

ESTADO DA ARTE DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTÍVEIS NA MANUFATURA ADITIVA COM ÊNFASE NA MEDICINA VETERINÁRIA

Milena Andréa Martins Paiva, milena.20230004572@aluno.uema.br¹

Milene Andréia Martins Paiva, milene.20240045050@aluno.uema.br¹

Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, alissonfigueiredo@professor.uema.br¹

¹Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Cidade Universitária Paulo VI, Av. Lourenço Vieira da Silva, n.º 1000, Bairro Jardim São Cristóvão, CEP: 65055-310 – São Luís/MA,

Resumo. A presente revisão de literatura tem como objetivo reunir, analisar e discutir os principais avanços e aplicações relacionados ao tema estado da arte dos ensaios não destrutíveis na manufatura aditiva com ênfase na medicina veterinária. O foco deste trabalho está direcionado aos materiais incorporados no âmbito da saúde, com capacidade de substituição de membros através do desenvolvimento de próteses em pequenos e grandes animais, associando a tecnologia da engenharia com a biomedicina. A metodologia empregada consistiu na busca e seleção de artigos científicos nas bases de dados Google Acadêmico, revistas científicas, trabalhos acadêmicos, dissertações, Portal de Periódicos CAPES e sites reconhecidos, no período compreendido entre 2013 a 2025. Foram selecionadas obras que apresentassem informações verificadas e embasadas teoricamente, com ênfase na coesão e evolução dos estudos dentro do panorama científico e tecnológico. Conclui-se que no cenário atual e sistemático sobre aplicação dos ensaios não destrutíveis (END) na manufatura aditiva (MA), busca identificar lacunas na literatura, desafios técnicos, e as tendências futuras para o aprimoramento dessas técnicas dentro do escopo da Indústria 4.0 nas diversas áreas profissionais.

Palavras chave: Ensaio não destrutivo. Impressão 3D. Manufatura aditiva. Medicina veterinária. Próteses.

This literature review aims to gather, analyze and discuss the main advances and applications related to the state of the art of non-destructive testing in additive manufacturing with an emphasis on veterinary medicine. The focus of this work is on materials incorporated in the health field, with the capacity to replace limbs through the development of prosthetics in small and large animals, associating engineering technology with biomedicine. The methodology employed consisted of searching and selecting scientific articles in the Google Scholar databases, scientific journals, academic papers, dissertations, CAPES Journal Portal and recognized websites, in the period between 2013 and 2025. Works that presented verified and theoretically based information were selected, with an emphasis on the cohesion and evolution of studies within the scientific and technological panorama. It is concluded that in the current and systematic scenario on the application of non-destructive testing (NDT) in additive manufacturing (AM), it seeks to identify gaps in the literature, technical challenges, and future trends for the improvement of these techniques within the scope of Industry 4.0 in the various professional areas.

Keywords: Non-destructive testing. 3D printing. Additive manufacturing. Veterinary medicine. Prosthetics.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de construir objetos a partir de um modelo virtual, da adição de materiais em camadas, está baseado na manufatura aditiva. Manufatura aditiva (MA), traduzida do inglês additive manufacturing (AM), é denominada de um conjunto de tecnologias de impressão tridimensional (3D), que imprime objetos através da sobreposição progressiva de camadas, seja material metálico ou polímero. Destacando-se no cenário industrial, com inúmeras vantagens de redução de tempo e de custos na produção. No mercado, a MA pode ser aplicada na fabricação de automóveis, aviões, implantes odontológicos e próteses. Dentre os processos, destacam-se a Modelagem de Deposição Fundida (FDM), Estereolitografia, Sinterização Seletiva a Laser, Jateamento de Aglutinantes, PolyJet. O impacto da indústria 4.0 propõe um novo cenário industrial, com a utilização de novas tecnologias como robôs, impressoras 3D e sensores, viabilizando a flexibilização da cadeia produtiva e possibilitando a criação de produtos personalizados, reduzindo a perda de materiais durante o processo por meio da manufatura aditiva (Araújo, 2021).

Em 1981, o pesquisador Hideo Kodama realizou impressão tridimensional, inspirado pela tecnologia de polímero fotoendurecido. Termos foram introduzidos para descrever o processo de uso da impressora e software CAD. Materiais, como polímeros e metais são mais utilizados, eficientes para produção de baixo volume e redução do desperdício. O material feito de um modelo geométrico 3D originado por um sistema de desenho assistido por computador (CAD), segue para o “fatiamento” do modelo em curvas de nível 2D, definido com estruturas que darão suporte à peça. Para Volpati

e Carvalho (2018 apud Prado *et al.*, 2019), as tecnologias iniciais de manufatura aditiva (MA) eram predominantemente empregadas na produção de protótipos visuais, caracterizando-se por exigências reduzidas em relação aos materiais, à precisão dimensional e ao desempenho. No entanto, à medida que seu potencial foi sendo reconhecido, observa-se uma crescente demanda por aprimoramentos, tanto nos processos e seus componentes quanto nos materiais utilizados e nas funcionalidades das aplicações desenvolvidas (Araújo, 2021).

