Revista Eletrônica
Acervo Saúde
Electronic Journal Collection Health ISSN 2178-2091

Avanços em bioengenharia tecidual e bioimpressão 3D na reconstrução auricular

Tissue engineering and 3D bioprinting in auricular reconstruction

Ingeniería de tejidos y bioimpresión 3D en la reconstrucción auricular

Maria Clara Lima Barbosa Cardoso[1], Anna Clara Castro das Chagas[1], Samyra Cavalcante da Silva[1], Layane Kerlen Mendes Saboia[1], Giovanna Tacchi[1], Renata de Souza[1], Clarissa Maia Mallmann de Paula[1], Yasmin Rafaely Bernardo Teixeira[1], Giulia Bizarria Passos[1], Isabelly de Carvalho Leal[1].

RESUMO

Objetivo: Revisar sobre o uso da bioengenharia tecidual e da bioimpressão tridimensional (3D) na reconstrução de orelhas como alternativa para reabilitação bucomaxilofacial. **Métodos:** Trata-se de uma pesquisa descritiva, conduzida por meio de uma revisão integrativa da literatura. Foi realizada busca nas bases de dados PubMed e Embase com os descritores "Bioprinting", "Ear" e "Cartilage", combinados pelo operador "AND". Aplicando filtro para os últimos cinco anos, foram encontrados 28 artigos em inglês. Após análise de títulos e resumos, 21 foram excluídos por não atenderem aos critérios, como revisões, estudos *in vitro* ou fora do tema. Assim, 7 estudos laboratoriais *in vivo* foram incluídos. **Resultados:** A engenharia tecidual associada à bioimpressão 3D demonstrou potencial na reconstrução auricular em pacientes com defeitos maxilofaciais. Diferentes biomateriais foram utilizados, incluindo hidrogéis combinados com malhas de ácido poliglicólico contendo condrócitos, nanocelulose bacteriana e policaprolactona. Esses materiais apresentaram boas propriedades biomecânicas, favorecendo a proliferação celular e a regeneração cartilaginosa *in vivo*. **Considerações finais:** A bioimpressão 3D permite a criação de estruturas personalizadas que reproduzem a anatomia da orelha humana, garantindo biocompatibilidade e bons resultados estéticos. A associação de biomateriais com hidrogéis mostra-se promissora para futuras aplicações clínicas na reconstrução da orelha externa.

Palavras-chave: Prótese bucomaxilofacial, Engenharia tecidual, Bioimpressão, Reabilitação.

ABSTRACT

Objective: To review the use of tissue engineering and three-dimensional (3D) bioprinting in ear reconstruction as an alternative for maxillofacial rehabilitation. **Methods:** This is a descriptive study conducted through an integrative literature review. A search was performed in the PubMed and Embase databases using the descriptors "Bioprinting," "Ear," and "Cartilage," combined with the Boolean operator "AND." Applying a filter for the last five years, 28 articles in English were identified. After title and abstract screening, 21 studies were excluded for not meeting the eligibility criteria, such as review articles, in vitro studies, or studies unrelated to the topic. Therefore, 7 in vivo laboratory studies were included. **Results:** Tissue engineering associated with 3D bioprinting demonstrated potential for auricular reconstruction in patients with maxillofacial defects.

[1] Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Fortaleza – CE.

SUBMETIDO EM: 4/2026 | **ACEITO EM: 5/2026** | **PUBLICADO EM: 7/2026**

Different biomaterials were used, including hydrogels combined with polyglycolic acid meshes containing chondrocytes, bacterial nanocellulose, and polycaprolactone. These materials showed good biomechanical properties, promoting cell proliferation and in vivo cartilage regeneration. **Final considerations:** 3D bioprinting enables the creation of personalized structures that reproduce the anatomy of the human ear, ensuring biocompatibility and satisfactory aesthetic outcomes. The association of biomaterials with hydrogels appears promising for future clinical applications in external ear reconstruction.

Keywords: Maxillofacial prosthesis, Tissue engineering, Bioprinting, Rehabilitation.

RESUMEN

Objetivo: Revisar el uso de la ingeniería tisular y de la bioimpresión tridimensional (3D) en la reconstrucción auricular como alternativa para la rehabilitación bucomaxilofacial. **Métodos:** Se trata de un estudio descriptivo realizado mediante una revisión integradora de la literatura. Se efectuó una búsqueda en las bases de datos PubMed y Embase utilizando los descriptores “Bioprinting”, “Ear” y “Cartilage”, combinados con el operador booleano “AND”. Aplicando un filtro para los últimos cinco años, se identificaron 28 artículos en inglés. Tras el análisis de títulos y resúmenes, 21 estudios fueron excluidos por no cumplir con los criterios de elegibilidad, como revisiones, estudios in vitro o trabajos fuera del tema. Así, se incluyeron 7 estudios experimentales in vivo. **Resultados:** La ingeniería tisular asociada a la bioimpresión 3D mostró potencial para la reconstrucción auricular en pacientes con defectos maxilofaciales. Se utilizaron diferentes biomateriales, incluyendo hidrogeles combinados con mallas de ácido poliglicólico con condrocitos, nanocelulosa bacteriana y policaprolactona. Estos materiales presentaron buenas propiedades biomecánicas, favoreciendo la proliferación celular y la regeneración cartilaginosa in vivo. **Consideraciones finales:** La bioimpresión 3D permite crear estructuras personalizadas que reproducen la anatomía de la oreja humana, garantizando biocompatibilidad y resultados estéticos satisfactorios.

