

ARTIGO DE REVISÃO

Impressão 3D na medicina legal e resolução de crimes: revisão integrativa da literatura*3D printing in forensic medicine and crime solving: integrative literature review***Brizza Fernandes dos Santos Vargas¹, Melina Almeida Coutinho², Flaviane Silva Coutinho³**

Vargas BFS, Coutinho MA, Coutinho FS. Impressão 3D na medicina legal e resolução de crimes: revisão integrativa da literatura / *3D printing in forensic medicine and crime solving: integrative literature review*. Rev Med (São Paulo). Rev Med (São Paulo). 2021 jan.-feb.;100(1):62-9.

RESUMO: A tecnologia de impressão 3D oportunizou explorações em novas áreas biológicas, como na Medicina Legal, auxiliando na resolução de crimes. Considerando o uso dessa tecnologia na Perícia Criminal, este trabalho consiste em uma revisão literária que visa relatar a contribuição da impressão 3D na solução de atos criminosos. Foram relatadas as principais impressões 3D utilizadas, suas vantagens e desvantagens. Como adjuvante, foram apresentadas ainda as técnicas moleculares em impressões 3D que podem auxiliar na resolução de crimes. A análise dos dados revelou que o uso da tecnologia de impressão 3D colaborou nos laudos periciais que elucidaram investigações conduzidas na área criminal. A tecnologia apresentou-se como opção por reduzir custos, prazos e impactos invasivos sobre o corpo em contextos forenses. Concluiu-se que é preciso planejar a construção do objeto levando em conta restrições técnicas das impressoras 3D, principalmente o processo de digitalização. Além disso, determinar qual método computacional combinar para se obter os melhores resultados na Medicina Legal é passo crítico no processo de impressão.

Palavras-chave: Ciência forense; Impressora 3D; Perícia criminal; Prototipagem rápida.

ABSTRACT: 3D printing technology provided opportunities for explorations in new biological areas, such as Forensic Medicine, helping to solve crimes. Considering the use of this technology in Criminal Forensics, this work consists of a literary review that aims to report the contribution of 3D printing in solving criminal acts. The main 3D impressions used, their advantages and disadvantages were reported. As an adjunct, molecular techniques were also presented in 3D printing that can assist in solving crimes. Data analysis revealed that the use of 3D printing collaborated in the expert reports that elucidated investigations conducted in the criminal area. Technology was presented as an option to reduce costs, deadlines and invasive impacts on the body, in forensic contexts. It was concluded that it is necessary to plan the construction of the object taking into account technical restrictions of 3D printers, mainly the digitization process. In addition, determining which computational method to combine to obtain the best results in Forensic Medicine are critical steps in the printing process.

Keywords: Forensic science; 3d printer; Criminal expertise, Rapid prototyping.

1. Bióloga pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - Campus Barbacena, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2152-8974>. E-mail: brizzavargas@gmail.com.
2. Acadêmica do Curso de Medicina da Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC - Ilhéus, Bahia, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3839-8475>. E-mail: melinaalmeidac@gmail.com.
3. Professora substituta do Departamento de Ciências Biológicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais - Campus Barbacena, Minas Gerais, Brasil. Doutora em Bioquímica Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-8720>. E-mail: flavianesilvacoutinho@hotmail.com.

Endereço para correspondência. Rua Leônidas Marota, 208, Bairro Jardim América. Rio Pombo, MG, BR. CEP: 36.180-000. E-mail: flavianesilvacoutinho@hotmail.com.

INTRODUÇÃO

A Medicina Legal tornou-se uma ferramenta importante na investigação criminal, auxiliando em áreas como Genética, Antropologia, Anatomia, entre outras¹. No entanto, na era digital em que vivemos, os criminosos desenvolvem métodos inteligentes e inovadores para atingir seus objetivos. Goodman, fundador do *Future Crimes Institute* – instituição que se dedica a reunir especialistas para discutir as implicações das novas tecnologias – assinala que as impressoras 3D representarão enorme parcela no cenário criminal².

A impressão tridimensional (3D), ou prototipagem rápida, surgiu nos anos 80³. Embora sua aplicação comercial seja relativamente nova, permite que especialistas construam objeto físico a partir de conceitos auxiliados por computador ou reprodução digital de objeto da vida real⁴.

De forma geral, a manufatura desses objetos consiste em processo complexo que começa com a digitalização computadorizada do objeto a ser fabricado, após o qual é digitalmente cortado em várias camadas finas. Finalmente, esses dados geométricos são utilizados pelo equipamento de fabricação que constrói cada camada sequencialmente até o produto tridimensional desejado estar completo^{5,6}.

As primeiras aplicações em disciplinas médicas e morfológicas introduziram as impressoras 3D como mercadoria eficiente na fabricação de elementos anatômicos^{7,8}, peças valiosas exibidas em museus e fósseis paleoantropológicos raros^{9,11}. Gradualmente, a tecnologia tem sido adotada em campos clínicos – enquanto produz próteses cirúrgicas em oftalmologia¹², cirurgia maxilofacial^{13,14}, traumatologia¹⁵ e cardiologia¹⁶.