A manufatura aditiva está presente nas indústrias aeroespacial, automobilística, eletrônicos, área de saúde na fabricação de implantes odontológicos, impressão de medicamentos, próteses e na criação de órgãos em laboratório. O avanço da MA no campo da ciência revolucionou o desenvolvimento e a evolução da economia de mercado, presente cada vez mais no processo de produção, analisando o desenvolvimento da tecnologia, relevância para as empresas e o impacto da gestão. A eficiência da tecnologia torna a fabricação da produção mais rápido, sem desperdícios com um tempo reduzido pelo produto. Desse modo, possibilita a formação de objetos peculiares de peça exclusiva a próteses de membros e órgãos de pacientes da área da saúde (Araújo, 2021).

Técnicas de inspeção de materiais e equipamentos são utilizados para avaliação dos tipos de MA, detectar e avaliar falhas em materiais ou diferenças em suas características, sendo necessário implementação de métodos como Ensaio Não Destrutivo (END) ou Ensaio Destrutivo, na qual END, processo de inspeção de materiais sem alterar ou destruir sua capacidade de manutenção, já o Ensaio Destrutivo consiste no comportamento desses materiais quando submetidos a esforços mecânicos, determinando a resistência. A integração da END na MA no campo da saúde, proporcionou difusão de conhecimento e avanços tecnológicos, síntese de peças personalizadas, gama de diversidade de materiais, permitindo a produção de peças com maior exatidão. Portanto, o uso da técnica END na MA inserido na indústria garante qualidade, segurança, integridade estrutural, além da redução de custos e aumento da eficiência, trazendo inovação e flexibilidade para a produção (Araújo, 2021).

Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão de literatura, a aplicação dos Ensaio Não Destrutivos (END) no contexto da Manufatura Aditiva (MA), destacando sua importância no controle de qualidade, segurança e eficiência da produção. Busca-se compreender como a MA, impulsionada pela Indústria 4.0 e pelas tecnologias de impressão 3D, tem se consolidado em diversos setores e, de que forma os END contribuem para a detecção de falhas, avaliação de integridade estrutural e aprimoramento do desempenho das peças fabricadas, sem comprometer seus materiais. A pesquisa visa, ainda, contextualizar o avanço histórico, técnico e científico dessas tecnologias, ressaltando os benefícios econômicos, produtivos e sociais de sua integração.

2. FUNDAMENTOS DA MANUFATURA ADITIVA

No século XVIII, a Revolução Industrial gerou uma disparidade tecnológica entre países desenvolvidos e subdesenvolvidos, afetando o trabalho humano. A partir de 1970, a automação industrial começou com a introdução de sistemas computacionais. Em 2000, a revolução da informática trouxe tecnologias digitais para a produção. A manufatura aditiva (MA), iniciada em 1981 por Hideo Kodama no Japão, evoluiu com o desenvolvimento de impressoras 3D no MIT. Diversos termos foram criados para descrever esse processo de produção de objetos camada a camada, como prototipagem rápida e manufatura digital direta. Isso exige uma integração inteligente da produção, utilizando inteligência artificial, sensores e equipamentos em rede (Araújo, 2021).

Para Veit (2018 apud Araújo, 2021), a história da manufatura aditiva é dividida em quatro fases. A primeira, na década de 1980, focou na prototipagem, caracterizada por altos custos de equipamentos e materiais. A segunda fase, nos anos 1990 e 2000, concentrou-se em aplicações medicinais. A terceira fase envolveu a expansão de materiais e equipamentos, acompanhada de evolução tecnológica. A última fase representa a transição para aplicações comerciais robustas, integrando a manufatura aditiva em linhas produtivas com maior eficiência. Charles Hull destacou-se ao inventar a Estereolitografia (SLA) e fundou a 3D Systems em 1986, comercializando a primeira máquina de MA, a SLA-1. Na década de 1980, Scott Crump inventou a Modelagem por Deposição Fundida (FDM), e em 1992, a primeira máquina de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) foi comercializada pela DTM. Em 2001, a 3D Systems adquiriu a DTM, controlando as tecnologias SSL e SLA (Araújo, 2021).

