamide* ou *nylon*, PA), policarbonato (*polycarbonato*, PC), polimetilmetacrilato (*polymethyl methacrylate*, PMMA), polietileno (*polyethylene*, PE) e polipropileno (*polypropylene*, PP). Os materiais compósitos são os mais populares para uso em aplicações industriais que requerem peças com estrutura mais resistente. Materiais com combinação de polímeros como ABS e PC, PLA e PC, ou PE e PP podem ser utilizados para que a resistência mecânica da peça produzida seja elevada. Os elastômeros termoplásticos (*thermoplastic elastomers*, TPE) são plásticos com qualidades similares à borracha, extremamente flexíveis e duráveis.

O desenvolvimento de novos materiais compatíveis com o processo FDM tem aumentado a faixa de opção de produtos a serem manufaturados e tem estimulado a competição industrial. [10] apresentam novos materiais compósitos para uso no processo FDM como os cerâmicos que são reforçados por fibra e matriz polimérica. Nos últimos anos, os parâmetros de impressão destes materiais têm sido otimizados para melhorar suas propriedades mecânicas favorecendo a sua introdução na indústria e aplicação em diversos setores. O desenvolvimento de biocompósitos têm trazido muitos avanços tecnológicos na área médica, melhorando os métodos de diagnóstico, tratamento e reabilitação; produção de implantes e suportes para engenharia de tecidos. Vários parâmetros críticos dos polímeros influenciam a qualidade de uma peça produzida pelo processo FDM [13]. As pesquisas que exploram o uso de novos materiais a serem utilizados como filamento no processo FDM têm se concentrado na otimização desses parâmetros, nas interrelações entre diferentes processos e no efeito destas no produto final. Os principais parâmetros a serem considerados no processo FDM são a espessura da camada impressa, diâmetro do bico de extrusão, temperatura e velocidade de extrusão, velocidade de preenchimento e orientação com base no ângulo de impressão. Para a otimização do processo FDM, todos parâmetros precisam ser controlados em busca de qualidade, precisão dimensional, menor porosidade, melhores propriedades mecânicas e menor deformação da peça [10].

4.4. APLICAÇÃO DO PROCESSO FDM NA ENG BIOMÉDICA

A Engenharia Biomédica é um ramo da engenharia que integra as ciências exatas e ciências da saúde com uma nova abordagem. A manufatura aditiva tem

sido utilizada em diversas aplicações na engenharia biomédica. O processo FDM permite que inovações sejam criadas, prototipadas e validadas na área médica expandindo o potencial de uso desta tecnologia. Por exemplo, a criação de acessórios em PLA para equipamentos de imagem médica e dispositivos ópticos [12, 14]. No entanto, apesar de recentes avanços médicos significativos com uso de manufatura aditiva e o processo FDM, ainda existem muitos desafios científicos e regulatórios a serem superados [15-16]. Várias empresas de dispositivos médicos têm surgido para atender um mercado customizado e de alto valor agregado com o uso da manufatura aditiva. As inovações desenvolvidas se beneficiam da possibilidade de integrar a manufatura aditiva às técnicas de processamento de imagens médicas 2D no formato *digital imaging and communication in medicine* (DICOM), como tomografia computadorizada (TC) e ressonância magnética (RM).

4.4.1. Engenharia de reabilitação: Próteses e Órteses

Uma das primeiras aplicações de manufatura aditiva na engenharia biomédica tem sido a criação de dispositivos personalizados para reabilitação como próteses e órteses. Próteses são dispositivos que substituem parcialmente ou totalmente a função um membro perdido e as órteses têm a função de retificar ou imobilizar uma estrutura do corpo. A manufatura aditiva desses dispositivos pelo processo FDM pode substituir o modo convencional de confecção, que requer o uso de moldes de gesso, além de possibilitar a produção de dispositivos mais leves, vazados, ergonômicos e oferecer mais opções de modelos e cores.

A primeira prótese de mão produzida pelo processo FDM de manufatura aditiva e foi criada em 2013, pela Organização Não Governamental (ONG) Robohand, na África do Sul. Esse projeto foi iniciado a partir da colaboração entre um carpinteiro, que perdeu parte da mão em um acidente de trabalho, e um designer americano que já fazia uso de impressão 3D. O funcionamento desta prótese mecânica é simples, todas as peças são de plástico e o acionamento dos dedos é feito por fios e elásticos a partir do movimento da articulação do punho. O modelo de prótese foi disponibilizado livremente na internet no modo *open design* para ser produzido por manufatura aditiva.