Palabras clave: Prótesis bucomaxilofacial, Ingeniería tissular, Bioimpresión, Rehabilitación.

INTRODUÇÃO

Os defeitos maxilofaciais são alterações congênitas ou adquiridas que acometem ossos e tecidos moles da face, gerando comprometimentos estéticos, funcionais e psicossociais, frequentemente exigindo reabilitação cirúrgica e protética. Podem resultar de anomalias do desenvolvimento, traumas ou ressecções por neoplasias, sendo seu tratamento realizado por equipe multidisciplinar (GHAGAS SR, et al., 2025). Nesse contexto, destaca-se a microtia, malformação congênita da orelha externa caracterizada pelo desenvolvimento incompleto do pavilhão auricular, variando de formas leves à anotia. Além do impacto estético, associa-se a repercussões psicossociais, como baixa autoestima e isolamento social, podendo também comprometer a audição e o desenvolvimento da linguagem (GHAGAS SR, et al., 2025; ARIANI N, et al., 2013). Trata-se de uma das anomalias craniofaciais mais frequentes, com prevalência aproximada de 1,46 por 10.000 nascidos vivos, com variações regionais e maior incidência em populações asiáticas e hispânicas, reforçando a importância do diagnóstico precoce e do planejamento reabilitador individualizado (ARIANI N, et al., 2013).

Diante dos prejuízos funcionais e estéticos associados aos defeitos maxilofaciais, as próteses bucomaxilofaciais configuram-se como uma importante alternativa terapêutica na reabilitação desses pacientes, especialmente quando a reconstrução cirúrgica é limitada ou inviável (DUBEY SG, et al., 2020). Os dispositivos protéticos têm como finalidade restaurar estruturas anatômicas e recuperar funções como fala, mastigação e deglutição, além da estética facial (DE CAXIAS FP, et al., 2019). Podem ser intra orais, como obturadores palatinos, ou extra orais, como próteses auriculares, nasais e oculares, sendo confeccionadas com materiais biocompatíveis, como silicone e resina acrílica, que permitem adequada adaptação e mimetização tecidual (LANZARA R, et al., 2021). Seu planejamento exige abordagem

individualizada e atuação interdisciplinar, considerando aspectos funcionais e psicossociais. Quando bem indicadas, promovem melhora significativa da função, estética e qualidade de vida, favorecendo a reintegração social dos pacientes (DE CAXIAS FP, et al., 2019).

Com o advento da engenharia tecidual e da bioimpressão 3D, têm-se desenvolvido alternativas promissoras para a reabilitação de pacientes com defeitos maxilofaciais, permitindo a criação de andaimes e implantes personalizados que reproduzem com alta fidelidade a anatomia facial e favorecem a regeneração de tecidos como cartilagem e pele (SALAH M, et al., 2020). A impressão 3D já é utilizada para gerar estruturas anatômicas complexas, como orelhas humanas, por meio da construção de andaimes biocompatíveis capazes de receber células e fatores de crescimento, mimetizando a matriz extracelular e promovendo a formação de cartilagem elástica (VELASQUILLO C, et al., 2023; ZHOU J, et al., 2023). Essa tecnologia pode se tornar uma alternativa no tratamento da microtia congênita, ao possibilitar o desenvolvimento de arcabouços auriculares personalizados com base na orelha contralateral saudável ou em modelos derivados dos pais, potencialmente reduzindo a morbidade associada ao uso de cartilagem costal autógena (WEI J, et al., 2023; HUANG Y, et al., 2023).

Nesse contexto, a engenharia de tecidos configura-se como o fundamento biológico dessas abordagens, integrando biologia celular, organogênese e biomateriais com o objetivo de restaurar ou substituir tecidos danificados, sendo amplamente aplicada na medicina regenerativa e em desenvolvimento para possibilitar reconstruções craniofaciais. Nessa abordagem, dois componentes são essenciais: as células, responsáveis pela neoformação tecidual, e as matrizes extracelulares artificiais (ECMs) ou andaimes, que atuam como suporte tridimensional para adesão, proliferação e diferenciação celular (HUANG Y, et al., 2023). Esses andaimes devem apresentar biocompatibilidade, bioatividade e biodegradabilidade, além de propriedades físico-químicas e mecânicas adequadas ao tecido-alvo, permitindo sua aplicação em estruturas anatômicas específicas, como orelhas e narizes (LIU N, et al., 2022).