Para Pazhamannil (2021), a manufatura aditiva é o processo de criar objetos, camada por camada. Segundo Choi e Samavedam (2002 apud Araújo, 2021), o conceito adotado atualmente de MA, era atribuído a prototipagem rápida ou manufatura em camadas, que consta o processo de um sólido pré-definido, formado pela adição de matéria-prima em sobreposição de camadas. Já para Attaran (2017), a MA é a versão industrial da impressão 3D, sendo a própria tecnologia e a prototipagem rápida uma aplicação dessa tecnologia. O termo Prototipagem Rápida, bastante utilizado para definir a criação de um protótipo rápido, foi considerado ultrapassado que não se limitava apenas na produção de um protótipo, visto que a peça final e funcional era fabricada diretamente às máquinas. A mudança de nomenclatura se refere a evolução tecnológica das aplicações da Manufatura Aditiva (Araújo, 2021).

Em 2009 o comitê F42 da American Society for Testing and Materials (ASTM) foi criado para guiar o desenvolvimento das padronizações da MA. Em 2015, foi publicada a ISO/ASTM 52900, sucedendo a ASTM F2792, expandindo a padronização da MA, foi constituída a primeira norma com a International Organization for Standardization (ISO) e na ASTM F2915 aconteceram padronizações com relação ao formato dos arquivos da tecnologia, permitindo assim a transfe-

rência entre diferentes hardwares e softwares (Frazier, 2014). Quatro das categorias são utilizadas com maior frequência para fabricação de peças metálicas: Jateamento de aglutinante (BJ), Fusão em leito de pó (PBF), Laminação de folhas e Deposição Direta de Energia (DED); para polímeros e materiais cerâmicos e indiretamente em metais: Fotopolimerização em cuba, Jateamento de material e Extrusão de material (Pragana *et al.*, 2021 apud Araújo, 2021).

Tabela 1. Categorias de MA e traduções. Adaptado de Araújo, 2021.

Vat Photopolymerization	Fotopolimerização em Cuba
Material Extrusion	Extrusão de Material
Material Jetting	Jateamento de Material
Binder Jetting	Jateamento de Aglutinante
Powder Bed Fusion	Fusão em Leito de Pó
Sheet Lamination	Laminação em Folha
Direct Energy Deposition	Deposição por Energia Direcionada

Dessa forma, os materiais usados na MA incluem metais (Aço inoxidável, Alumínio, Titânio, Ligas de níquel, Cobalto-cromo, Ouro, Prata), polímeros (ABS, Nylon, PLA, PC, PP, PS, PET, PEAD), cerâmicas e compostos, resinas epóxi, acrílicos e acrílato. Sendo os polímeros e os metais os tipos mais comuns de materiais, além de serem eficientes para a produção de baixo volume e redução do desperdício (Simão, 2017).

A classificação das categorias de MA depende da forma do material usado na fabricação de objetos 3D, dentre eles a forma de pó, folha ou lâmina, filamento e líquido (Silva *et al.*, 2020). Abaixo está listado uma breve descrição das principais categorias:

- Fotopolimerização em Cuba: O processo pelo qual é utilizado uma resina fotopolimérica líquida, solidificada seletivamente por meio de uma fonte de luz, conforme consta no ISO/ASTM 52900/2015. Categoria aplicada na indústria médica com a fabricação de aparelhos auditivos, implantes e moldes para procedimentos odontológicos, produção de próteses e diferentes moldes.
- Fusão em Leito em Pó (PBF): Sintetizam peças sólidas usando fonte de energia (laser ou feixe de elétrons) para fundir pó com caminho programada, depositando camada sob camada. Tecnologia aplicada em polímeros e metais, que abrangem grande variedade de materiais metálicos, podendo citar: liga de titânio, níquel, cobalto-cromo, ligas de alumínio, prata, ouro, aço inoxidável e aço ferramenta (Gibson *et al.*, 2021 apud Araújo, 2021). Considera-se os tipos de PBF: Sinterização Seletiva a Laser (SSL), Fusão Seletiva a Laser (SLM), Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS), Sinterização Seletiva por Calor (SHS), Fusão por Feixe de Elétrons (EBM) (Singh *et al.*, 2021).
- Jateamento de Aglutinante (BJ): Utiliza material em pó e aglutinante líquido que serve como estrutura adesivante entre camadas de pó (Loughborough University, 2018 apud Araújo, 2021). Os materiais podem ser à base de cerâmica ou metal (Redwood, 2021 apud Araújo, 2021). Uma vantagem da BJ é impedir problemas ligados à oxidação, tensão tecidual e mudanças de fase.
- Jateamento de Material (MJ): Ocorre pela deposição seletiva de material em formato de gotículas, geralmente fotopolímeros e termoplásticos. Os princípios métodos de deposição do material são: modo contínuo e o drop – on – demand (DOD).
- Laminação em Folha: Definida pela ISO/ASTM 52900 (2015) como um processo no qual lâminas são unidos com finalidade na formação da peça.
- Impressão 3D: Método de produção digital que gera objetos em três dimensões a partir de um modelo virtual, construindo a estrutura por meio da deposição sucessiva de camadas de material.
- Estereolitografia (SLA): É uma técnica de manufatura aditiva que emprega resina fotopolimerizável como material base, a qual é solidificada pela ação de feixes de laser ultravioleta. A cura da resina ocorre camada por camada, resultando na formação do objeto final.
- Modelagem por Deposição Fundida (FDM): É um processo de fabricação aditiva que cria objetos tridimensionais por meio da extrusão de filamentos termoplásticos aquecidos, depositados camada por camada. Trata-se de uma das tecnologias de impressão 3D mais difundidas e acessíveis atualmente.
- Deposição Direta de Laser de Energia (DED): É uma técnica de manufatura aditiva que utiliza uma fonte de energia concentrada, como laser ou feixe de elétrons, para fundir materiais metálicos, os quais são depositados camada por camada para construir a peça. Essa tecnologia é amplamente empregada na impressão 3D de metais, possibilitando a fabricação de componentes complexos com alta precisão e liberdade de design.

- Sinterização Seletiva a Laser (SLS): É um método de manufatura aditiva em que um laser funde de forma seletiva partículas de pó de polímero, formando uma estrutura sólida camada por camada. Como o pó não sinterizado sustenta a peça durante a construção, não há necessidade de estruturas de suporte adicionais.

3. ÁREAS DE APLICAÇÃO DA MANUFATURA ADITIVA

Dentre as áreas de aplicações de materiais fabricados por manufatura aditiva, destacam-se (Prado *et al.*, 2019):

- Engenharia Mecânica - Criação rápida e flexível de protótipos, personalização de componentes e a produção sob demanda. Além disso, a impressão 3D oferece desenvolvimento peças com geometrias complexas e materiais específicos, impulsionando a inovação e a sustentabilidade na indústria.
- Engenharia Aeroespacial - Fabricação de protótipos, componentes de aeronaves e satélites, peças de reposição, otimização das peças como bicos injetores de combustível para turbinas de aviação mais duráveis e mais leves; câmara de combustão de motores de foguetes, polímeros reforçados com fibra de carbono são usados em pranchas de asas, e fuselagens para fortalecer e reparar estruturas encontradas nos aviões. Polímeros reforçados com fibra de vidro em compósitos mais espessos de rotores de helicópteros, tubulações e tanques de armazenamento na indústria petroquímica.
- Engenharia Naval - A composição híbrida de polímero-matriz envolvendo diferentes tipos de fibras utilizados na fabricação de aerofólios de turbinas eólicas e hidrofólios para propulsores marítimos.
- Engenharia Civil - Fabricação de concreto para construção convencional, fabricação de componentes estruturais diversos, com maior personalização, e menores tempos de entrega.
- Biomedicina - Fabricação de implantes personalizados como aparelhos auditivos, odontológicos, próteses robóticas, reconstrução de ossos e partes do corpo, entre outros.
- Engenharia Automobilística - Fabricação de protótipos e componentes de automóveis com geometrias complexas, redução do peso dos automóveis, fabricação de peças de reposição e acessórios diversos, otimização de sistemas de refrigeração de carros de alta performance.
- Indústria de Alimentos - Viabilidade de produzir alimentos no espaço, camada por camada.
- Engenharia Genética - Transformação de células do tecido adiposo do paciente em células-tronco, criado a partir de um material genético.

4. ENSAIOS NÃO DESTRUTÍVEIS

Para Sun *et al.* (2021), o processo de fabricação de objetos camada por camada a partir de modelos digitais de geometria tridimensional, sem restrições dos processos convencionais de forjamento, fundição e usinagem, conceitua a Manufatura Aditiva. Logo, MA é um conjunto de tecnologias que funcionam adicionando material camada por camada, a partir de um modelo digital predefinido. Esse modelo é então “fatiado” em camadas com todas as informações para a máquina iniciar a fabricação do objeto desejado, representado na Fig. 1. A síntese, composição, tipo de material e volume, fontes de energia utilizadas, são variações que distinguem os tipos de máquinas e categorias de MA.