Aplicações em cenário forense foram propostas pela primeira vez por Abramov em 1998¹⁷. Mediante a isso, alguns trabalhos utilizaram a impressão 3D com a função de elucidar crimes e diminuir o número de processos que são arquivados por falta de provas. Nestes, investigadores e examinadores forenses usam a impressão 3D na reconstrução de acidentes, replicação de evidências da cena do crime e restos esqueléticos não identificados¹⁸. Nos Estados Unidos existe muitas empresas comerciais oferecendo tais serviços, por exemplo, Lazarus 3D, Houston, TX ou 3D Printed Evidence, Jacksonville, FL¹⁹.

Hardware de modelagem 3D, *software* e tecnologia de prototipagem desenvolveram-se rapidamente nos últimos anos, oferecendo aos usuários muitas opções para combinar *hardware*, *software* e materiais de produção para prototipagem rápida. Por ser uma metodologia em expansão, o desafio está em determinar qual combinação usar para os melhores resultados²⁰.

Os equipamentos são relativamente baratos, portáteis e requerem menor tempo para aquisição de dados,

além de permitirem observação e estudo das estruturas envolvidas no crime sendo desnecessário danificar o corpo em contextos forenses. A aplicação dessas tecnologias também permite coleta de dados com degradação mínima e redução de erros humanos^{21,22}.

Neste cenário, essa pesquisa teve o objetivo de identificar estudos que abordaram o uso da Impressão 3D na Medicina Legal e resolução de crimes. Ainda verificar as principais impressões 3D utilizadas, suas vantagens e desvantagens. Por fim, como técnicas moleculares em impressões 3D podem auxiliar na resolução de crimes.

METODOLOGIA

O trabalho foi elaborado por meio de pesquisa qualitativa, no período de abril a novembro de 2019, utilizando-se da abordagem de revisão integrativa de literatura, cuja finalidade foi reunir e sistematizar resultados de estudos relacionados ao tema. A revisão se estruturou em artigos presentes nas bases de dados Pubmed (serviço da *U. S. National Library of Medicine*) e *Science Direct*, em virtude da escassez de relatos no âmbito da América Latina, em especial brasileiro. Os critérios de seleção dos artigos de maior relevância foram: (i) conter expressões “forensic science and 3D printing”, “3D printing and forensic analysis” e “crime diagnosis by 3D printing”; (ii) publicados nos últimos 10 anos (2009 a 2019) e (iii) publicação no formato de artigo científico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após levantamento, procedeu-se a análise das informações onde somando-se as bases de dados, foram encontrados vinte e um artigos, sendo treze do banco de dados Pubmed e oito do *Science Direct*. Após a leitura dos títulos e resumos dos artigos, notou-se que alguns deles se repetiram nas diferentes bases e outros não condiziam ao propósito deste estudo. Diante do exposto, foram selecionados onze artigos que preenchiam os critérios inicialmente propostos e esses foram lidos na íntegra, sendo dez artigos, provenientes da base Pubmed e um do *Science Direct*, apresentados na Tabela 1.

Dentre os artigos selecionados houve predominância e destaque para pesquisas voltadas a impressão de crânios lesionados, onde a principal finalidade era a apresentação em tribunais. De modo geral, a pesquisa retrata artigos que exibem a impressão 3D como objeto de reflexão, tendo em vista a sua importância na análise criminal como um todo.

Neste sentido, para entendermos a relação do uso da impressão 3D na Perícia Criminal, o trabalho foi dividido em quatro seções específicas. Na primeira, apresentamos contribuições da impressão 3D para Medicina Legal

solucionar crimes. Na segunda, descrevemos quais são as principais impressões 3D utilizadas na Perícia Criminal. Na terceira comentaremos quais são as vantagens

e desvantagens do uso da impressão 3D na Perícia Criminal. Por fim, na quarta abordaremos aplicações de técnicas moleculares em impressões 3D na resolução de crimes.

Tabela 1. Artigos selecionados a partir da busca nas bases de dados PUBMED e *Science Direct*

Autor	Título	Ano	Banco de dados
Woźniak et al. ¹⁸	Weapon identification using antemortem computed tomography with virtual 3D and rapid prototype modeling - a report in a case of blunt force head injury.	2012	Pubmed
Ventola ⁴⁷	Medical applications for 3D printing: current and projected uses.	2014	Pubmed
Kettner et al. ³⁵	Reverse engineering-rapid prototyping of the skull in forensic trauma analysis.	2011	Pubmed
Urbanová et al. ⁴	The virtual approach to the assessment of skeletal injuries in human skeletal remains of forensic importance.	2017	Pubmed
Urbanová et al. ¹⁷	Applying 3D prints to reconstructing postmortem craniofacial features damaged by devastating head injuries	2018	Pubmed
Baier et al. ¹⁹	Introducing 3D printed models as demonstrative evidence at criminal trials.	2017	Pubmed
Ebert et al. ³⁸	Getting in touch-3D printing in forensic imaging.	2011	Pubmed
Edwards; Rogers ²⁰	The accuracy and applicability of 3D modeling and printing blunt force cranial injuries	2017	Pubmed
Carew; Errickson ³⁷	Imaging in forensic science: five years on.	2019	Science Direct
Byagathvalli et al. ⁴¹	A 3D-printed hand-powered centrifuge for molecular biology	2019	Pubmed
Chan et al. ⁴⁰	Low-cost 3D printers enable high-quality and automated sample preparation and molecular detection	2016	Pubmed