Um aspecto central da engenharia de tecidos aplicada à reconstrução cartilaginosa é a seleção adequada das células e dos materiais de andaime, pois essas combinações influenciam diretamente a formação de cartilagem estável e semelhante ao tecido nativo (ZHOU J, et al., 2023). Nesse contexto, os condrócitos auriculares destacam-se como células semeadas, por apresentarem propriedades histológicas e mecânicas próximas às da orelha normal (VELASQUILLO C, et al., 2023; JIA L, et al., 2022). Além disso, essas células podem ser obtidas de forma relativamente simples, inclusive de remanescentes de microtia, permitindo sua expansão *in vitro* e aplicação em andaimes impressos em 3D (OTTO IA, et al., 2022; XIE X, et al., 2022; GVARAMIA D, et al., 2024). Essa afinidade com o órgão-alvo e a capacidade de formar cartilagem elástica madura justificam seu amplo uso na reconstrução auricular (OTTO IA, et al., 2021; VELASQUILLO C, et al., 2023; JIA L, et al., 2022).

Apesar desses avanços no campo da engenharia tecidual, os métodos tradicionais de tratamento da microtia, como a reconstrução cirúrgica com cartilagem costal autóloga e o uso de implantes aloplásticos, ainda apresentam limitações importantes, incluindo morbidade do sítio doador, complexidade técnica, múltiplas etapas cirúrgicas e resultados estéticos variáveis (HUANG Y, et al., 2023; OTTO IA, et al., 2022). Além disso, as próteses auriculares convencionais, embora eficazes na reabilitação estética, podem apresentar desafios relacionados à retenção, a durabilidade dos materiais e a necessidade de substituições periódicas (HUANG Y, et al., 2023; ZHOU J, et al., 2023; IBRAHIM EA, et al., 2024). Nesse sentido, investigar as aplicações da engenharia de tecidos associada à bioimpressão tridimensional na reconstrução auricular torna-se relevante, ao buscar compreender o potencial dessas tecnologias para o desenvolvimento de estruturas mais funcionais e estéticamente satisfatórias. Assim, o presente estudo teve como objetivo revisar a literatura sobre o uso da bioengenharia tecidual e da bioimpressão 3D na reconstrução de orelhas como alternativa para reabilitação bucomaxilofacial.

MÉTODOS

A presente revisão abrangeu periódicos indexados nas bases de dados PubMed e Embase, considerando a seguinte pergunta norteadora: o uso da engenharia tecidual e da bioimpressão 3D é uma alternativa viável

para aplicação clínica na reconstrução auricular? A estratégia de busca foi conduzida com o uso de descritores MeSH organizados na seguinte combinação: "((Bioprinting) AND (Ear) AND (Cartilage))", associados por meio do operador booleano "AND". Aplicou-se filtro para estudos publicados nos últimos cinco anos (2021–2026), no idioma inglês.

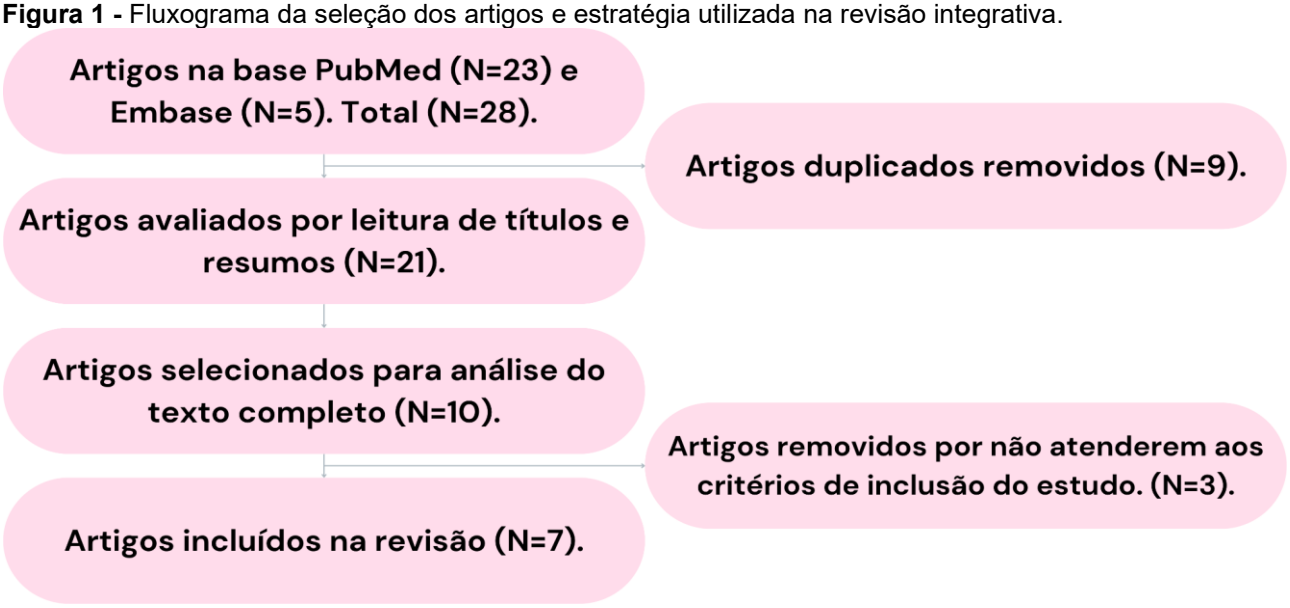
Os critérios de inclusão compreenderam estudos experimentais *in vivo* que investigaram a aplicação da engenharia tecidual e da bioimpressão 3D na regeneração cartilaginosa e reconstrução auricular. Foram excluídos estudos *in vitro*, revisões de literatura, metanálises, ensaios clínicos e trabalhos que não abordassem diretamente a temática proposta.