Figura 1. Funcionamento da Manufatura Aditiva (Araújo, 2021).

Conforme Gibson, Rosen e Stucker (2015), definiu-se oito passos de processo genérico de MA: 1. Modelagem CAD; 2. Conversão para o formato de STL; 3. Transferência para a máquina de MA e manipulação do arquivo STL; 4. Configuração da máquina de manufatura aditiva; 5. Formação do objeto (impressão); 6. Remoção dos componentes; 7. Pós-processamento; 8. Aplicação.

- 1) Modelagem CAD – A modelagem CAD (Computer Aided Design), consiste em conceituar, projetar e visualizar o produto a ser fabricado por MA a partir de um software;
- 2) Conversão para formato STL – Descreve a superfície fechada do modelo que serve com base para cálculos. O arquivo STL, de estereolitografia, descreve o modelo CAD, sua geometria, sem cor, materiais, unidades;
- 3) Transferência para a máquina de MA e manipulação do arquivo STL – As modificações recebidas no arquivo STL depende das condições de cada operação e logo após, é destinado para máquina de MA;
- 4) Configuração da máquina de MA – A configuração se baseia conforme os parâmetros do processo, como material utilizado, fontes de energia, dimensões geométricas, espessura da camada;
- 5) Formação do objeto físico (impressão) – Adição camada por camada no material molda o objeto desejado, tornando necessário o monitoramento visual;
- 6) Remoção dos componentes – Retirada da peça, após a finalização da operação, adotando os devidos cuidados, evitando acidentes e defeitos nos equipamentos;
- 7) Pós-processamento – A manipulação do objeto para o uso, com a limpeza das peças, remoção de estruturas de suporte;
- 8) Aplicação – Obtenção das peças a partir da MA disponíveis para uso.

As técnicas de ensaios não destrutíveis são classificadas em:

- a) Radiografia: O ensaio radiográfico utiliza a absorção diferenciada de radiações (X, gama ou nêutrons) para inspecionar materiais, registrando a radiação emergente por meio de filmes, telas fluorescentes ou detectores eletrônicos.
- b) Termografia: A inspeção termográfica utiliza radiação infravermelha para avaliar a distribuição de temperatura, permitindo a análise da condição operacional de componentes sem contato físico, com segurança e rapidez, mesmo durante o funcionamento.
- c) Ultrassom: Método que detecta descontinuidades internas pela reflexão de ondas ultrassônicas, permitindo alta precisão na localização e dimensionamento de falhas, além de oferecer grande penetração e portabilidade.
- d) Partículas magnéticas: É um ensaio utilizado na inspeção de materiais ferromagnéticos, baseado na aplicação de um campo magnético para identificar descontinuidades por meio de campos de fuga gerados em áreas com interrupções nas propriedades magnéticas.
- e) Líquidos penetrantes: O método baseia-se na aplicação de um líquido com propriedades específicas sobre a superfície de um material, com o objetivo de promover a penetração desse líquido em descontinuidades abertas. Após o tempo de penetração, o excesso de líquido é removido, e um revelador é aplicado, promovendo a extração do líquido retido nas falhas e formando uma indicação visível na superfície. A avaliação dessas indicações é realizada conforme os critérios normativos estabelecidos para a fabricação do componente.
- f) Emissão Acústica: O método de emissão acústica (EA) monitora a integridade estrutural e detecta descontinuidades, fornecendo informações sobre sua origem e propagação durante a operação de equipamentos.
- g) Correntes parasitas: As correntes parasitas também contribuem para o aumento do poder de dissipação de energia que alteram a parte real da impedância da bobina. Acompanhando o valor da impedância através do monitoramento do sinal de tensão elétrica e corrente, é possível relacionar os valores de impedância medidos com informações específicas do material testado, tais como condutividade e composição química.
- h) Ensaio Visual: O método de emissão acústica (EA) monitora a integridade estrutural e detecta descontinuidades, fornecendo informações sobre sua origem e propagação durante a operação de equipamentos.

A escolha dos métodos de Ensaios Não Destrutivos adequados depende do conhecimento prévio sobre as técnicas mais utilizadas na indústria, bem como de parâmetros específicos do material ou produto a ser analisado. O número de métodos de END está em constante crescimento, com novos métodos sendo desenvolvidos à medida que pesquisadores exploram novas aplicações da física e outras áreas científicas.

