

Análise do comportamento mecânico da fixação do enxerto suíno em um bloco de poliuretano usando um parafuso de interferência PLA impresso em 3D*

Analysis of the Mechanical Behavior of Porcine Graft Fixation in a Polyurethane Block Using a 3D-printed PLA Interference Screw

Juliana Pereira de Oliveira¹ André Luigui Bezerra Santos¹ Camilo Partezani Helito²
Rodrigo Nogueira de Codes¹ Lana Lacerda de Lima³ Diego Ariel de Lima³

¹Engenheiro, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, RN, Brasil

²Ortopedista e Traumatologista, Departamento de ortopedia e Traumatologia, Instituto de Ortopedia e Traumatologia do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

³Médico, Departamento de Ciências da Saúde, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, RN, Brasil,

Endereço para correspondência Diego Ariel de Lima, MD, PhD, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rua Francisco Mota, 572, Pres. Costa e Silva, Mossoró, RN, 59625-900, Brasil (e-mail: arieldelima.diego@gmail.com).

Rev Bras Ortop 2023;58(4):e604–e610.

Resumo

Objetivo O interesse em utilizar a impressão 3D na área da saúde tem crescido ao longo dos anos, dadas as suas vantagens e o seu potencial na rápida fabricação de dispositivos e implantes personalizados com geometrias complexas. Assim, o objetivo do presente estudo foi comparar o comportamento de fixação mecânica de um parafuso de interferência impresso em 3D, produzido pela modelagem fundida de deposição do filamento de ácido polilático (PLA), com o de um parafuso de interferência de titânio.

Métodos Oito tendões suínos flexores profundos, de aproximadamente 8 mm de largura e 9 cm de comprimento, foram utilizados como enxerto e fixados em um bloco de poliuretano de 40 PCF em cada uma de suas extremidades. Um grupo foi fixado apenas com parafusos de interferência de titânio (grupo 1) e o outro apenas com parafusos PLA impressos em 3D (BR 20 2021 018283-6 U2) (grupo 2). Os testes foram realizados utilizando uma máquina de teste universal eletromecânica EMIC DL 10.000 no modo de tração axial.

Palavras-chave

- ▶ parafusos ósseos
- ▶ ácido láctico
- ▶ impressão tridimensional

* Trabalho desenvolvido na UFRSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil.

recebido
24 de Julho de 2022
aceito
18 de Outubro de 2022

DOI <https://doi.org/10.1055/s-0043-1768620>.
ISSN 0102-3616.

© 2023. Sociedade Brasileira de Ortopedia e Traumatologia. All rights reserved.

This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution-NonDerivative-NonCommercial-License, permitting copying and reproduction so long as the original work is given appropriate credit. Contents may not be used for commercial purposes, or adapted, remixed, transformed or built upon. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Thieme Revinter Publicações Ltda., Rua do Matoso 170, Rio de Janeiro, RJ, CEP 20270-135, Brazil

Resultados O grupo 1 (titânio) obteve força máxima de 200 ± 7 N com deformação média do enxerto de 8 ± 2 mm, e a força máxima do grupo 2 (PLA) foi de 300 ± 30 N e deformação média do enxerto de 7 ± 3 mm. Ambos os parafusos de titânio e PLA forneceram boa fixação de enxerto no bloco de poliuretano, sem deslizamento ou deformação aparente. Em todas as amostras o teste culminou na ruptura do enxerto, com cerca de 20 mm de deformação em relação ao comprimento inicial.

Conclusão O parafuso PLA impresso em 3D proporcionou boa fixação, semelhante à de sua contraparte de titânio, produzindo resultados satisfatórios e promissores.

Abstract

Objective The interest in using 3D printing in the healthcare field has grown over the years, given its advantages and potential in the rapid manufacturing of personalized devices and implants with complex geometries. Thus, the aim of the present study was to compare the mechanical fixation behavior of a 3D-printed interference screw, produced by fused deposition modeling of polylactic acid (PLA) filament, with that of a titanium interference screw.