A seleção dos artigos foi realizada de forma manual, em duas etapas, pela pesquisadora principal do estudo (MCLBC). Inicialmente, procedeu-se à remoção de duplicatas, seguida da análise de títulos e resumos para identificação dos estudos potencialmente relevantes. Posteriormente, os artigos elegíveis foram analisados na íntegra para verificação dos critérios de inclusão.

A pesquisadora extraiu dos estudos selecionados informações como: título, autores, objetivo, tipo de biomaterial utilizado, tipo celular empregado, metodologia aplicada e principais desfechos relacionados à regeneração cartilaginosa e reconstrução auricular. Eventuais divergências foram resolvidas por uma revisora (ICL).

A estratégia de busca identificou 28 estudos. Após a triagem por títulos e resumos, 21 foram excluídos. Assim, 7 artigos foram analisados na íntegra e incluídos na presente revisão para síntese das evidências (**Figura 1**).

Figura 1 - Fluxograma da seleção dos artigos e estratégia utilizada na revisão integrativa.



Fonte: Cardoso MCLB, et al., 2026.

RESULTADOS

No estudo de Gvaramia D, et al. (2024), investigou-se a biocompatibilidade de enxertos de cartilagem autóloga bioimpressa em modelo de coelho imunocompetente. Para isso, condrócitos auriculares foram isolados dos próprios animais, incorporados a um *bioink* (tinta biológica) de hialuronana transglutaminase (HATG) e submetidos à bioimpressão. Após maturação *in vitro*, os construtos de tecido foram transplantados para avaliação histológica e imuno-histoquímica. Os resultados evidenciaram amolecimento acentuado dos enxertos, perda de glicosaminoglicanos (GAGs) e colágeno tipo II, além de encapsulamento fibroso e degradação parcial, sugerindo uma resposta imune significativa mesmo em condições autólogas. Esses achados ressaltam a importância da avaliação de biomateriais em modelos imunocompetentes para melhor compreensão de sua interação biológica.

De forma complementar, Velasquillo C, et al. (2023) investigaram o uso de tecido remanescente de microtia como fonte celular para a engenharia de cartilagem elástica, utilizando arcabouços de policaprolactona (PCL) impressos em 3D com morfologia auricular. Condrócitos humanos derivados desses remanescentes foram semeados nos andaimes e avaliados *in vivo* por meio de análises histológicas, caracterização de proteínas de matriz e testes reprodutíveis em experimentos independentes. Os resultados demonstraram a formação de um tecido tridimensional com características de cartilagem elástica madura, incluindo presença de colágeno tipo II, elastina e perfil proteico semelhante ao tecido nativo, indicando que a associação entre PCL e células provenientes de microtia constitui uma estratégia promissora para reconstrução auricular autóloga.

Em um estudo conduzido por Landau S, et al. (2021), foi desenvolvida uma estratégia para reconstrução auricular humana (hEAR) baseada em um andaime biodegradável de policaprolactona (PCL) de grau clínico, projetado a partir de tomografia computadorizada e associado a condrócitos humanos, provenientes de cartilagem auricular ou costal, combinados a células-tronco mesenquimais derivadas de tecido adiposo. O modelo foi desenhado com regiões estruturalmente reforçadas para manter a complexa topografia auricular, além de microporos que favorecem a adesão e proliferação celular. Após a bioimpressão, os construtos foram implantados subcutaneamente em camundongos, sendo acompanhados quanto à formação e maturação da cartilagem por meio de análises quantitativas. Os resultados demonstraram a formação de neocartilagem estável e madura em até 12 semanas, evidenciando o potencial da técnica como alternativa eficaz, com melhores resultados estéticos e menor morbidade em comparação ao uso de cartilagem costal autóloga.

De maneira semelhante, Zeng J, et al. (2022) buscaram aprimorar as propriedades mecânicas de hidrogéis naturais utilizados como andaimes na engenharia de cartilagem auricular, por meio do desenvolvimento de um hidrogel de GelMA reforçado com nanocelulose bacteriana (BNC). Diferentes concentrações de BNC foram testadas quanto às propriedades mecânicas e à migração celular *in vitro*, sendo a concentração de 0,375% considerada ideal.