5. MANUFATURA ADITIVA APLICADA NA MEDICINA VETERINÁRIA

O desenvolvimento da MA otimizou a produção personalizada, especialmente na Medicina Regenerativa, permitindo a fabricação de próteses adaptadas a partir de imagens de tomografia computadorizada e materiais como plásticos e metais. A impressão 3D também possibilita a produção de scaffolds porosos tridimensionais que mimetizam propriedades da matriz extracelular, promovendo suporte mecânico, interação celular e formação de tecido ósseo in vivo (Leonardi *et al.*, 2021). A impressão 3D tem se destacado na ortopedia humana e veterinária por permitir a produção de biomodelos, implantes e guias cirúrgicos personalizados. Essa tecnologia reduz o tempo cirúrgico e facilita procedimentos complexos, como fraturas com fragmentações e deformidades ósseas (da Silva, 2022).

A partir de projetos computacionais, é possível imprimir e transplantar tecidos ou órgãos necessários ao paciente. Para essas tecnologias, são utilizados diferentes materiais, como aço e variados tipos de titânio, conforme o tipo e a localização da lesão. Nas aplicações médicas devem atender a três requisitos principais: biocompatibilidade, propriedades mecânicas e, em alguns casos, biodegradabilidade. A falha no material, como a corrosão de metais, pode causar danos fisiológicos e comprometer o sucesso do implante (Leonardi *et al.*, 2021).

Estudos foram feitos com o foco na expansão de materiais e equipamentos utilizadas na MA aplicados na Medicina Veterinária. Dessa forma, foi realizada uma tomografia computadorizada (TC) pélvica de um cão pastor alemão de 5 anos, com estenose degenerativa lombo - sacral e suspeita de doença degenerativa da articulação coxofemoral, foi utilizada para o desenvolvimento de uma prótese personalizada. Conforme demonstrado na Fig. 2, a reconstrução volumétrica 3D das imagens de TC gerou um modelo pélvico, projetando a prótese acetabular, integrada a um software 3D das estruturas corporais. Os parâmetros da TC foram: espessura de corte de 2 mm, energia do feixe de 140 KV e 150 mAv, diâmetro de reconstrução de 250 mm e matriz de convolução de 40. As imagens pélvicas obtidas pela tomografia foram inseridas no software MIMICS (Materialise Interactive Medical Image Control System), que segmentou a imagem, permitindo a seleção da parte óssea de interesse para impressão. A impressora Stratasys Fortus 400, utilizando a tecnologia FDM, foi utilizada para criar o modelo do osso canino pélvico. O material utilizado foi ABS, e a espessura da camada escolhida foi de 0,25 mm (Leonardi *et al.*, 2021).

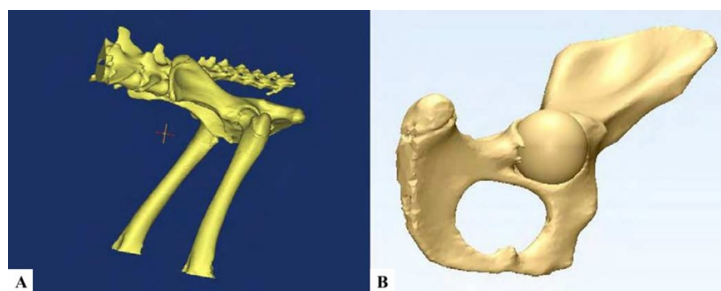


Figura 2. Modelo do osso pélvico utilizado para projetar a prótese (Leonardi *et al.*, 2021).

O modelo do osso pélvico foi usado para projetar manualmente a prótese personalizada, criando uma placa acetabular que envolve o osso ílaco e permite a fixação com parafusos ósseos, demonstrado na Fig. 3. O material escolhido foi aço inoxidável, e a prótese foi dividida em dois componentes esféricos: uma esfera trabeculada, em contato com o osso esponjoso, e uma interna, preenchida para resistir a cargas, representado na Fig. 4a. A trabeculação hexagonal foi escolhida para favorecer a osseointegração e reduzir o módulo de elasticidade. A impressão da prótese foi feita com a tecnologia DMLS, utilizando o maquinário MYSINT 100, que constrói a prótese camada por camada com laser de 200 W. A Figura 4b, demonstra que a prótese personalizada foi adaptada ao modelo plástico de ABS e possui uma estrutura trabecular no acetábulo, promovendo a osseointegração.



Figura 3. Prótese do osso pélvico personalizada (Leonardi *et al.*, 2021).



Figura 4. (a) Adaptação da prótese para o material ABS (Leonardi *et al.*, 2021).