A ONG Robohand recebeu o prêmio Rockefeller Innovators Award como destaque de inovação do século por criar uma nova forma de produção de prótese de membro superior de modo mais rápido e com menor custo. A Robohand deu origem à Fundação americana e-Nable que usa mapas online com ferramentas do *Google* para conectar pessoas que precisa de uma prótese; pessoas que possuem uma impressora 3D e querem imprimir próteses; e pessoas que têm conhecimento

de modelagem 3D e podem melhorar os modelos de prótese existentes [17]. A partir deste modo colaborativo foram criados novos modelos de próteses de mão mais bonitos, leves e funcionais, sem registro de patente e de domínio público [18]. Essas próteses podem ser produzidas em várias cores a partir de modelos 3D que podem ser escalados para acompanhar o crescimento infantil, além disso as próteses podem ser personalizadas com desenhos e cores de super-heróis. Esses fatores podem melhorar a estética da prótese e a autoestima de crianças com deficiência física [19]. No entanto faltam ainda evidências e pesquisas com respeito à aceitação, funcionalidade e durabilidade destes dispositivos [20].

O Programa de Pesquisa e Extensão Mao3D do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) foi criado com o objetivo de prototipar e reabilitar crianças e adultos com malformação ou amputação de membro superior a partir dos modelos de próteses disponibilizados pela e-Nable (Fig. 4.4.1a) [21]. Para mais informações ver o site no link www.mao3d.com.br.



Figura. 4.4.1a Prótese de membro superior baseada criada com base em um modelo *open design* e produzida pelo processo FDM em material polimérico (Arquivo Mao3D).

Na área de prótese auricular ou de orelha, algumas metodologias têm sido desenvolvidas para produção de prótese de silicone de grau médico, a partir do molde da orelha remanescente produzido por manufatura aditiva. Esse processo permite a automação da manufatura, diminui o custo e melhora a qualidade da prótese. Em 2014 foi realizado o primeiro estudo no Brasil explorando o processo FDM para a produção de prótese auricular. A geometria da orelha de uma voluntária foi reconstruída em 3D a partir de imagens de TC [22]. Três moldes da orelha foram

criados em um software CAD baseado na reconstrução do pavilhão auricular normal de uma voluntária. Assim, três tipos de moldes auriculares foram produzidos pelo processo FDM e SLS, em materiais PLA, ABS e resina fotopolimérica. A partir dos moldes, as próteses auriculares foram produzidas em silicone de grau médico. O estudo indicou a qualidade do molde produzido pelo processo SLS como superior à qualidade do molde produzido pelo processo FDM.

Com o objetivo de diminuir o custo de produção, [23] aprimoraram o processo FDM para a produção de próteses auriculares [22]. Quatro métodos de aquisição da estrutura externa do pavilhão auricular de uma voluntária foram investigados para a produção dos moldes: fotogrametria, escaneamento 3D, reconstrução 3D de imagens de TC e modelagem 3D parametrizada. As próteses auriculares produzidas a partir de imagens de TC e pigmentadas apresentaram ótimo resultado estético com apenas 3% de erro dimensional (Fig. 4.4.1b). Análises mecânicas por ensaios de resistência à tração e dureza do silicone revelaram que a resistência mecânica das próteses produzidas não foram alteração pelo processo de pigmentação. Os resultados desse estudo demonstram a viabilidade de uma metodologia acessível para a produção de próteses de orelhas utilizando softwares livres, impressoras 3D e materiais disponíveis no mercado nacional. A pesquisa confirmou a viabilidade da produção de uma prótese auricular e gerou a criação da startup FigmentFace que fornece próteses de orelha para o mercado nacional.