Methods Eight deep flexor porcine tendons, approximately 8 mm wide and 9 cm long, were used as graft and fixed to a 40 pounds-per-cubic-foot (PCF) polyurethane block at each of its extremities. One group was fixed only with titanium interference screws (group 1) and the other only with 3D-printed PLA screws (BR 20 2021 018283-6 U2) (group 2). The tests were conducted using an EMIC DL 10000 electromechanical universal testing machine in axial traction mode.

Results Group 1 (titanium) obtained peak force of 200 ± 7 N, with mean graft deformation of 8 ± 2 mm, and group 2 (PLA) obtained peak force of 300 ± 30 N, and mean graft deformation of 7 ± 3 mm. Both the titanium and PLA screws provided good graft fixation in the polyurethane block, with no slippage or apparent deformation. In all the samples, the test culminated in graft rupture, with around 20 mm of deformation in relation to the initial length.

Conclusion The 3D-printed PLA screw provided good fixation, similar to that of its titanium counterpart, producing satisfactory and promising results.

Keywords

- ▶ bone screws
- ▶ lactic acid
- ▶ printing, three-dimensional

Introdução

A reconstrução do ligamento do joelho, especialmente do ligamento cruzado anterior (LCA), está entre as cirurgias ortopédicas mais realizadas. Normalmente, esses ligamentos não são elegíveis para a sutura primária, exigindo a substituição do ligamento lesionado por um enxerto. Como tal, o tipo de enxerto e métodos de fixação têm sido extensivamente estudados.¹

Há uma ampla gama de materiais disponíveis para fixar esses enxertos, com uma diferença significativa nas técnicas e custos de cirurgia. Na cirurgia, os parafusos de interferência são uma opção amplamente utilizada e aceita,²⁻⁴ mas seu custo continua sendo um obstáculo considerável. Quando as políticas públicas de saúde são propostas, particularmente em países com poucos recursos de saúde, o custo dos materiais cirúrgicos ainda é um fator decisivo na sua seleção.⁵

A prototipagem rápida ou impressão 3D envolve um conjunto de tecnologias destinadas a construir protótipos físicos a partir de seus análogos virtuais. O interesse em utilizar a impressão 3D na área da saúde tem aumentado ao longo dos anos, dadas suas vantagens e potencial na rápida

produção de dispositivos e implantes personalizados com geometrias complexas. Com um aumento na impressão 3D, os custos operacionais diminuem, tornando essa tecnologia e seus produtos mais acessíveis.⁶

O ácido polilático (PLA) apresenta propriedades atraentes para uso biomédico devido à sua biocompatibilidade. O PLA é biodegradável, pois pode ser desintegrado por agentes biológicos, e bioabsorvável, pois o produto de sua degradação participa do processo metabólico do corpo humano. Entre as técnicas de fabricação utilizadas para peças PLA voltadas para aplicações biomédicas, a impressão 3D é uma das mais promissoras, principalmente pela possibilidade de produção de peças personalizadas e individualizadas, além de prototipagem detalhada e custos mais baixos, o que as tornaria mais acessíveis, como parafusos de interferência PLA impressos em 3D.^{6,7}

Assim, o objetivo do presente estudo foi comparar o comportamento de fixação mecânica de um parafuso de interferência impresso em 3D, produzido por modelagem fundida de deposição de filamento PLA, com o de um parafuso de interferência de titânio.

Material e métodos

Fabricação de parafusos de interferência impressos em 3D

Um parafuso de interferência foi criado, semelhante a um parafuso de potência trapezoidal com rosca trapezoidal, com uma cavidade hexagonal cônica interna. Depois da modelagem 3D (.stl / Autodesk Fusion 360), um modelo 3D virtual foi criado, utilizando o software Ultimaker Cura, responsável pelas configurações do cortador de impressora e análise de parâmetros, no qual é possível obter antecipadamente uma amostra da peça impressa e mapear todo o seu processo de desenvolvimento.