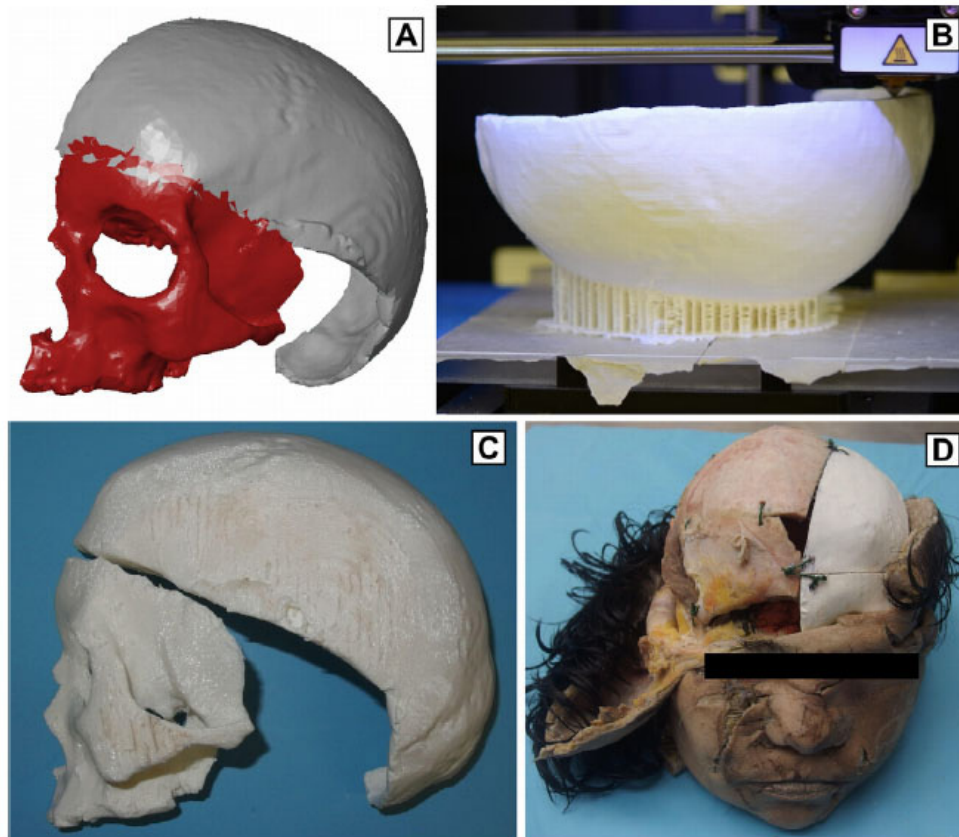
Contribuição da impressão 3D na medicina legal e resolução de crimes

A apresentação de modelos físicos de evidência no tribunal é uma prática recorrente. No entanto, muitas preocupações éticas e legais envolvidas na transferência, transporte e apresentação de restos mortais, impedem os investigadores de apresentarem qualquer evidência física de origem humana. Isso faz com que os sistemas judiciais dependam apenas de fotografias dessas evidências, que nem sempre fornecem a quantidade exata de informações que uma estrutura tridimensional consegue evidenciar²³. Além disso, o manuseio de ossos e restos humanos por várias pessoas e em diferentes ambientes pode levar à degradação das evidências²⁴. Possuindo capacidade de criar réplicas tridimensionais dos restos humanos, as impressoras 3D revolucionaram a Medicina Legal, permitindo a

materialização de diversas evidências de origem humana, com precisão de todas as informações relevantes ao tribunal e ao júri²⁵.

Dados do exame clínico de tomografia computadorizada permitem a reconstrução 3D de fraturas, como observado na Figura 1. O modelo físico do osso quebrado pode demonstrar a natureza das lesões para pessoas que não possuem treinamento médico e/ou não são especialistas na interpretação de imagens anatômicas¹⁸.

O transporte de restos humanos também é estritamente governado por leis, pelas quais autoridades de diferentes áreas podem não ter acesso a tais evidências²⁴. Nesse cenário, a impressão 3D pode ser aplicada e o material impresso pode ser transportado por todos os setores forenses até a elucidação do crime. Prevenindo, desta maneira, rápida perda de informações e a preservação do material biológico.



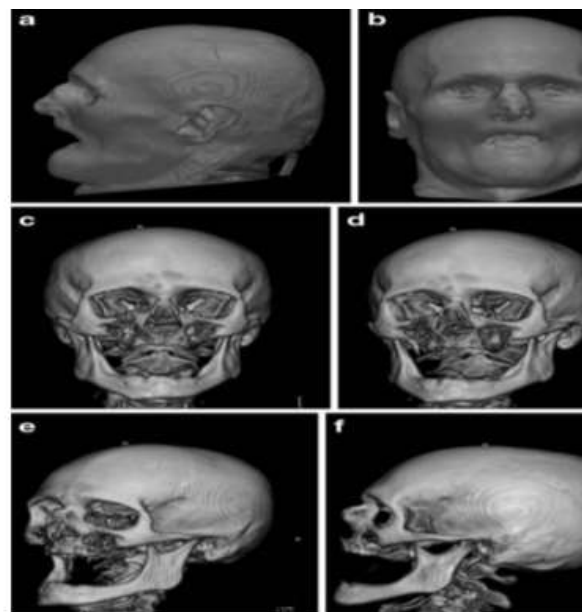
Fonte: Urbanová et. al.¹⁷

Figura 1. Imagem reconstrutiva de objetos 3D utilizado na investigação criminal: A) Modelos poligonais do craniano. B) Processo de impressão 3D. C) Impressão 3D em duas partes. D) Reconstrução da cabeça da vítima

Principais impressões 3D utilizadas na perícia criminal

No campo das Ciências Forenses, os artigos relatam maior aplicação da impressão 3D na Medicina e Odontologia. Os exames forenses pós-morte são capazes de reconstruir os objetos alvo da investigação em 3D por diversas modalidades de aquisição de imagens, como tomografia computadorizada (TC), demonstrada na Figura 2. Há ainda, as variantes de tomografia computadorizada - TC com multidetectores (TCMD) ou TC com feixe cônico (TCFC)²⁶; angio-CT²⁷ e imagem de ressonância magnética (MRI)^{28,29}. Além disso, os vários *softwares* podem ser usados para produzir modelos em 3D de ossos que podem ser rotacionados, medidos e analisados para avaliar parâmetros como idade, sexo e patologia³⁰.