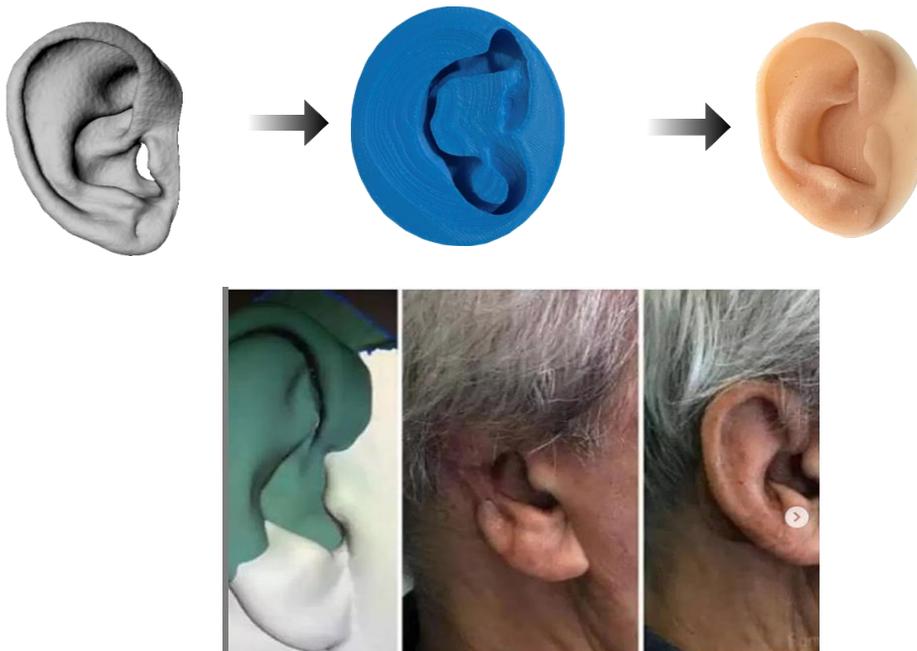


Figura 4.4.1b Prótese estética de orelha de silicone produzida com o processo FDM [23]

As órteses podem ser classificadas como estáticas, dinâmicas ou híbridas. A órtese estática é utilizada para a estabilização do membro em uma posição específica para melhorar a função ou prevenir contraturas musculares [24]; a órtese dinâmica permite mobilidade controlada das articulações, restaurando os movimentos; e a órtese híbrida, combina as características da órtese dinâmica com sistema de eletroestimulação neuromuscular [25]. As órteses são utilizadas na reabilitação de sequelas de diversas patologias. A maioria dos casos de paralisia cerebral infantil (85%) requerem o uso de órtese tornozelo-pé de forma provisória ou contínua para alinhar, prevenir e corrigir a deformidade melhorando a realização da marcha [26]. Desde 2013, algumas pesquisas têm explorado a produção de órtese do tipo tornozelo-pé pelo processo FDM [27]. A geometria externa da região do pé e perna pode ser reconstruída por meio de medidas antropométricas ou escaneamento 3D, a seguir é feita a modelagem 3D da órtese. A partir da digitalização é possível simplificar a produção de uma órtese personalizada com uso da manufatura aditiva. Essa metodologia tem vantagem em relação ao método convencional de confecção de órtese por não requerer contato com o paciente para aquisição do molde de gesso.

[28] investigaram a utilização do processo FDM com o filamento PLA comum e PLA com reforço de fibra de carbono para criar órteses tornozelo-pé. O custo estimado da órtese de PLA com reforço de fibra de carbono foi cerca de € 200,00 e o tempo de impressão de 16 horas. O estudo mostrou que a adesão de PLA para compósitos de fibra de carbono é suficiente para fins de prototipagem. Outras pesquisas têm explorado o uso de materiais como ABS, nylon, PETg e poliuretano, mas poucas pesquisas realizaram ensaios mecânicos ou clínicos com voluntários. [27] demonstrou a viabilidade de desenvolvimento de uma órtese personalizada para uma criança com paralisia cerebral utilizando o processo FDM com os materiais ABS e PLA em impressoras 3D de baixo custo (Fig. 4.4.1c).

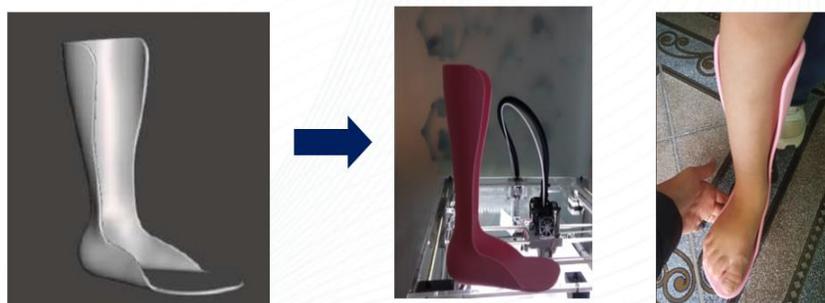


Figura 4.4.1c Processo de produção de uma órtese tornozelo-pé personalizada para uma criança com paralisia cerebral [27]

Outro exemplo de inovação com o uso da tecnologia de manufatura aditiva e o processo FDM é a produção de dispositivos de tecnologia assistiva na medicina veterinária (Fig. 4.4.1d-f) [29-30]. Diversos tipos de animais silvestres precisam de dispositivos personalizados para substituição de uma estrutura perdida por doença adquirida ou traumas. O processo FDM permite a produção de estruturas rígidas que podem ser inclusive pintadas para manter a cor original e aumentar a aceitação por parte do animal. A Pineal5D é uma startup de Curitiba que desenvolve próteses e cadeiras de rodas por impressão 3D para cães e gatos (Fig. 4.4.1f).