O parafuso foi impresso em 3D (3DMax A1v2) usando o método de deposição de fusão (FDM) de filamento PLA, um termoplástico biodegradável natural de fontes renováveis. A presente solução está em conformidade com diretrizes biomateriais, como a ABNT NBR 15998 e 15743-7. O parafuso impresso (→Fig. 1), objeto de estudo, foi produzido de acordo com o modelo utilitário BR 20 2021 018283-6 U2, medindo 30 mm de comprimento, 9 mm de largura, com um passo de rosca de 2 mm, e os seguintes parâmetros foram utilizados na impressão:

- Temperatura da mesa: 60 °C.
- Temperatura do bocal: 200 °C.
- Velocidade de impressão: 50 mm/s.
- Altura da camada: 0,16 mm.
- Enchimento: 100%.
- Arranjo de fibras: concêntrico.
- O filamento PLA foi utilizado com as seguintes características: branco, diâmetro médio de 1,75 mm e 3,03 gramas/metro.

Bloco de poliuretano

Para a elaboração das amostras de teste, foi realizada uma cirurgia simulada, na qual foi aberto um buraco no bloco de poliuretano, representando o “túnel ósseo”, permitindo a inserção do enxerto e a fixação com o parafuso de interferência, como ocorreria na prática.

De acordo com a ABNT NBR 15678:2020, que regula o material padrão para o teste mecânico de implantes e instrumentos ortopédicos, foi aplicada espuma de poliuretano unicelular rígida com as seguintes características:

- Dimensões: 100 mm x 100 mm x 30 mm.
- Cor: marrom.
- Densidade: 40 PCF – 0,96 g/cm³.
- Buraco/túnel: 9 mm de diâmetro no eixo central da superfície de 100 mm x 100 mm, sobre toda a altura do bloco (30 mm).

Enxerto

Da forma parecida com a descrita no estudo biomecânico de Moré et al.,⁸ usamos pernas de porco Landrace recentemente congeladas nos experimentos. Os tendões foram coletados em um matadouro. Oito pernas foram armazenadas a -20 °C e descongeladas 12 horas antes do teste. Cada tíbia foi dissecada e o tendão flexor profundo, de aproximadamente 8 mm de largura e 9 cm de comprimento, foi extraído para uso como enxerto.