No entanto, na determinação bem-sucedida do mecanismo de lesão em casos que a morte ocorre muito tempo após o evento gerador, devem ser considerados dados clínicos. Em casos de marcas de mordidas, análise de pegadas, impressões labiais e digitais, o material pode ser digitalizado e impresso em 3D, imediatamente, para reduzir a perda de informações e preservar as três dimensões³¹.

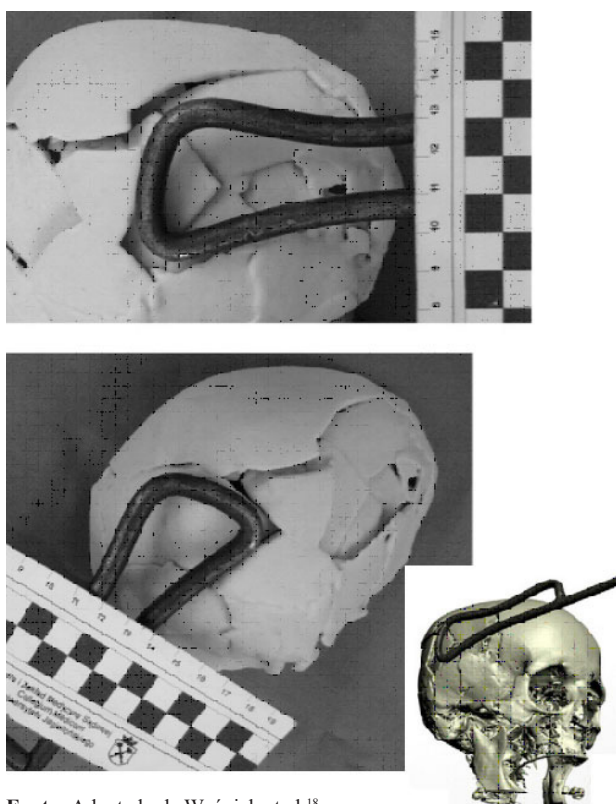


Fonte: Lorkiewicz-Muszynska et al.³²

Figura 2 - Reconstrução por tomografia computadorizada 3D de cabeça (a, b) e crânio (c, d, e, f) elaborados no software In Space

Os dados de tomografia realizados nos casos em que o exame forense sofreu atraso em razão da prioridade de necessidades clínicas na tentativa de resgatar a vítima, podem ser utilizados para criar banco de dados digital. Em seguida, pode ser carregado em equipamento apropriado de fabricação e as evidências podem ser impressas quando necessário durante o processo investigativo³³.

Uma arma (ou modelo de arma) pode ser identificada a partir de, ou ‘correspondida’ a, um modelo 3D de uma lesão óssea. Isso pode ser conseguido identificando morfologicamente a forma do objeto, interpretando as renderizações de volume ou com o uso da estereolitografia³⁴, como demonstra a Figura 3.



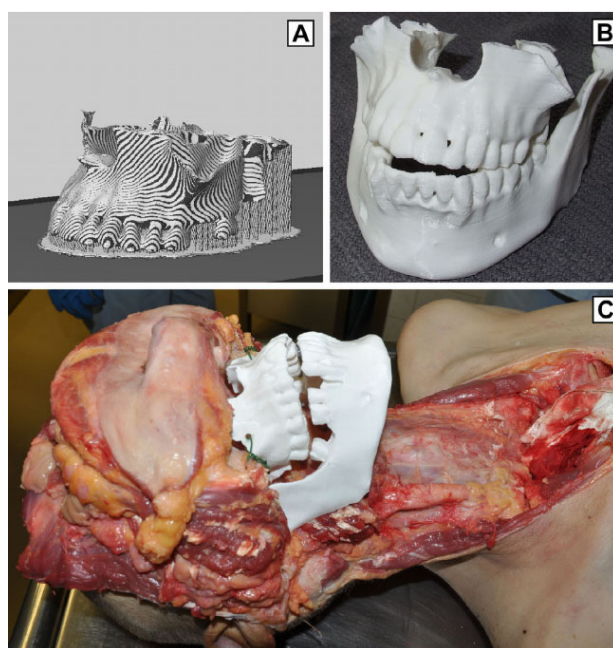
Fonte: Adaptado de Woźniak et al.¹⁸

Figura 3 - Imagens do crânio 3D criado após dados clínicos de tomografia computadorizada e a comparação da área de fratura com a arma correspondente

Os antropólogos e artistas forenses são capazes de reconstruir a aparência provisória da vítima, ajudando na identificação, principalmente daquelas ainda não identificadas^{35,36}. Atualmente, a impressão 3D baseia-se na replicação de elementos esqueléticos, sendo úteis em variadas aplicações, desde a replicação de ossos, reconstruções faciais, identificação de padrão de fratura, identificação e reconstrução de armas usadas no crime^{18,37}.