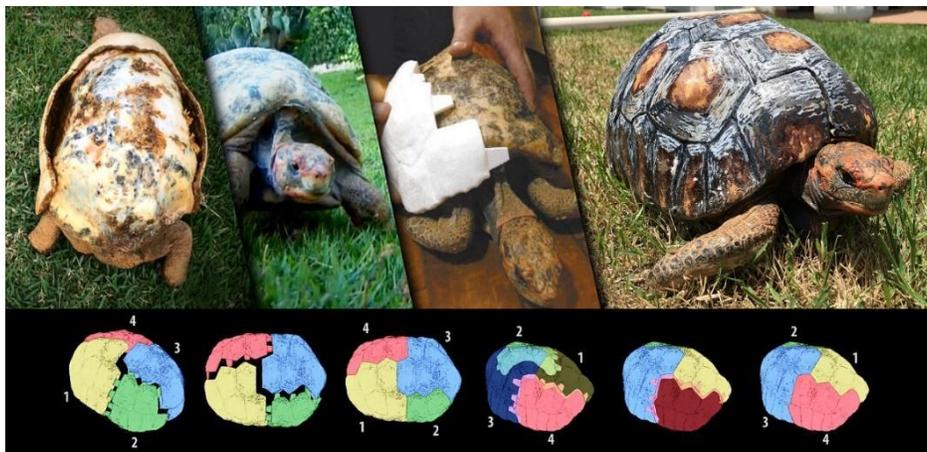


Figura 4.4.1d Prótese de casco de jabuti produzida em PLA pelo processo FDM [29]



Figura 4.4.1e Prótese de bico de papagaio produzida em PLA pelo processo FDM [30]



Figura 4.4.1f Prótese de membro dianteiro de um cão de grande porte produzida em ABS e material flexível pelo processo FDM [cedida pela empresa Pineal5D]

4.4.2. Biomodelos para diagnóstico, planejamento cirúrgico e ensino

A criação de modelos anatômicos para diagnóstico, planejamento cirúrgico e ensino foi uma das primeiras aplicações de manufatura aditiva na área médica [31-33]. Biomodelo é um modelo anatômico físico de uma estrutura do corpo humano que pode ser criado a partir de um modelo digital gerado pelo processamento de imagens médicas e uma impressora 3D. A manufatura aditiva permite a criação de biomodelos de partes anatômicas extremamente complexas. A seleção do material utilizado para a criação de biomodelos depende da aplicação e o procedimento pode ser dividido em duas fases: 1. Modelagem virtual: A reconstrução 3D de uma estrutura do corpo pode ser feita com uso de softwares específicos para processamento de imagens médicas, como TC ou RM, para a criação de um modelo digital 3D da estrutura; e 2. Prototipagem do modelo físico: o modelo digital 3D é reproduzido fisicamente em uma impressora 3D utilizando uma grande variedade de material e processos.

Nos últimos anos, muitas técnicas cirúrgicas minimamente invasivas, assistidas por robô e com uso de realidade virtual, têm sido desenvolvidas para melhorar a qualidade das operações, redução de riscos e melhor reabilitação do paciente. A manufatura aditiva tem sido utilizada para fabricar biomodelos físicos para auxiliar no planejamento em cirurgias mais complexas [34]. Biomodelos personalizados reproduzem informações da estrutura física de estruturas internas do corpo humano que podem ajudar no diagnóstico e na decisão médica em relação a realização de um determinado procedimento cirúrgico ou tratamento. Os modelos 3D de estruturas do corpo humano são mais fáceis de serem interpretados do que

as imagens médicas que geralmente são em formato 2D. Além disso, em diversos procedimentos cirúrgicos são requeridos o uso de implantes personalizados para substituir estruturas danificadas. Neste caso, um planejamento cirúrgico inicial com um biomodelo pode definir previamente a forma do material a ser implantado. Desse modo, diversos tipos de cirurgia já têm se beneficiado do uso de biomodelos, por exemplo, em tratamento de deformidades [34], na cardiologia, e cirurgias de coluna [35], craniofacial maxilofacial [36-38] e de quadril [39].