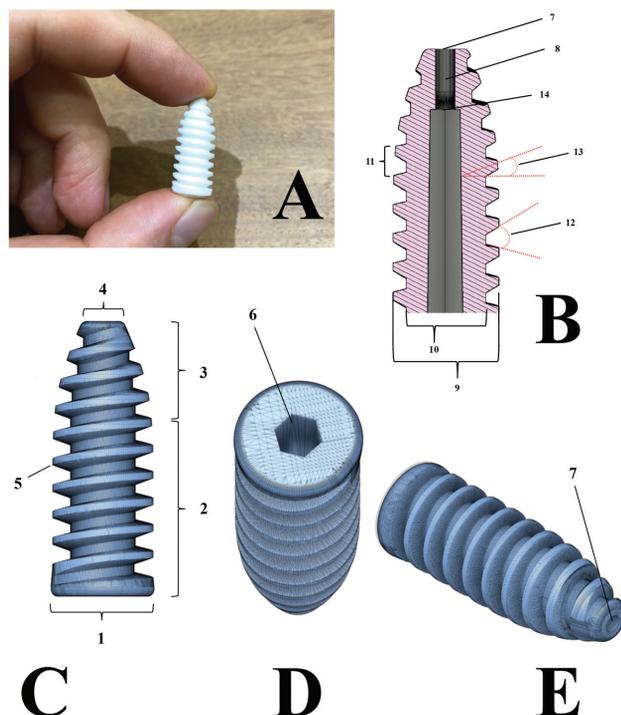


Fig. 1 A Parafuso de interferência PLA impresso em 3D, produzido de acordo com o modelo utilitário BR 20 2021 018283-6 U2. B Seção no plano coronal em relação ao eixo principal do parafuso de interferência em uma visão de perfil. C Visualização do perfil do parafuso de interferência. D Visão inferior oblíqua do parafuso de interferência. E Visão superior oblíqua do parafuso de interferência. 1. Base de parafusos circulares; 2. Zona paralela, de mesmo diâmetro, correspondente ao 2/3 proximal do comprimento do parafuso; 3. Zona cônica, correspondente ao 1/3 distal do comprimento do parafuso; 4. Ápice de parafuso; 5. Rosca externa em forma trapezoidal, semelhante a um parafuso de potência; 6. Cavidade interna cônica hexagonal, centrada no eixo longo, com comprimento correspondente aos 80% proximais do comprimento total do parafuso, para a montagem da chave; Cavidade interna cilíndrica de 1,5 mm de diâmetro; 8. Cavidade interna cilíndrica, com comprimento correspondente ao comprimento distal de 20% do comprimento total do parafuso, centrada no eixo longo, que se comunica com a cavidade interna cônica hexagonal (6), permitindo a passagem de um fio-guia por toda a extensão interna do parafuso; 9. Maior diâmetro da rosca do parafuso corresponde à largura do parafuso em seu proximal 2/3; 10. O diâmetro da rosca menor (10) equivale a 2/3 do diâmetro do parafuso principal (9); 11. Rosca, correspondente a 1/3 do diâmetro menor da rosca do parafuso (10); Ângulo de rosca de 12. 30°; 13. Ângulo de alimentação de rosca de 6,5°; 14. Região mais distal da cavidade interna cônica hexagonal.

Preparação da amostra

As amostras foram divididas em dois grupos (→Fig. 2):

- (Grupo 1) grupo controle: o enxerto foi fixado nas extremidades dos blocos de poliuretano com parafusos de interferência metálica de 30 mm de comprimento e 9 mm de largura, feitos de liga de titânio ASTM F136 (Traumédica Ltda., Campinas, SP, Brazil);
- (Grupo 2) grupo PLA: o enxerto foi fixado nas extremidades dos blocos de poliuretano com parafusos impressos em 30 mm de comprimento e 9 mm de largura.

O comprimento médio do enxerto foi de 9 cm, 3 cm dentro de cada bloco e 3 cm “livre” entre os blocos. Os procedimentos

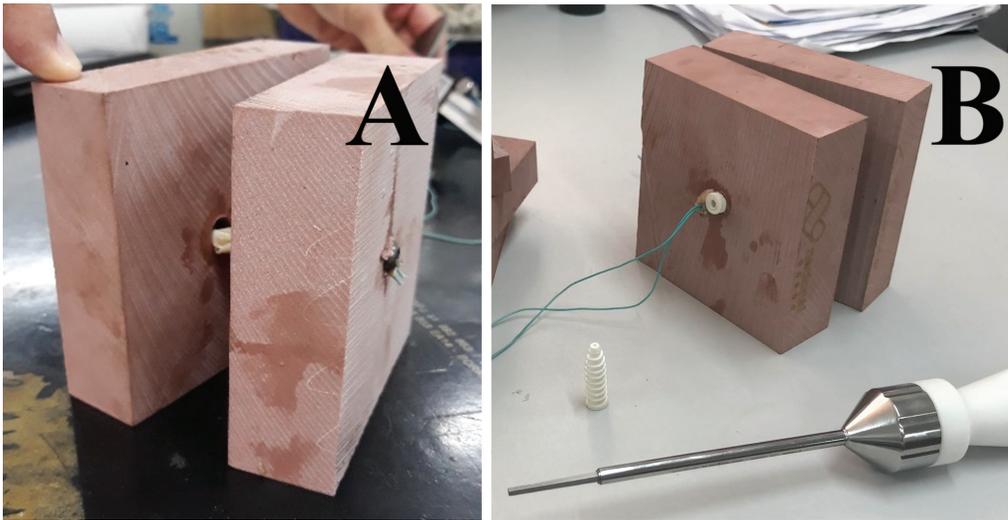


Fig. 2 As amostras. A - (Grupo 1) grupo controle: o enxerto foi fixado nas extremidades dos blocos de poliuretano com parafusos de interferência metálica de 30 mm de comprimento e 9 mm de largura, feitos de liga de titânio ASTM F136 (Traumédica); B - (Grupo 2) PLA: o enxerto foi fixado nas extremidades dos blocos de poliuretano com parafusos impressos em 30 mm de comprimento e 9 mm de largura.

de fixação foram realizados por um cirurgião ortopédico treinado. Todos os blocos de poliuretano continham um túnel de 9 mm de comprimento, feito pelo cirurgião no qual um enxerto de 8 mm foi inserido. Este procedimento criou um espaço de 1 mm entre o enxerto e a parede do túnel. O parafuso foi implantado com o auxílio de um fio Kirschner para evitar divergências e falsa trajetória. Ao final, as amostras de teste exibiram a seguinte configuração: parafuso – bloco – enxerto – bloco – parafuso (► Fig. 3).