Os construtos bioimpressos contendo condrócitos foram posteriormente implantados em camundongos nude para avaliação *in vivo*. Os achados indicaram aumento significativo da resistência mecânica e da migração celular, além da formação de cartilagem madura, com maior módulo de elasticidade e maior conteúdo de glicosaminoglicanos. Esses resultados evidenciam que a incorporação de BNC ao GelMA contribui para a obtenção de estruturas auriculares com melhor desempenho mecânico, precisão anatômica e adequada formação de matriz cartilaginosa.

Investigando abordagens inovadoras para bioimpressão auricular, Xie X, et al. (2022) desenvolveram um *bioink* baseado em microtecidos, composto por micropartículas de matriz acelular (CAM) associadas ao GelMA, com a proposta de atuar como um *microshelter* para condrócitos.

O material foi utilizado na bioimpressão por processamento digital de luz (DLP) de estruturas auriculares com alta precisão anatômica, sendo avaliados aspectos como propriedades mecânicas, printabilidade, proliferação celular *in vitro* e regeneração cartilaginosa *in vivo*. Os resultados evidenciaram boa viabilidade celular, manutenção das propriedades físico-químicas e estímulo significativo à formação de cartilagem, destacando seu potencial como microambiente tridimensional favorável à regeneração tecidual.

Em outra abordagem, Zielinska D, et al. (2023) propuseram a integração de cartilagem auricular bioimpressa autóloga (*EarCartilage*) com um substituto cutâneo humano pigmentado e pré-vascularizado (*EarSkin*), visando superar limitações estéticas e de vascularização na reconstrução da microtia. Após implantação em ratos imunocomprometidos, observou-se rápida integração vascular em cerca de uma semana, com adequada perfusão, formação de epiderme estratificada e restauração da pigmentação. Além disso, a cartilagem apresentou boa estabilidade mecânica e maior deposição de matriz extracelular, indicando potencial da técnica para uma reconstrução auricular mais funcional e esteticamente satisfatória.

Por sua vez, Um JH, et al. (2025) desenvolveram andaimes impressos em 3D utilizando *bioink* derivado de cartilagem humana descelularizada associado à policaprolactona (PCL), com o objetivo de otimizar regeneração tecidual e estabilidade mecânica. O material demonstrou biocompatibilidade, favorecendo migração e diferenciação condrogênica celular *in vitro*.

Após implantação em coelhos, os andaimes mantiveram integridade estrutural por até um ano, com significativa neovascularização e formação de cartilagem, especialmente em formulações com maior teor de

matriz descelularizada e porosidade adequada, evidenciando seu potencial para reconstrução auricular. O **Quadro 1** apresenta, de forma resumida, os estudos incluídos na amostra final, destacando autor e ano de publicação, tipo de estudo e principais achados de cada pesquisa.

Quadro 1 - Estudos incluídos na revisão integrativa (2021–2026).

Autor/ano	Tipo de estudo	Principais achados
Landau, S, et al. (2021)	Experimental, *in vitro* + *in vivo* em camundongos.	Andaime auricular em PCL, baseado em TC, carregado com condrócitos (auriculares ou costais) + MSCs de gordura humana, formou neocartilagem estável, com maturação e estabilização em 12 semanas após implantação subcutânea em camundongos, sendo uma tecnologia simples, customizável e com potencial para melhorar estética e conforto
Xie, X, et al. (2022)	Experimental de *bioink*/bioprinting, *in vitro* + *in vivo* em camundongos.	*Bioink* de micropartículas de matriz cartilaginosa acelular + GelMA apresentou boas propriedades mecânicas, intumescimento e printabilidade; uma orelha impressa por DLP com condrócitos de microtia mostrou melhor proliferação celular *in vitro* e regeneração de cartilagem auricular *in vivo*, atuando como **"**abrigo 3D**"** que mantém viabilidade das células impressas
Zeng, J, et al. (2022)	Experimental de biomateriais, *in vitro* + *in vivo* em camundongos.	GelMA reforçado com 0,375% de BNC teve propriedades mecânicas aumentadas e maior migração celular; construtos com condrócitos formaram cartilagem madura em camundongos, com módulo de elasticidade e conteúdo de GAG maiores, resultando em orelha equivalente de forma precisa, alta mecânica e matriz cartilaginosa abundante
Zielinska, D, et al. (2023)	Experimental, substituto de pele e cartilagem bioprintada, *in vivo* em ratos.	Capilares humanos de *EarSkin* conectaram-se à vasculatura do hospedeiro em 1 semana, permitindo perfusão rápida e maturação epidérmica; a pele exibiu epiderme estratificada com queratinócitos e melanócitos na camada basal, restaurando a cor da pele, e a *EarCartilage* apresentou estabilidade mecânica favorável e maior deposição de matriz extracelular, configurando nova abordagem promissora para microtia.
Velasquillo, C, et al. (2023)	Experimental, andaime 3D + teste *in vivo* em camundongos.	O arcabouço auricular em PCL semeado com condrócitos de microtia gerou neo-tecido em forma de pavilhão e confirmou formação de cartilagem elástica (colágeno II, elastina, histologia e proteoma compatíveis com cartilagem elástica normal), configurando estrutura adequada para reconstrução autóloga.
Gvaramia, D, et al. (2024)	Experimental, *in vitro* + *in vivo* em coelhos.	Implantes com condrócitos autólogos em *bioink* HATG sofreram amolecimento acentuado, perda de GAGs e colágeno II, encapsulamento fibroso e degradação parcial, indicando forte resposta imune mesmo com células autólogas.
Um, JH, et al. (2025)	Experimental de biomaterial + andaime 3D, *in vitro* + *in vivo* em coelhos.	A descelularização removeu células, mas preservou GAGs e colágeno comparáveis à cartilagem nativa; o *bioink* não foi citotóxico e favoreceu migração e diferenciação condrogênica de células-tronco de gordura humana. Em coelhos, por 1 ano, os andaimes mantiveram integridade estrutural, com neovascularização significativa e condrogênese, especialmente com maior teor de cartilagem descelularizada e porosidade adequada