Para realização de uma tomografia computadorizada (formato DICOM) de um cão sem raça definida com luxação medial de patela bilateral. O joelho direito foi selecionado para a fabricação da peça anatômica. A Figura 5 apresenta a modelagem anatômica baseada em um modelo educacional de joelho esquerdo de cão hígido, disponibilizado pela St. George's University. Utilizando o software Autodesk Maya, foram desenhadas estruturas articulares por meio de

sobreposição e comparação, incluindo o fêmur distal, tendão do quadríceps, ligamentos patelar, colateral medial e lateral, meniscos, além da tíbia e fíbula proximais (Santos *et al.*, 2018)).

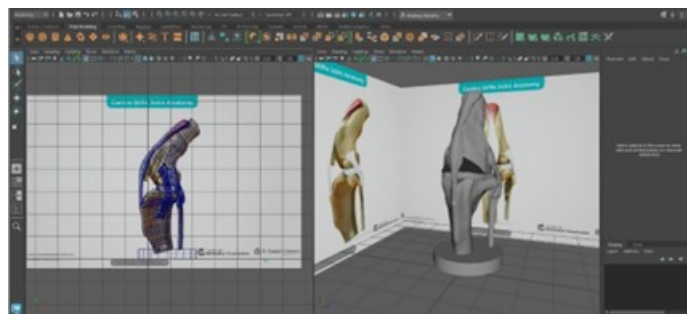


Figura 5. Simulação do comportamento da prótese (Santos *et al.*, 2018).

Pesquisas paralelas demonstraram que o objeto é digitalizado automaticamente por Engenharia Reversa, importado para um programa de modelagem, e, em seguida, passa por um processo de limpeza de artefatos indesejáveis antes da modelagem final. A peça foi produzida em impressora 3D utilizando filamento de PLA, por meio da técnica de FDM. Com a técnica de Manufatura Aditiva utilizando a impressora Prusa I3, o casco bovino (Fig. 6) foi impresso apresentando boa volumetria, sendo adequado para servir como modelo na produção da órtese (Santos *et al.*, 2018).

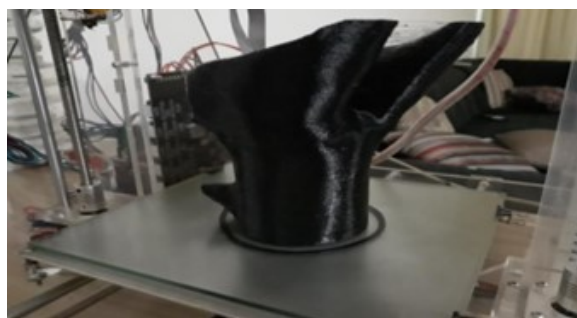


Figura 6. Impressão do casco bovino (Santos *et al.*, 2018).

Em um estudo de caso foi apresentado coelhos com grandes segmentos traqueais que foram submetidos a cirurgia reconstrutiva, utilizado um implante customizado em impressora 3D com copolímero associado ao elastômero termoplástico, objeto utilizado para o reparo de defeito parcial da traqueia de coelhos, aliado ao enxerto autólogo de omento. As poliamidas são aplicadas na medicina por sua biodegradabilidade e biocompatibilidade. Dentre os materiais em estudo, destaca-se o elastômero termoplástico (TPE), que combina elasticidade com facilidade de processamento. O PCPTE foi desenvolvido visando unir a flexibilidade do TPE com a durabilidade do nylon. Esses materiais têm ampla aplicação na saúde, como em instrumentos cirúrgicos, cateteres, stents. As reações do tipo corpo estranho ocorrem em cinco fases: adsorção de proteínas, inflamação aguda e crônica, formação de células gigantes e de cápsula fibrosa. No entanto, a resposta a novos biomateriais é imprevisível, sendo influenciada por diversos fatores, o que reforça a necessidade de estudos *in vivo* específicos para cada material (Rein, 2021).

A Figura 7, apresenta uma prótese de PCPTE impressa em 3D apresentou bons resultados na reconstrução de defeitos traqueais em coelhos, sem comprometer a mobilidade cervical ou integridade da sutura. No entanto, a presença de secreção intraluminal indica ausência de reepitelização por epitélio respiratório ciliado. A termografia infravermelha demonstra eficácia no monitoramento da cicatrização e de complicações sépticas, porém sua aplicação em diferentes sítios cirúrgicos ainda requer investigação adicional (Rein, 2021).