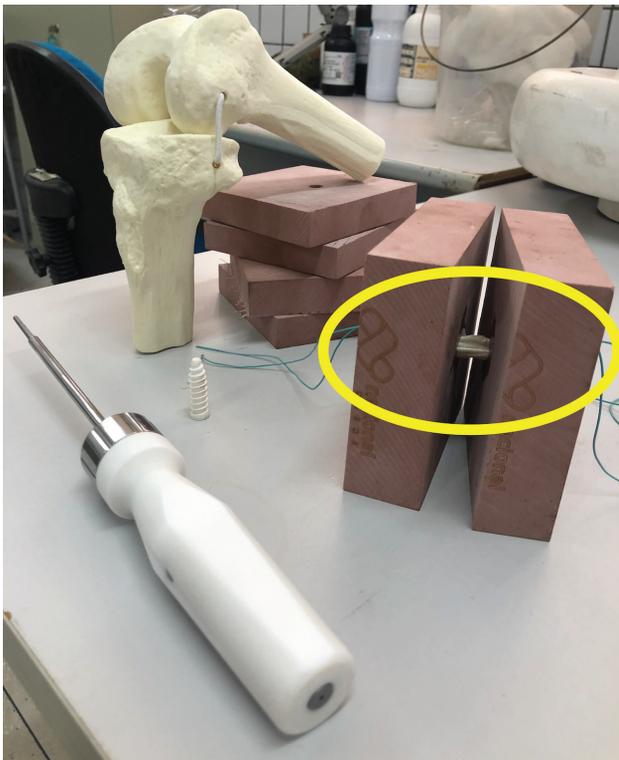


Fig. 3 As amostras de teste exibiram a seguinte configuração (círculo amarelo): parafuso – bloco – enxerto – bloco – parafuso.

Realização dos testes

Os testes foram realizados em uma máquina de teste universal eletromecânica EMIC DL 10000, utilizando sua tração axial para determinar a eficiência da fixação do enxerto com parafusos de interferência, e um computador para registrar os dados obtidos.

Nos testes, o comprimento experimental da amostra foi correlacionado por deformação (mm) em relação ao tempo (segundos), estipulado como $10 \text{ mm}^{-2}/\text{s}$, com tração aplicada até a ruptura do enxerto ou deslizamento do conjunto parafuso/enxerto. O aparelho montado na máquina de teste é mostrado na ► Figura 4.

Metodologia e análise de dados

As variáveis categóricas e numéricas foram tabuladas e analisadas usando o software Rr Mac OS X GUI 1.73 (7892 Catalina build). Análises com intervalo de confiança de 95% e valor de $p < 0,05$ foram consideradas estatisticamente significativos.

Resultados

Os dados obtidos nos testes foram o tempo, a deformação (mm) e a força (N) aos quais a amostra foi submetida. Com esses dados, foram feitos gráficos da razão Força (N)/deformação (mm) sofrida pela amostra fixada com o parafuso de titânio e com o parafuso PLA (► Fig. 5).

As amostras em que o enxerto foi fixado em suas extremidades com parafusos de interferência de titânio obtiveram força máxima de $200 \pm 7 \text{ N}$, em deformação média do enxerto de $8 \pm 2 \text{ mm}$. Com o aumento da deformação, a força diminuiu até que o enxerto se rompeu, com cerca de $20 \pm 1 \text{ mm}$ de deformação em relação ao comprimento inicial. O parafuso de titânio proporcionou boa fixação de enxerto no bloco de poliuretano, sem deslizamento ou deformação aparente. Em todas as amostras, o teste culminou na ruptura do enxerto.



Fig. 4 A amostra (parafuso – bloco – enxerto – bloco – parafuso) na máquina de teste (emic DL 10000 máquina de teste universal eletromecânica).