Fonte: Cardoso MCLB, et al., 2026.

DISCUSSÃO

A microtia é frequentemente associada à perda auditiva condutiva e a importantes repercussões estéticas e psicossociais (HUANG Y, et al., 2023; OTTO IA, et al., 2022). Nesse cenário, as próteses auriculares configuram-se como uma alternativa consolidada, possibilitando restauração da forma, além de bons resultados estéticos e psicossociais, especialmente em situações nas quais a reconstrução cirúrgica isolada apresenta limitações (GHAGAS SR, et al., 2025; ARIANI N, et al., 2013; WEI J, et al., 2023; ARIANI N, et al., 2013; DE CAXIAS FP, et al., 2019). Contudo, essas abordagens apresentam limitações, como necessidade de manutenção e substituições periódicas, risco de complicações associadas aos implantes, desafios relacionados à integração biológica e, em alguns casos, a estética final da peça (ARIANI N, et al., 2013;

LANZARA R, et al., 2021; CONSTANTINE et al., 2014). A reconstrução auricular constitui um dos maiores desafios da reabilitação bucomaxilofacial, em virtude da complexidade anatômica e funcional da orelha, bem como das limitações das técnicas convencionais, como o uso de enxertos autólogos de cartilagem costal, frequentemente associados à morbidade do sítio doador e a resultados estéticos variáveis (HUANG Y, et al., 2023; GVARAMIA D, et al., 2024).

Nesse cenário, a bioengenharia tecidual e a bioimpressão tridimensional (3D) emergem como alternativas promissoras, possibilitando a criação de substitutos auriculares personalizados com potencial para superar tais limitações (HUANG Y, et al., 2023; OTTO IA, et al., 2021; VELASQUILLO C, et al., 2023). A bioimpressão 3D permite a deposição precisa de células, biomateriais e fatores biológicos em arquiteturas complexas, mimetizando a estrutura da cartilagem auricular e favorecendo a regeneração tecidual funcional (LIU N, et al., 2022; JIA L, et al., 2022; ZHOU J, et al., 2023). Embora a maioria dos avanços ainda se concentre em estudos experimentais *in vitro* e em modelos animais, os dados disponíveis indicam resultados encorajadores quanto à viabilidade, integração tecidual e manutenção da morfologia ao longo do tempo (JIA L et al., 2022; XIE X, et al., 2022; VELASQUILLO C, et al., 2023; OTTO IA, et al., 2021).

Nesse contexto, a engenharia de tecidos auriculares tem avançado com o desenvolvimento de andaimes biomiméticos baseados em polímeros biodegradáveis, como policaprolactona (PCL) e ácido polilático (PLA), hidrogéis naturais, como GelMA e alginato, e matrizes extracelulares descelularizadas (HUANG Y, et al., 2023; JIA L, et al., 2022; ZHOU J, et al., 2023). Esses arcabouços podem ser associados a condrócitos autólogos ou células-tronco mesenquimais, promovendo a regeneração cartilaginosa com morfologia personalizada. A bioimpressão tridimensional possibilita a construção de estruturas auriculares complexas por meio da deposição controlada de *bioinks* contendo células vivas (IBRAHIM et al., 2024; LIU N, et al., 2022). Entretanto, um dos principais desafios consiste na obtenção de *bioinks* que associem propriedades mecânicas adequadas com elevada biocompatibilidade, sendo que materiais como ACMMA, GelMA e nanocelulose têm demonstrado resultados promissores quanto à viabilidade celular e à formação de matriz cartilaginosa (JIA L, et al., 2022; XIE X, et al., 2022; ZENG et al., 2022; ZHOU J, et al., 2023).