Na área de ensino médico, os biomodelos oferecem uma melhor visualização da estrutura externa e interna da anatomia humana normal ou patológica. Eles podem ser feitos em cores diferentes ilustrando melhor os tipos de tecidos e patologias [40]. Biomodelos produzidos por manufatura aditiva podem ser ainda combinados com treinamento virtual e teleoperadores hápticos em treinamentos multidisciplinares, desenvolvimento de novas metodologias cirúrgicas e no planejamento cirúrgico. Apesar do processo FDM não ser o mais adequado para a criação de biomodelos em relação a acurácia da peça produzida, biomodelos mais simples têm sido criados tanto para planejamento cirúrgico, reduzindo o tempo de operação (Fig. 4.4.2a), quanto para o ensino na área de ortopedia, substituindo em alguns casos o uso de peças cadavéricas (Fig. 4.4.2b). De modo geral, a manufatura aditiva e o processo FDM oferecem muitas oportunidades para a pesquisa médica, visto que um biomodelo pode esclarecer processos fisiológicos complexos associados aos diversos tipos de patologias [41-42]



Figura 4.4.2a Biomodelo para planejamento cirúrgico e desenvolvimento de prótese personalizada utilizando a tecnologia FDM (imagens cedidas pelo CTI Renato Archer de Campinas)



Figura 4.4.2b Biomodelos para ensino substituindo peças cadavéricas

4.4.3 Engenharia de tecidos e medicina regenerativa

A área de engenharia de tecidos e medicina regenerativa explora conhecimentos de biologia, ciência dos materiais, engenharia e medicina para desenvolver processos que possam substituir ou regenerar células, tecidos ou órgãos humanos, restaurando suas funções normais. *Scaffolds* são estruturas 3D porosas utilizadas para estimular o desenvolvimento celular e a regeneração de tecidos do corpo como suporte para promoção da proliferação celular. Idealmente, o *scaffold* deve ser uma estrutura altamente porosa, com uma rede de poros interconectada com tamanho bem definidos que permita a migração e infiltração de células [43].

Diversos processos de manufatura aditiva têm sido empregados nesta área. O processo SLS permite a produção de estruturas bem definidas que podem ser utilizadas como *scaffolds*. Mas, devido ao custo elevado do processo SLS, o processo FDM tem sido utilizado também apresentando bons resultados [44-45]. Algumas pesquisas têm investigado o uso do processo FDM para a fabricação de *scaffolds* com materiais poliméricos bioabsorvíveis, ou seja, material que é absorvível pelo corpo sem causar danos à saúde. No entanto, até o momento, as vias regulatórias e custos associados com a introdução de novos materiais bioabsorvíveis produzidos pelo processo FDM nesta área tem sido difícil de serem superados. Por exemplo, o uso de materiais baseado em polímeros já aprovados pela *Federal Drug Administration* (FDA) para a produção de filamentos de grau médico a ser utilizado em dispositivos implantáveis [46].

Materiais para uso em engenharia de tecido devem exibir propriedade físico-químicas e mecânicas que permitam modular o comportamento celular, incluindo a mecanotransdução, a transformação de sinal mecânico em biológico que controla a degradação dos tecidos. As interações entre células e tecidos são de natureza complexa pois influenciam os processos intracelulares levando à promoção ou inibição do crescimento do tecido. Durante o remodelamento do tecido de uma dada parte do corpo, especialmente em um volume maior de aplicação, a integridade estrutural e mecânica do material deve ser mantida.

[46] avaliaram as características de manufacturabilidade por impressão 3D, efeitos da degradação e propriedades físico-químicas e mecânicas de quatro tipo de filamentos de grau médico (Dioxaprene® 100 M, Max-Prene® 955, Lactoprene® 100 M, Caproprene® TM 100 M (Poly-Med, Inc., Anderson, SC, USA). O objetivo do estudo foi avaliar a possibilidade de uso destes materiais no processo FDM para produção de *scaffolds* a serem utilizados em tecidos moles e rígidos do corpo humano. Os resultados da pesquisa indicaram que os filamentos Max-Prene® 955 e Lactoprene® 100 M são indicados para aplicações de engenharia em tecido rígido com o tecido músculo esquelético.

A manufatura aditiva já é considerada uma tecnologia indispensável para a realização de pesquisas em engenharia de tecidos, devido a sua capacidade de manufatura e controle de parâmetros. O processo FDM está sendo utilizado como uma opção de custo mais acessível em impressoras do tipo desktop permitindo que as pesquisas possam ser realizadas sem um custo inicial muito elevado.