Vantagens e desvantagens das impressões 3D na perícia criminal

A utilização de tomografia computadorizada respeita integralmente a dignidade da pessoa falecida, é consistente com a ética médica e, além disso, fornece uma excelente impressão 3D de estruturas anatômicas e lesões³⁵. Os objetos 3D são eficazes na demonstração das relações tridimensionais entre estruturas, características ou evidências. Protegem a integridade da evidência forense; e são dimensionadas podendo ser produzidas em tamanho real ou em uma escala aumentada ou reduzida, a fim de enfatizar as especificidades das evidências^{4,24}, como representado na Figura 4.



Fonte: Urbanová et al.¹⁷

Figura 4 - Abordagem reconstrutiva de estrutura 3D. A) Modelo 3D da maxila ajustado à vítima. B) Impressões 3D preparadas para serem implementadas. C) Tratamento de tecidos duros e tecidos moles dentro da sala de autópsia

Embora dependam de imagens 2D ou 3D, as impressões 3D têm várias vantagens sobre as imagens – fotografias e imagens 3D¹⁷. Como as impressões são minimamente gráficas, demonstram efetivamente as relações tridimensionais entre as lesões e as características ósseas. O material impresso pode ser usado como documentação permanente do trauma e como auxiliar de ensino²⁰.

O processo em si é não invasivo e não destrutivo, no entanto, vale acrescentar que a impressão 3D está longe de ser instantânea. Dependendo do tamanho e da complexidade dos modelos, pode levar de meia hora a 25 horas para fabricar réplicas^{17,38}.

Devido a enormes avanços tecnológicos nos últimos anos, a impressão 3D hoje é amplamente utilizada, e há variedades de dispositivos de impressão simples, acessíveis e de baixo custo estando disponíveis no mercado.

Algumas dificuldades envolvidas diretamente na análise pericial podem ser superadas através do uso de réplicas de partes do corpo humano. O primeiro problema é o perigo a saúde que este tecido biológico poderia representar³⁹, o segundo é o dano potencial que o manuseio excessivo poderia causar à parte anatômica do objeto em estudo e o terceiro são os efeitos emocionais e morais que o manuseio dos restos humanos reais pode ter tanto no investigador dos fatos quanto na família da vítima²⁴. Dentre as dificuldades apontadas, destaca-se ainda o fato de que as impressões 3D permitem a demonstração e reprodução de evidências forenses em formato tátil²³. Na era dos dados digitais, isso representa novo meio de apresentar e exibir evidências, com a perspectiva de acelerar etapas do exame forense e melhorar a compreensão das principais conclusões científicas¹⁷.

Com menor frequência, podem ocorrer diferenças estatisticamente significativas nas medições observadas entre os ossos/lesões reais e as impressões 3D. Pode ser que, visualmente as impressões se assemelhem muito às lesões reais, exceto pelos detalhes mais finos (pontos finais de linhas de fratura e alguma porosidade). Isso poderá ser problemático quando se tenta determinar o ponto de impacto usando detalhes da linha de fratura que era visível no osso. Sendo assim as observações devem ser feitas diretamente no mesmo²⁰.

A digitalização é um passo crítico, podendo ainda ser afetada por fatores como ruído e resolução, os quais causam problemas na fotogrametria em particular. Há graus de subjetividade envolvidos no processo de alinhamento, especialmente nos casos em que há a necessidade de realizá-lo manualmente (o usuário deve selecionar os mesmos pontos em várias digitalizações para informar ao computador onde alinhar as imagens). Se não for realizado corretamente, o processo de digitalização é prejudicado, o que resultará em modelos 3D que não replicam adequadamente o original.

Superfícies brilhantes ou escuras também podem ser difíceis de capturar as imagens, resultando em áreas de dados ausentes ou detalhes que podem afetar a impressão 3D. Nesse caso, são feitas verificações para preencher áreas de dados ausentes³⁸. Em algumas situações os elementos impressos não apresentam a nitidez dos originais, especialmente em regiões de borda⁴.

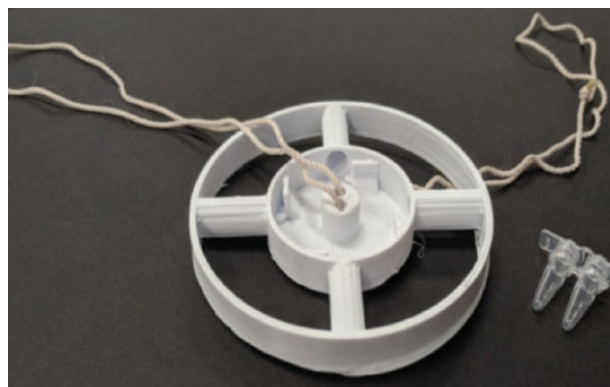
Embora o processo implique certa simplificação prática e geralmente custos mais baixos, a impressão requer tratamento pós-fabricação, no qual as estruturas extras que sustentam o objeto real são removidas (manualmente ou com o auxílio do bisturi). Isso é facilmente gerenciável devido à fragilidade dos suportes construídos, mas o material extra pode deixar resíduos visíveis ou palpáveis no modelo físico final⁴.