As amostras em que o enxerto foi fixado em suas extremidades com parafusos de interferência PLA obtiveram força máxima de 300 ± 30 N, em deformação média de 7 ± 3 mm. O aumento da deformação causou um declínio na força até que o enxerto se rompeu, com cerca de 19 ± 2 mm de deformação em relação ao comprimento inicial. O parafuso PLA também apresentou boa fixação no bloco de poliuretano, sem deslizamento ou deformação aparente. Em todas as amostras, o teste culminou na ruptura do enxerto.

Discussão

O principal achado do presente estudo foi demonstrar que a fixação do parafuso PLA é semelhante à do parafuso de titânio, com pico de força máxima e deformação do enxerto semelhantes, excedendo, assim, a força do enxerto.

Durante os testes, tanto os parafusos de controle quanto os de PLA apresentaram boa fixação do enxerto de bloco, sem sinal de deslizamento até o final dos testes, com a força do enxerto sendo responsável pela interrupção dos testes. No entanto, os resultados obtidos não são suficientes para recomendar o uso do atual protótipo PLA para reconstrução do ligamento humano.

A força máxima de tração do LCA nativo é de aproximadamente 1.725 ± 270 N, menor do que o pico que ocorre durante atividades atléticas vigorosas.⁹ Idealmente, um enxerto utilizado para a cirurgia de reconstrução do LCA

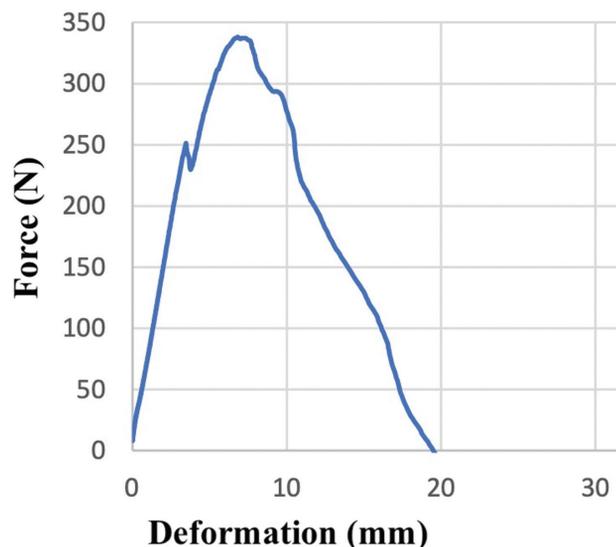


Fig. 5 Gráfico da relação força (N)/deformação (mm) sofrida pela amostra número 1 fixada com o parafuso PLA.

deve, tanto quanto possível, recriar as propriedades anatômicas e biomecânicas do ligamento nativo, o que garante fixação segura e rápida integração biológica, diminuindo o tempo de recuperação e reduzindo a morbidade do local do doador.¹⁰ Vários enxertos estão disponíveis para reconstrução do LCA, incluindo autoenxertos (osso do tendão patelar ósseo [BPTB], isquiotibiais [HS] etc.), aloenxertos e enxertos sintéticos.¹¹ O enxerto HS apresenta falha com uma carga média de 2.422 N quando comparado com 1.785 N para o enxerto BPTB.¹² Em outras palavras, não excedemos a carga necessária para a falha de um enxerto humano no presente estudo.

Moré et al.⁸ realizaram um estudo biomecânico com um modelo suíno, utilizando um modelo profundo de tendão flexor de porco Landrace como enxerto. Esses enxertos foram, então, fixados na tíbia por 10 parafusos de interferência bioabsorvíveis (9×20 mm PLLA 70/30, Linvatec) e 10 parafusos de interferência metálica (Hexagon de 9×20 mm). O teste de carga-a-falha de ciclo único mostrou que a carga de ruptura não foi significativamente diferente entre os 2 tipos de parafusos ($607,11 \pm 97,49$ N e $628,41 \pm 234,93$ N para parafusos bioabsorvíveis e metálicos, respectivamente).⁸

Weiler et al.¹³ compararam os tendões flexores como enxertos e observaram comportamento diferente entre parafusos metálicos e bioabsorbáveis, com carga até a falha de 507 N para o parafuso bioabsorvível e 419 N para sua contrapartida metálica. Os valores relatados por Weiler et al.¹³ foram mais próximos dos do presente estudo.