4.4.4 Drug delivery systems

Drug delivery é um sistema de administração farmacêutica controlado de medicamentos no corpo humano ou animal para obtenção de uma melhor distribuição e absorção no tecido alvo para fins terapêuticos [47]. O processo FDM pode ser utilizado para a criação de dispositivos customizados para *drug delivery* com doses mais precisas de medicamentos [48].

[49] publicaram uma revisão sobre a aplicação do processo FDM em *drug delivery* destacando os avanços, vantagens, limitações e possíveis aplicações futuras nesta área. O processo FDM permite o desenvolvimento de ideias inovadoras na área de *drug delivery* superando as limitações e desvantagens dos sistemas tradicionais. *Drug delivery* pode ser realizada a partir de vários processos

de manufatura aditiva: 3D Printing Inkjet-Based, 3D Printing Extrusion-Based Deposition, 3D Laser-Based Printing, 3D Printing Powder-Based Distribution e FDM [50]. O aumento do uso do processo de FDM na área é atribuído às suas numerosas vantagens como a possibilidade de manufaturar comprimidos personalizados para um paciente ou cápsulas com alta precisão e fabricação de geometrias variadas e propriedades controladas [50- 52]. Somente alguns tipos de polímeros têm sido investigados para sistemas de *drug delivery*. Os mais comuns são *poly vinyl alcohol* (PVA) e *ethylene vinyl acetate* (EVA) [50]. O processo de FDM permite o uso de mais de uma extrusora na impressora 3D imprimindo ao mesmo tempo, assim, dois ou mais polímeros com diferentes propriedades medicinais podem ser impressos ao mesmo tempo para a fabricação de um sistema de *drug delivery* com mais de um medicamento [49].

4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A expansão da tecnologia de manufatura aditiva tem produzido muitos dispositivos inovadores na área de engenharia biomédica. A inovação fica por conta de diferentes processos e materiais que podem ser utilizados na produção de dispositivos personalizados gerando uma infinidade de soluções. O processo FDM, apesar de apresentar uma série de limitações relacionadas à resistência mecânica, precisão dimensional e acabamento da peça, permite a criação de diversos dispositivos inovadores com bons resultados. A possibilidade de adaptar alguns dispositivos para pacientes específicos é uma grande vantagem, mas representa um grande desafio pois estruturas personalizadas têm introduzido a necessidade de mudanças regulatórias da qualidade dos produtos e legislação. Em alguns casos, questões relacionadas com biocompatibilidade do material e processo de esterilização mais adequado precisam ser consideradas. Uma grande vantagem do uso do processo FDM é que o mercado nacional disponibiliza impressoras de baixo custo e polímeros de boa qualidade que podem ser utilizados para a maioria das aplicações citadas, além do uso de softwares livres para realizar a modelagem 3D. Estas vantagens têm democratizado o uso do processo FDM na área de engenharia biomédica e as perspectivas futuras apontam para cada vez mais desenvolvimentos.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva JVL. 2018. A manufatura aditiva (impressão 3D) e o caminho para a Indústria 4.0. Disponível em <https://medium.com/hist%C3%B3rias-weme/a-manufatura-aditiva-impress%C3%A3o-3d-e-o-caminho-para-a-ind%C3%BAstria-4-0-c13f22d29e1f>. Acessado em janeiro de 2019.
- [2] Volpato N. Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. Blucher. 2017 São Paulo.
- [3] Sinn DP, Cillo JE, Miles BA: Stereolithography for craniofacial surgery. The Journal of Craniofacial Surgery 2006, 17(5):869-875.
- [4] Chua CK, Leong KF, KH Tan, Wiria FE, Cheah CM. Development of tissue scaffolds using selective laser sintering of polyvinyl alcohol/ hydroxyapatite biocomposite for craniofacial and joint defects. Journal of Material Science: Materials in Medicine 2004, 15:1113-1121.
- [5] Kuznetsov VE, Solonin AN, Urzhumtsev OD, Schilling R, Tavitov AG. (2018). Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. Polymers, 10(3), 313.
- [6] Long J et al. Application of fused deposition modelling (FDM) method of 3D printing in drug delivery. Current pharmaceutical design, v. 23, n. 3, p. 433-439, 2017.
- [7] Masood SH, Song WQ, 2004. Development of new metal/ polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling. Materials and design, 25, 587–594.
- [8] Harun WSW, et al., 2009. Characteristic studies of collapsibility of ABS patterns produced from FDM for investment casting. Materials Research Innovations, 13 (3), 340–343.
- [9] Bala SA et al. Elements and materials improve the FDM products: A review. In: Advanced Engineering Forum. Trans Tech Publications, 2016. p. 33-51.
- [10] Mohan N et al. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. Virtual and Physical Prototyping, v. 12, n. 1, p. 47-59, 2017.
- [11] Novakova-Marcincinova L, Kuric I. (2012). Basic and advanced materials for fused deposition modeling rapid prototyping technology. Manuf. and Ind. Eng, 11(1), 24-27.
- [12] Herrmann KH, Gärtner C, Güllmar D, Krämer M, Reichenbach JR. (2014). 3D printing of MRI compatible components: Why every MRI research group should have a low-budget 3D printer. Medical engineering & physics, 36(10), 1373-1380.