Técnicas moleculares em impressão 3D na resolução de crimes

Por ser metodologia em expansão, a impressão 3D possui como desafio determinar quais combinações usar, a fim de se obter os melhores resultados na área criminal. Diante disso, cientistas pensaram na capacidade de extrair e purificar rapidamente ácidos nucleicos com centrífuga manual de baixo custo, realizando em tempo real em ambientes remotos, o que poderia ser útil às aplicações moleculares quando não se tem acesso a equipamentos de laboratório convencionais, por exemplo em, cenários criminais^{40,41}.

As impressoras 3D podem se tornar plataformas atraentes aos usuários, com finalidade de criação de seus próprios dispositivos moleculares de alto desempenho. Além do baixo custo evidenciado, apresentam mecanismos que possibilitam o desenvolvimento de seus próprios testes moleculares, geralmente, inviabilizados em ambientes com recursos escassos⁴⁰.

O 3D-Fuge, representado na Figura 5, é um dispositivo impresso em 3D. Ele é capaz de centrifugar soluções diferentes, como girar amostras destinadas a aplicações de biomarcadores e realizar extrações de nucleotídeos como parte da instalação de laboratório molecular. É altamente portátil e não requer acesso contínuo à eletricidade, facilitando o transporte e a utilização em várias aplicações⁴¹.



Fonte: Byagathvalli et al.⁴¹

Figura 5. 3D-Fuge utilizado em estudo de caso com tubos de PCR de 0,2 mL colocados ao lado para comparação

Projetos portáteis de sequenciamento estão surgindo em ambientes de campo aplicados, incluindo espécies em tempo real ou identificação de amostras ambientais^{42,43}, diagnóstico de patógenos^{44,45} e metagenômica^{46,47}. Outra metodologia que pode ser utilizada no auxílio à resolução de crimes é a modificação de impressoras 3D, as quais podem ser adaptadas em plataformas de detecção molecular de baixo custo, automatizadas e de médio rendimento. A impressora 3D modificada move partículas magnéticas (MP) em diferentes reagentes a fim de concluir o isolamento e purificação de ácidos nucleicos (NA). Além disso, as

alterações nas impressoras 3D são pequenas o suficiente, sendo reversíveis; portanto a capacidade de impressão não se torna perdida⁴⁰. Atualmente, no que diz respeito à biologia molecular, além das citadas tecnologias inovadoras que poderão ser utilizadas na elucidação de questões envolvidas em investigações criminais, a análise do DNA da vítima associada à coleta de suas impressões digitais⁴⁷, destaca-se encanto método que favorece a identificação dos envolvidos.

CONCLUSÕES

A aplicação da impressão 3D na resolução de crimes ainda se apresenta de forma escassa nas bases de dados, principalmente em trabalhos de origem brasileira. A tecnologia de impressão 3D retrata significativas aplicações nas ciências forenses, permitindo a reconstrução não invasiva de estruturas anatômicas detalhadas, auxiliando na solução de casos, proporcionando ainda a integridade do material biológico a ser analisado. Outra função que pode

ser atribuída à impressão, é a exposição em tribunais de detalhes imprescindíveis à adequada compreensão do delito investigado. Tal procedimento resguarda aspectos éticos envolvidos na preservação dos restos mortais do falecido, além de respeitar os familiares, bem como demais partes envolvidas no processo.

O desempenho da impressora depende, muitas vezes, do processo de digitalização, no qual pequenos erros podem gerar objetos que não se assemelham à estrutura real. As estruturas reproduzidas através do referido processo, além do baixo custo, apresentam como vantagem a possibilidade de envio para análises em outros locais sem serem danificados, tal qual ocorreria com as partes anatômicas do próprio periciado.

Ainda não foram descritos registros sobre uso da impressão 3D associado a técnicas moleculares, porém, com a existência de equipamentos impressos portáteis com funções de amplificação de DNA e sequenciamento gênico, haverá a possibilidade de seu manuseio nas análises criminais no futuro próximo.

Contribuição dos autores: *Vargas BFS*: levantamento bibliográfico em bases de dados, análise dos dados e escrita do artigo. *Coutinho MA*: análise dos dados, adequação do artigo às normas da Revista de Medicina e revisão final do artigo. *Coutinho FS*: Professora orientadora, concepção e elaboração do projeto, auxílio nas discussões de análise dos dados e submissão do artigo.