Usando impressão 3D, Liu et al.⁷ produziram um parafuso PLA poroso ortogonal bem-definido, posteriormente revestido com hidroxiapatita (HA) para melhorar sua osteocondutividade e carregado com células-tronco mesenquimais (MSCs). Este parafuso foi avaliado por testes *in vitro* e *in vivo*, em modelos de LCA de coelho. Este modelo apresentou crescimento ósseo significativo e formação de interface osso-enxerto dentro do túnel ósseo, demonstrando que a

fabricação de implantes cirúrgicos impressos em 3D pode ser viável, eficaz e econômica.

Após imergir um componente PLA em uma solução salina tamponada com fosfato, Medeiros¹⁴ avaliou as mudanças em suas propriedades mecânicas, vida útil da fadiga e alterações químicas para aplicações biomédicas produzidas pela impressão 3D. Medeiros¹⁴ concluiu que o PLA impresso apresentava propriedades relevantes de degradação hidrolítica como biomaterial, apresentando declínio na vida de fadiga e erosão granular devido à degradação. Isso permite que sua aplicação libere medicamentos e implantes, como membranas celulares condutoras na engenharia de tecidos, mas mais estudos sobre degradação enzimática e testes celulares são necessários para confirmação da eficácia desse biomaterial.

Feltz et al.¹⁵ estudaram as propriedades mecânicas de placas tubulares impressas em 3D, um terço parafusos corticais, concluindo que as impressoras 3D podem imprimir materiais biocompatíveis para replicar projetos de implantes cirúrgicos de baixo custo. No entanto, materiais e estruturas atuais não se assemelham às propriedades dos implantes de aço inoxidável.

Carvalho et al.¹⁶ estudaram a biocompatibilidade e a biodegradação do PLA, implantando o material no tecido celular subcutâneo na superfície lateral dos pescoços dos cavalos, e concluíram que o PLA é biocompatível e biodegradável, com potencial uso na medicina equina.

Kamiya et al.¹⁷ mediram o desempenho financeiro-ambiental das peças PLA utilizando modelagem de deposição de fusão. Esses autores concluíram que as peças PLA impressas em 3D têm baixo impacto ambiental e bom desempenho econômico, demonstrando a usabilidade biomédica e comercial das peças PLA impressas em 3D.

Goes Filho¹⁸ produziu e avaliou biomecanicamente implantes ortopédicos para fixação de fratura em PLA (placas e parafusos), utilizando deposição de camada de polímero fundido impressa em 3D para posterior aplicação experimental no fêmur do coelho. Em um teste de dobra de 4 pontos, a placa de 6 buracos obteve valores de 748 ± 62 N, enquanto a placa de bloqueio de 4 buracos, obteve 374 ± 29 N. O parafuso foi submetido ao teste de capacidade de retirada em espuma de poliuretano que simula osso cortical, obtendo um valor médio de 33 ± 6 N. A placa anatomicamente otimizada obteve 662 ± 220 N no teste de dobra e 193 ± 20 N após irradiada com 40 KGy. Do ponto de vista da resistência mecânica ao teste de curva, Goes Filho¹⁸ mostrou a viabilidade da produção de implantes ortopédicos para fraturas que receberam pouca carga mecânica, embora sejam necessários estudos *in vivo* para confirmar a eficácia da técnica de produção e do material utilizado. Esses achados foram semelhantes aos relatados por Lough et al.,¹⁹ Tappa et al.²⁰ e MacLeod et al.²¹

A dependência esperada da biomecânica de fixação do enxerto no design da rosca geralmente difere entre parafusos polímeros e metálicos. Essas diferenças geralmente envolvem um desempenho de fixação distinto, o que não foi observado nos testes. Assim, muitos outros aspectos mecânicos e triológicos desempenham claramente papéis

importantes nas interfaces, excluindo explicações simples para diferentes comportamentos de fixação.

No entanto, a principal limitação do presente estudo foi o enxerto selecionado para os testes. Usamos tecido animal como enxerto devido à sua fácil aquisição, mas um enxerto suíno não é tão forte quanto sua contraparte humana jovem. Como tal, não pudemos testar a força do complexo parafuso-poliuretano-enxerto. No entanto, a metodologia utilizada é um modelo útil para futuras pesquisas. Apesar dessas limitações, nossos resultados corroboram os relatados por estudos semelhantes. Em geral, os achados obtidos indicam que ambos os tipos de parafusos de interferência apresentam desempenho biomecânico semelhante em cargas baixas. No entanto, mais pesquisas são necessárias para determinar a relevância clínica desses achados.