- [13] Anitha R, Arunachalam S, Radhakrishnan P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *J Mater Process Technol* 2001; 118:385–8.
- [14] Zhang C, Anzalone NC, Faria RP, Pearce JM. (2013). Open-source 3D-printable optics equipment. *PloS one*, 8(3), e59840.
- [15] Bagaria V et al. Medical applications of rapid prototyping - a new horizon. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [16] Ventola CL. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *PT*, v. 39, n. 10, p. 704-711, 2014.
- [17] Enabling The Future [Online]. [cited 2015 Jun 19]. Available from: <http://enablingthefuture.org/>
- [18] Zuniga J, Katsavelis D, Peck J, Stollberg J, Petrykowski M, Carson A, Fernandez C. (2015). Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. *BMC research notes*, 8(1), 10.
- [19] Sullivan M, Oh B, Taylor I. (2017). 3d Printed Prosthetic Hand.
- [20] Ten Kate J, Smit G, Breedveld P. (2017). 3D-printed upper limb prostheses: a review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 12(3), 300-314.
- [21] Kunkel, ME. iMaster. Mao3D- O programa colaborativo que reúne inovação, tecnologia e inclusão. Disponível em <https://imasters.com.br/tecnologia/mao3d-o-programa-colaborativo-que-reune-inovacao-tecnologia-e-inclusao> acesso em janeiro de 2019.
- [22] Artioli BO, Maluf NN, Roxo VGL. Produção de um protótipo de prótese de pavilhão auricular. Monografia Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2014.
- [23] Artioli BO, Kunkel ME, Mestanza SN. (2019). Feasibility study of a methodology using additive manufacture to produce silicone ear prostheses. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018* (pp. 211-215). Springer, Singapore.
- [24] Wingstrand M, Hägglund G, Rodby-Bousquet E. Ankle-foot orthoses in children with cerebral palsy: a cross sectional population-based study of 2200 children. *BMC musculoskeletal disorders*, v. 15, n. 1, p. 327, 2014.
- [25] Agnelli L.B, Toyoda CY. Estudo de materiais para confecção de órteses e sua utilização prática por terapeutas ocupacionais no Brasil. *Cadernos de Terapia Ocupacional da UFSCar*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 83-94, 2003.
- [26] Lucarelli PRG et al. Changes in joint kinematics in children with cerebral palsy while walking with and without a floor reaction ankle-foot orthosis. *Clinics*, v. 62, n. 1, p. 63-68, 2007.
- [27] Juvenal EAO. Metodologia inovadora para produção de órtese tornozelo e pé por meio da manufatura aditiva. 134p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do ABC, Santo André. 2018