REFERÊNCIAS

- Santos AE. As principais linhas da biologia forense e como auxiliam na resolução de crimes. *Rev Bras Criminalística*. 2018;7:12-20. doi: <https://doi.org/10.15260/rbc.v7i3.190>.
- Goodman M. Future crimes: tudo está conectado, todos somos vulneráveis e o que podemos fazer sobre isso. São Paulo: HSM; 2015.
- George E, Liacouras P, Rybicki FJ, Mitsouras D. Measuring and establishing the accuracy and reproducibility of 3D printed medical models. *Radiographics*. 2017;37:1424-50. doi: <https://doi.org/10.1148/rg.2017160165>.
- Urbanová P, Jurda M, Ross AH, Splíchalová I. The virtual approach to the assessment of skeletal injuries in human skeletal remains of forensic importance. *J Forensic Legal Med*. 2017;49:59-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2017.05.015>.
- Gibson I, Rosen DW, Stucker B. Additive manufacturing technologies—rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer; 2010.
- Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*. 2012;55:155-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- Mankovich NJ, Cheeseman AM, Stoker NG. The display of three-dimensional anatomy with stereolithographic models. *J Digital Imaging*. 1990;3:200-03. doi: <https://doi.org/10.1007/BF03167610>.
- Lauridsen H, Hansen K, Norgard MO, Wang T, Pedersen M. From tissue to silicon to plastic: three-dimensional printing in comparative anatomy and physiology. *Royal Soc Open Sci*. 2016;3:01-15. doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.150643>.
- Zur Nedden D, Knapp R, Wicke K, Judmaier W, Murphy WA, Seidler H, Platzer W. Skull of a 5300-year-old mummy. Reproduction and investigation with CT-guided stereolithography. *Radiology*. 1994;193:269-72. doi: <https://doi.org/10.1148/radiology.193.1.8090905>.
- Recheis W, Weber GW, Schaefer K, Horst S, Knapp R, Nedden DZ. Virtual reality and anthropology. *Eur J Radiol*. 1999;31:88-96. doi: [https://doi.org/10.1016/s0720-048x\(99\)00089-3](https://doi.org/10.1016/s0720-048x(99)00089-3).
- Péres F, Taha F, Lumley MA, Cabanis EA. Digital modelling and stereolithographic production of a Homo erectus skull. *Rapid Prototyping J*. 2004;10:247-54. doi: <https://doi.org/10.1108/13552540410551379>.
- Adams JW, Paxton L, Burlak K, Dawes K, Quayle MR, Mmenamin PG. 3D printed reproductions of orbital dissections: a novel mode of visualising anatomy for trainees in ophthalmology or optometry. *Brit J Ophthalmol*. 2015;99(9). doi: <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-306189>.
- Azuma M, Ishibashi-Kanno N, Ito T, Hasegawa S, Adachi S, Sekido M, Yanagawa T, Uchida F, Yamagata K, Sasaki K, Tabuchi K, Bukawa K. Mandibular reconstruction using plates prebent to fit rapid prototyping 3-dimensional printing models ameliorates contour deformity. *Head Face Med*. 2014;10:01-10. doi: <https://doi.org/10.1186/1746-160X-10-45>.
- Moraes PH, Olate S, Assis AF, Cantín M, Santos EC, Silva LO, Silva FO. Anatomical reproducibility through 3D printing in cranio-maxillo-facial defects. *Int J Morphol*. 2015;33:826-30. doi: <https://doi.org/10.4067/S0717-95022015000300003>.
- Elgalal M, Kozakiewicz M, Olszycki M, Walkowiak B, Stefanczyk L. Custom implant design and surgical pre-planning using rapid prototyping and anatomical models for the repair of orbital floor fractures. *Eur Soc Radiol*. 2009;01-17. <https://dx.doi.org/10.1594/ecr2009/C-292>.
- Kim MS, Hansgen AR, Wink O, Quaipe RA, Carroll JD. Rapid prototyping a new tool in understanding and treating structural heart disease. *Circulation*. 2008;117:2388-94. doi: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.740977>.
- Urbanová P, Vojtisek T, Frishons J, Sandor O, Jurda M, Krajsa J. Applying 3D prints to reconstructing postmortem craniofacial features damaged by devastating head injuries. *Legal Med*. 2018;33:48-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2018.05.005>.
- Woźniak K, Woźniak ER, Moskala A, Pohl J, Latacz K,