Modelos experimentais têm demonstrado que andaimes impressos em 3D são capazes de promover regeneração cartilaginosa funcional, com manutenção da forma anatômica por períodos prolongados após a implantação (JIA L, et al., 2022; XIE X, et al., 2022; LIU N, et al., 2022; UMM et al., 2025). Estudos clínicos iniciais também relatam resultados promissores na reconstrução auricular personalizada em pacientes com microtia, utilizando andaimes biodegradáveis associados a células autólogas (ZHOU J, et al., 2023; WEI J, et al., 2023). Nesse contexto, a integração entre engenharia tecidual avançada e bioimpressão tridimensional configura-se como uma estratégia inovadora, capaz de superar limitações estéticas e funcionais das abordagens convencionais baseadas em enxertos autólogos ou próteses sintéticas (HUANG Y, et al., 2023; OTTO IA, et al., 2021; IBRAHIM EA, et al., 2024). A possibilidade de produzir estruturas sob medida permite maior fidelidade anatômica, e, quando associada ao uso de células autólogas ou matrizes descelularizadas, favorece melhor integração biológica e menor risco imunológico (LANDAU et al., 2021; VELASQUILLO C, et al., 2023; UM et al., 2025).

Os sete estudos incluídos nesta revisão compartilham o objetivo de propor alternativas à reconstrução auricular com cartilagem costal, com foco em biomateriais, bioinks e fontes celulares mais seguras e esteticamente favoráveis. Gvaramia D, et al. (2024) avaliaram a resposta de um bioink de HATG com condrócitos autólogos em modelo imunocompetente, enquanto Velasquillo C, et al. (2023) e Landau S, et al. (2021) investigaram o uso de condrócitos de microtia ou costais em andaimes de PCL para formação de cartilagem auricular personalizada. Já Zeng J, et al. (2022), Xie X, et al. (2022) e Um JH, et al. (2025) concentraram-se na otimização de hidrogéis e scaffolds 3D, visando equilíbrio entre biocompatibilidade, propriedades mecânicas e printabilidade. Zielinska et al. (2023) ampliaram essa abordagem ao integrar um substituto cutâneo pré-vascularizado ao constructo cartilaginoso.

De modo geral, os resultados demonstram a capacidade desses sistemas em promover a formação de cartilagem madura com características elásticas ou hialinas e preservação de marcadores específicos. Destacam-se a formação de neopavilhão tridimensional com colágeno tipo II, elastina e glicosaminoglicanos

(VELASQUILLO C, et al., 2023), a maturação cartilaginosa em até 12 semanas em andaimes de PCL (LANDAU S, et al., 2022), o aprimoramento das propriedades mecânicas com nanocelulose bacteriana (ZENG J, et al., 2022), a alta viabilidade celular em bioinks de microtecidos (XIE X, et al., 2022) e a manutenção da integridade estrutural com neovascularização e condrogênese por até um ano (UM JH, et al., 2025).

Zielinska D. et al. (2023) ampliam a engenharia tecidual ao integrar cartilagem e componente cutâneo na reconstrução da microtia. Ao combinar EarCartilage com um substituto cutâneo pré-vascularizado (EarSkin), observaram rápida conexão vascular em cerca de uma semana, permitindo adequada perfusão e formação de epiderme estratificada com restauração da coloração da pele. A cartilagem bioimpressa também apresentou estabilidade mecânica e maior deposição de matriz extracelular. Esses achados sugerem que a integração entre pele e cartilagem pode superar limitações dos enxertos isolados, favorecendo melhores resultados estéticos e funcionais.

Por outro lado, os achados de Gvaramia D, et al. (2024) evidenciam limitações importantes relacionadas à resposta imunológica. Mesmo com o uso de células autólogas, foram observados processos de fibrose, degradação e resposta inflamatória significativa em modelos imunocompetentes, contrastando com os resultados favoráveis obtidos em modelos imunodeficientes. Esses dados sugerem que a aplicação dessas tecnologias na prática clínica depende não apenas da otimização das propriedades mecânicas e da fidelidade anatômica, mas também do aprimoramento da imunocompatibilidade dos *bioinks* e do controle da maturação tecidual. De forma geral, embora os estudos demonstrem a viabilidade da reconstrução auricular com adequada morfologia, propriedades mecânicas e formação de matriz cartilaginosa, ainda persistem desafios relacionados à resposta imune e à aplicabilidade em pacientes com microtia.