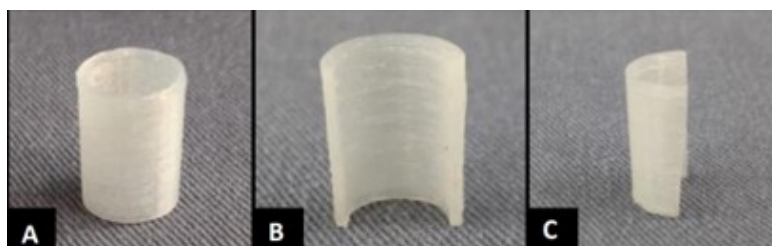


Figura 7. Representação de prótese para reconstrução de traqueia (Rein, 2021).

6. CONCLUSÃO

O estudo conclui que a manufatura aditiva (MA) apresenta um potencial significativo quando aplicada à medicina veterinária, oferecendo vantagens em relação aos métodos convencionais em termos de personalização, custo-benefício e rapidez de produção. O uso da MA permite a criação de implantes, próteses e guias cirúrgicos personalizados, melhorando os resultados dos tratamentos e reduzindo o tempo de recuperação. A análise de diferentes aplicações clínicas destaca a versatilidade e a precisão das tecnologias de MA. Esta pesquisa demonstrou que a integração da MA em procedimentos veterinários contribui para intervenções mais precisas e melhora a qualidade geral do atendimento prestado aos pacientes animais.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), ao Laboratório de Experimentação e Simulação de Calor (LESC), ao Centro de Ciências Agrárias (CCA), e ao professor Alisson Augusto Azevedo Figueiredo, do curso de Engenharia Mecânica da UEMA, pelo suporte técnico e institucional. Estendem, ainda, seus agradecimentos à Milene Andréia Martins Paiva, irmã do autor, e aos seus pais, pelo incentivo e apoio fundamentais à construção da configuração experimental.

8. REFERÊNCIAS

- Araújo, V.C., 2021. *Manufatura aditiva e suas aplicações na indústria: uma revisão de literatura*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Ceará, Ceará, Brasil.
- Attaran, M., 2017. “The rise of 3-d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing”. *Business horizons*, Vol. 60, No. 5, pp. 677–688.
- da Silva, P.H.S.S., 2022. *Impressão tridimensional de joelho canino*. Ph.D. thesis, Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil.
- Frazier, W.E., 2014. “Metal additive manufacturing: a review”. *Journal of Materials Engineering and performance*, Vol. 23, pp. 1917–1928.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B. and Khorasani, M., 2021. *Additive manufacturing technologies*, Vol. 17. Springer.
- Leonardi, L., Marsili, R., Bellezza, E., Angeli, G., Emiliani, C., Ricci, A., Rossi, G. *et al.*, 2021. “A pilot study on the use of 3d printers in veterinary medicine”. *Brazilian Journal of Veterinary Pathology*, Vol. 14, No. 3, pp. 159–164.
- Pazhamannil, R V e Govindan, P., 2021. “Current state and future scope of additive manufacturing technologies via vat photopolymerization”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, pp. 130–136.
- Prado, A.N., do Amaral Mattos, É.C. and da Silva Rodrigues, F., 2019. “Manufatura aditiva: conceitos, aplicações e impactos na gestão”. *Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)*, Vol. 3, No. 1.
- Pragana, J., Sampaio, R.F., Bragança, I., Silva, C. and Martins, P., 2021. “Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review”. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Vol. 2, p. 100032.
- Rein, A., 2021. *Uso de implante 3D de copoliamida associada à elastômero termoplástico aliado ao enxerto autólogo de omento maior para reparação traqueal de coelhos (Oryctolagus cuniculus)*. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Brasil.
- Santos, M.R.S., Padilha, R.C. and Eilers, T.L., 2018. “Impressão 3d no desenvolvimento de prototipagem de órteses”. *Anais Do IX Seminário Regional de Extensão Universitária Da Região Centro-Oeste*.
- Silva, P.C., Santandrea, R.S., Brandão, L.C., Xavier, M.V.A. and Volpini, V.L., 2020. “Manufatura aditiva: Revisão sistemática da literatura”. *Brazilian Journal of Development*, Vol. 6, No. 11, pp. 84502–84515.
- Simão, C.M.P., 2017. *Avaliação de diferentes técnicas de END para materiais compósitos produzidos por manufatura aditiva*. Master’s thesis, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).
- Singh, D.D., Mahender, T. and Reddy, A.R., 2021. “Powder bed fusion process: A brief review”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 350–355.
- Sun, C., Wang, Y., McMurtrey, M.D., Jerred, N.D., Liou, F. and Li, J., 2021. “Additive manufacturing for energy: A review”. *Applied Energy*, Vol. 282, p. 116041.