- Dybala B. Weapon identification using antemortem computed tomography with virtual 3D and rapid prototype modeling-A report in a case of blunt force head injury. *Forensic Sci Int*. 2012;222:29-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.06.012>.
19. Baier W, Warnett JM, Williams MA, Payne M. Introducing 3D printed models as demonstrative Evidence at Criminal Trials. *J Forensic Sci*. 2017;63. doi: <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13700>.
 20. Edwards J, Rogers R. The accuracy and applicability of 3D modeling and printing blunt force cranial injuries. *J Forensic Sci*. 2017;63:683-691. doi: <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13627>.
 21. Dedouit F, Costagliola R, Joffre F, No T, Otal P, Rougé D. Virtual anthropology and forensic identification: report of one case. *Forensic Sci Int*. 2007;173:182-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.01.002>.
 22. Brough AL, Ruddy GN, Black S, Morgan B. Post-mortem computed tomography and 3D imaging: anthropological applications for juvenile remains. *Forensic Sci Med Pathol*. 2012;8:270-9. doi: <https://doi.org/10.1007/s12024-012-9344-z>.
 23. Liscio E. Forensic uses of 3D printing. *Forensic Magazine*. 2013 [cited 2019 Oct 19]. Available from: <https://www.forensicmag.com/article/2013/06/forensic-uses-3d-printing>.
 24. Errickson D, Thompson TJU, Rankin B. The application of 3D visualization of osteological trauma for the courtroom: a critical review. *J Forensic Radiol Imaging*. 2014;2:132-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2014.04.002>.
 25. Killgrove K. How 3D printed bones are revolutionizing forensics and bioarchaeology. *Forbes* [cited 2019 Oct 19]. Available from: <https://www.forbes.com/sites/kristinakilgrove/2015/05/28/how-3d-printed-bones-are-revolutionizing-forensics-and-bioarchaeology/#2dbaa3861a39>.
 26. Thali M, Vock P, Kneubuehl BP, Dirnhofer R, Yen K, et al. Image-guided virtual autopsy findings of gunshot victims performed with multi-slice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) and subsequent correlation between radiology and autopsy findings. *Forensic Sci Int*. 2004;138:08-16. doi: [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(03\)00225-1](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(03)00225-1).
 27. Jackowski C, Thali M, Allmen GV, Dirnhofer R, Sonnenschein M, et al. Virtopsy: Postmortem minimally invasive angiography using cross section techniques-implementation and preliminary results. *J Forensic Sci*. 2005;50:1175-86. doi: <https://doi.org/10.1520/JFS2005023>.
 28. Dirnhofer R, Vock P, Thali M, Jackowski C, Potter K. Virtopsy: minimally invasive, imaging-guided virtual autopsy. *Radiographics*. 2006;26:1305-33. doi: <https://doi.org/10.1148/rg.265065001>.
 29. Thali M, Dirnhofer R, Vock P. The virtopsy approach: 3D optical and radiological scanning and reconstruction in forensic medicine. Boca Raton, FL.: CRC Press; 2009.
 30. Mantini S, Ripani M. Modern morphometry: new perspectives in physical anthropology. *New Biotechnol*. 2009;25:325-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.03.009>.
 31. Scott C. Could 3D printed fingerprints help criminals break through security? MSU researchers demonstrate It's possible. 3DPRINT; 2016 [cited 2019 October 18]. Available from: <https://3dprint.com/153234/3d-printed-fingerprints-security/>.
 32. Lorkiewicz-Muszynska D, Kociemba W, Zaba C, Koralewskakordel M, Abreu-Glowacka M, Przystanska A, Labecka M. The conclusive role of postmortem computed tomography (CT) of the skull and computer-assisted superimposition in identification of an unknown body. *Int J Legal Med*. 2012;127:653-60. doi: <https://doi.org/10.1007/s00414-012-0805-4>.
 33. Schuh P, Scheurer E, Fritz K, Pavlic M, Hassler EM, Yen K, Rienmueller R. Can clinical CT data improve forensic reconstruction? *Int J Legal Med*. 2013;3:631-8. doi: <https://doi.org/10.1007/s00414-013-0830-y>.
 34. Bakker B, Bakker HM, Soerdjbalie-Maikoe V. The use of 3D-CT in weapon caused impression fractures of the skull, from a forensic radiological point of view. *J Forensic Radiol Imaging*. 2013;176-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2013.07.005>.
 35. Kettner M, Schmidt P, Potente S, Ramsthaler F, Chrodt M. Reverse engineering-rapid prototyping of the skull in forensic trauma analysis. *J Forensic Sci*. 2011;56:1015-7. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.01764.x>.
 36. Thimmesch D. 3D printing plays critical role in solving decades-old cold cases in Florida. 3DPRINT; 2015 [cited 2019 Oct 18]. Available from: <https://3dprint.com/102606/3dprint-solving-cold-cases/>.
 37. Carew R, Errickson D. Imaging in forensic science: five years on. *J Forensic Radiol Imaging*. 2019;16:24-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jofri.2019.01.002>.
 38. Ebert LC, Thali M, Ross S. Getting in touch-3D printing in forensic imaging. *Forensic Sci Int*. 2011;211:e1-e6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.04.022>.
 39. Jarvis PM. A Primer on the use of dangerous trial exhibits. *Am J Trial Advocacy*. 2014;37:519-32. Available from: https://nsuworks.nova.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1232&context=law_facarticles.
 40. Chan K, Hardick J, Wong KY, Wilson SA, Wong SSS, Coen M, et al. Low-cost 3D printers enable high-quality and automated sample preparation and molecular detection. *PLoS One*. 2016;11. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158502>.
 41. Byagathvalli G, Pomerantz A, Sinha S, Standeven J, Bhamla MS. A 3D-printed hand-powered centrifuge for molecular biology. *PLoS Biol*. 2019;17(5):e3000251. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000251>.
 42. Parker J, Devey D, Papadopulos A, Helmstetter A, Wilkinson T. Field-based species identification of closely-related plants using real-time nanopore sequencing. *Scient Rep*. 2017;7:01-08. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08461-5>.
 43. Pomerantz A, Arteaga A, Pichardo F, Amoros BC, Prost S, Penafiel N, et al. Realtime DNA barcoding in a rainforest using nanopore sequencing: opportunities for rapid biodiversity assessments and local capacity building. *GigaScience*. 2018;7. doi: <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy033>.
 44. Quick J, Loman NJ, Duraffour S, Simpson JT, Severi E, Cowley L, Bore JA, et al. Real-time, portable genome sequencing for Ebola surveillance. *Nature*. 2016;530:228-32. doi: <https://doi.org/10.1038/nature16996>.
 45. Edwards A, Debonnaire AR, Nicholls SM, Rassner SME, Sattler B, Cook JM, et al. In-field metagenome and 16S rRNA gene amplicon nanopore sequencing robustly characterize glacier microbiota. *BioRxiv*. 2019;073965. doi: <https://doi.org/10.1101/073965>.
 46. Johnson SS, Zaikova E, Goerlitz DS, Bai Y, Tighe SW. Real-time DNA sequencing in the Antarctic Dry Valleys using the Oxford Nanopore sequencer. *J Biomol Techn*. 2017;8:1-7. doi: <https://doi.org/10.7171/jbt.17-2801-009>.
 47. Ventola CL. Medical applications for 3D printing: current and projected uses. *P&T*. 2014;39:704-11. doi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4189697/>.
- Recebido: 24.03.2020
Aceito: 04.01.2021