O presente estudo apresenta algumas limitações, incluindo a realização da busca em apenas duas bases de dados, o que pode ter resultado em uma amostra restrita de publicações e na possível exclusão de estudos relevantes. Além disso, observa-se a predominância de estudos experimentais em modelos *in vivo* em animais, evidenciando a necessidade de pesquisas clínicas que avaliem a aplicabilidade dessas tecnologias em humanos. Embora as próteses faciais representem uma alternativa consolidada na reabilitação de defeitos maxilofaciais, elas também apresentam limitações, como necessidade de manutenção periódica, desgaste dos materiais, possíveis complicações associadas à retenção e menor integração biológica (ARIANI N, et al., 2013; DE CAXIAS FP, et al., 2019; LANZARA R, et al., 2021). Nesse sentido, investigações futuras voltadas ao aprimoramento de biomateriais, *bioinks* e estratégias de bioimpressão, bem como à otimização da vascularização, integração tecidual e resposta imunológica, são essenciais para viabilizar a aplicação dessas abordagens na prática clínica, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas mais duráveis, funcionais e esteticamente satisfatórias na reconstrução auricular e, consequentemente, para a melhoria da qualidade de vida de pacientes com microtia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos analisados, pode se considerar que a engenharia tecidual associada à bioimpressão 3D apresenta grande potencial na reconstrução auricular, permitindo a obtenção de estruturas personalizadas com adequada forma, propriedades mecânicas e formação de cartilagem funcional. No entanto, desafios como vascularização, resposta imunológica e estabilidade a longo prazo ainda limitam sua aplicação clínica, além da escassez de estudos em humanos. Embora as próteses auriculares permaneçam como alternativa eficaz, suas limitações reforçam a necessidade de avanços nessa área. Assim, são necessários mais estudos para otimizar biomateriais e técnicas, visando ampliar a aplicação clínica e viabilizar bons resultados em pacientes com microtia.

REFERÊNCIAS

1. ARIANI N, et al. Current status of craniofacial prosthetic rehabilitation. *The International Journal of Prosthodontics*. 2013; 26(1): 57–67.

2. DE CAXIAS FP, et al. Classification, history, and future prospects of maxillofacial prostheses. *International Journal of Dentistry*. 2019; 2019: 1–7.
3. DUBEY SG, et al. Materials in maxillofacial prosthetics: a review. *Journal of Evolution of Medical and Dental Sciences*. 2020; 9(44): 3319–3324.
4. GHAGAS SR, et al. Functional outcomes and quality of life after prosthetic rehabilitation in patients with maxillofacial defects: a systematic review. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. 2025.
5. GVARAMIA D, et al. Evaluation of autologous bioprinted cartilage grafts in an immunocompetent rabbit model. *Advanced Therapeutics*. 2024; 7(6): 2300441.
6. HUANG Y, et al. Application and progress of tissue engineering and biomaterial scaffolds for total auricular reconstruction in microtia. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023; 11: 1089031.
7. IBRAHIM EA, et al. Scoping review on the potential of three-dimensional bioprinting in auricular cartilage regeneration. *SRM Journal of Research in Dental Sciences*. 2024; 15(3): 111–120.
8. JIA L, et al. Bioprinting and auricular cartilage regeneration using a microporous photocrosslinkable acellular cartilage matrix-based bioactive bioink. *Bioactive Materials*. 2022; 16: 66–81.
9. LANDAU S, et al. Human engineered auricular reconstruction (hEAR) using 3D-printed molds with human auricular and costal chondrocytes and adipose-derived mesenchymal stem cells. *Biofabrication*. 2022; 14(1): 015010.
10. LANZARA R, et al. Maxillofacial prosthetic materials: current status and recent advances: a comprehensive review. *International Journal of Applied Dental Sciences*. 2021; 7(2): 255–259.
11. LIU N, et al. 3D bioprinted scaffolds for tissue repair and regeneration. *Frontiers in Materials*. 2022; 9: 925321.
12. OTTO IA, et al. Biofabrication of a shape-stable auricular structure for ear deformity reconstruction. *Materials Today Bio*. 2021; 9: 100094.
13. OTTO IA, et al. Adult, pediatric, and microtia auricular cartilage contains fibronectin-adherent progenitor cells with potential for regenerative ear reconstruction. *iScience*. 2022; 25(9): 104979.
14. SALAH M, et al. Three-dimensional bioprinting and bone tissue engineering: technical innovations and potential applications in maxillofacial reconstructive surgery. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery*. 2020; 42(1): 18.
15. UM JH, et al. 3D-printed scaffolds for ear reconstruction using decellularized human cartilage-derived bioink and polycaprolactone. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2025; 11(5): 2834–2845.
16. VELASQUILLO C, et al. Residual microtia tissue as a cell source for 3D bioprinted elastic cartilage constructs: potential use in surgical microtia reconstruction. *Cell and Tissue Banking*. 2023; 25(2): 571–582.
17. WEI J, et al. Bioengineered human tissue regeneration and repair using endogenous stem cells. *Cell Reports Medicine*. 2023; 4(8): 101156.
18. XIE X, et al. Microtissue-based bioink as a chondrocyte microshelter for DLP bioprinting. *Advanced Healthcare Materials*. 2022; 11(22): 2201877.
19. ZENG J, et al. Bacterial nanocellulose-reinforced gelatin methacryloyl hydrogel improves biomechanical properties and glycosaminoglycan content of 3D bioprinted cartilage. *International Journal of Bioprinting*. 2022; 9(1): 631.
20. ZHOU J, et al. Recent advances in 3D bioprinted cartilage-mimicking constructs for tissue engineering applications. *Materials Today Bio*. 2023; 23: 100870.
21. ZIELINSKA D, et al. Combining bioengineered human skin with bioprinted cartilage for ear reconstruction. *Science Advances*. 2023; 40: eadh1890.