- [28] Munguia J, Dalgarno KW. Ankle Foot Orthotics Optimization by the means of Composite Reinforcement of Free-Form Structures. Paper presented at the 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium: An Additive Manufacturing Conference, Texas, 2013.
- [29] Moraes C. Próteses veterinárias. Jabuti Freddy. Disponível em http://ciceromoraes.com.br/doc/pt_br/Moraes/Jabota_Freddy.html acesso em janeiro de 2019.
- [30] Moraes C. Próteses veterinárias. Disponível em http://ciceromoraes.com.br/doc/pt_br/Moraes/ProteseV.html acesso em janeiro de 2019.
- [31] Chua CK, Chou SM, Lin SC, Eu KH, Lew KF. (1998). Rapid prototyping assisted surgery planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 14(9), 624-630.
- [32] Rosa ELSD, Oleskovicz CF, Aragao BN. (2004). Rapid prototyping in maxillofacial surgery and traumatology. Brazilian Dental Journal, 15(3), 243-247
- [33] Ahn DG, Lee JY, Yang DY. (2006), Rapid prototyping and reverse engineering application for orthopedic surgery planning, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20 No. 1, pp. 19-128.
- [34] Negi S, Dhiman S, Sharma RK. Basics and applications of rapid prototyping medical models. Rapid Prototyping Journal. 20/3 (2014) 256–267
- [35] Guarino J, Tennyson S, McCain G, Bond L, Shea K, King H. (2007). Rapid prototyping technology for surgeries of the pediatric spine and pelvis: benefits analysis. Journal of Pediatric Orthopaedics, 27(8), 955-960.
- [36] Faber J, Berto PM, Quaresma M. (2006). Rapid prototyping as a tool for diagnosis and treatment planning for maxillary canine impaction, American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, Vol. 129 No. 4, pp. 583-589.
- [37] Maravelakis E, David K, Antoniadis A, Manios A, Bilalis N, Papaharilaou Y. (2008). Reverse engineering techniques for cranioplasty: a case study, Journal of Medical Engineering and Technology, Vol. 32 No. 2, pp. 115-121
- [38] Zenha H, Azevedo L, Rios L, Pinto A, Barroso ML, Cunha C, Costa H. (2011), The application of 3-D biomodelling technology in complex mandibular reconstruction-experience of 47 clinical cases, European Journal of Plastic Surgery, Vol. 34 No. 44, pp. 257-265.
- [39] Dhakshyani R, Nukman Y, Osman NA, Vijay C. (2011). Preliminary report: rapid prototyping models for Dysplastic hip surgery. Open Medicine, 6(3), 266-270.
- [40] Mori K, Yamamoto T, Oyama K, Nakao Y. (2009), Modification of three-dimensional prototype temporal bone model for training in skull-base surgery, Neurosurgery, Vol. 32 No. 2, pp. 233-239.
- [41] Canstein C, Cachot P, Faust A, Stalder A, Bock J, Frydrychowicz A, Kuffer J, Hennig J, Markl M. (2008). 3D MR flow analysis in realistic rapid-prototyping model

systems of the thoracic aorta: comparison with in vivo data and computational fluid dynamics in identical vessel geometries. *Magn Reson Med* 59:535–546

[42] Tek P, Chiganos T, Mohammed J, Eddington D, Fall C, Ifft P, Rousche P (2008) Rapid prototyping for neuroscience and neural engineering. *J Neurosci Methods* 172:263–269

[43] An J, Teoh JEM, Suntornnond R, Chua CK. (2015). Design and 3D printing of scaffolds and tissues. *Engineering*, 1(2), 261-268.

[44] Loh QL, Choong C. Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size. *Tissue Eng. Part B Rev.*, 2013, 19(6): 485–502.

[45] Hutmacher DW, Schantz T, Zein I, Ng KW, Teoh SH, Tan KC. Mechanical properties, and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling. *J. Biomed. Mater. Res.*, 2001, 55(2): 203–216.

[46] Mohseni M, Hutmacher DW, Castro NJ. Independent Evaluation of Medical-Grade Bioresorbable Filaments for Fused Deposition Modelling/Fused Filament Fabrication of Tissue Engineered Constructs. *Polymers*, v. 10, n. 1, p. 40, 2018.

[47] Tiwari G et al. Drug delivery systems: An updated review. *International journal of pharmaceutical investigation*, v. 2, n. 1, p. 2, 2012.

[48] Moulton SE, WALLACE GG. 3-dimensional (3D) fabricated polymer based drug delivery systems. *Journal of Controlled Release*, v. 193, p. 27-34, 2014.

[49] Long J, Gholizadeh H, Lu J, Bunt C, Seyfoddin A. (2017). Application of fused deposition modelling (FDM) method of 3D printing in drug delivery. *Current pharmaceutical design*, 23(3), 433-439.

[50] Goole J, AMIGHI K. 3D printing in pharmaceuticals: A new tool for designing customized drug delivery systems. *International journal of pharmaceuticals*, v. 499, n. 1-2, p. 376-394, 2016.

[51] Skowyra J, Pietrzak K, Alhnan MA. Fabrication of extended release patient-tailored prednisolone tablets via fused deposition modelling (FDM) 3D printing. *Eur J Pharm Sci* 2015; 68: 11-17.

[52] Goyanes A, Martinez PR, Buanz A, Basit AW, Gaisford S. (2015). Effect of geometry on drug release from 3D printed tablets. *International Journal of Pharmaceutics*, 494(2), 657-663.