Conclusão

O parafuso PLA impresso em 3D proporcionou boa fixação, semelhante à de sua contraparte de titânio, produzindo resultados satisfatórios e promissores.

Suporte Financeiro

O presente estudo não recebeu nenhum apoio financeiro de qualquer fonte pública, comercial ou sem fins lucrativos.

Conflito de interesses

Os autores não têm conflito de interesses para declarar.

Referências

- Danieli MV, Padovani CR. Comparação entre parafuso de interferência e transcondilar na reconstrução do LCA. *Acta Ortop Bras* 2011;19(06):338–341
- Harilainen A, Linko E, Sandelin J. Randomized prospective study of ACL reconstruction with interference screw fixation in patellar tendon autografts versus femoral metal plate suspension and tibial post fixation in hamstring tendon autografts: 5-year clinical and radiological follow-up results. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14(06):517–528
- Lemos MJ, Albert J, Simon T, Jackson DW. Radiographic analysis of femoral interference screw placement during ACL reconstruction: endoscopic versus open technique. *Arthroscopy* 1993;9(02):154–158
- Diego AL, Stemberg Martins V, Dias LJA, et al. Anatomic Outside-In Reconstruction of the Anterior Cruciate Ligament Using Femoral Fixation with Metallic Interference Screw and Surgical Staples (Agrafe) in the Tibia: An Effective Low-Cost Technique. *Open Orthop J* 2017;11:1154–1164
- Zeng C, Lei G, Gao S, Luo W. Methods and devices for graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction. *Cochrane Database Syst Rev* 2018;2018(06):CD010730
- Ejnisman L, Helito CP, Camargo AFF, Rocha BA, Baptista AM, Camargo OP. Three-dimensional printing in orthopedics: where we stand and where we are heading. *Acta Ortop Bras* 2021;29(04):223–227
- Liu A, Xue GH, Sun M, et al. 3D Printing Surgical Implants at the clinic: A Experimental Study on Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Sci Rep* 2016;6:21704
- Moré ADO, Pizzolatti ALA, Fancello EA, Salmoria GV, Roesler CRM. Graft tendon slippage with metallic and bioabsorbable

- interference screws under cyclic load: A biomechanical study in a porcine model. *Rev Bras Eng Bioméd* 2015;31(01):56–61
- 9 Scott WN, Insall JN. *Surgery of the knee*. New York, NY: Churchill Livingstone Elsevier; 2006
 - 10 Cerulli G, Placella G, Sebastiani E, Tei MM, Speziali A, Manfreda F. ACL Reconstruction: Choosing the Graft. *Joints* 2013;1(01):18–24
 - 11 Dhammi IK, , Rehan-Ul-Haq, Kumar S. Graft choices for anterior cruciate ligament reconstruction. *Indian J Orthop* 2015;49(02):127–128
 - 12 Dheerendra SK, Khan WS, Singhal R, Shivarathre DG, Pydisetty R, Johnstone D. Anterior cruciate ligament graft choices: a review of current concepts. *Open Orthop J* 2012;6:281–286
 - 13 Weiler A, Hoffmann RF, Stähelin AC, Bail HJ, Siepe CJ, Südkamp NP. Hamstring tendon fixation using interference screws: a biomechanical study in calf tibial bone. *Arthroscopy* 1998;14(01):29–37
 - 14 Medeiros CBS. Avaliação de peças de poli (ácido lático)(PLA) impressas para aplicações biomédicas [dissertação]. Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2018
 - 15 Feltz KP, MacFadden LN, Gieg SD, Lough CP, Bezold WA, Skelley NWM. Mechanical properties of 3D-printed orthopedic one-third tubular plates and cortical screws. *J 3D Print Med* 2022. Available from: <https://www.futuremedicine.com/doi/abs/10.2217/3dp-2022-0007>
 - 16 Carvalho JRG, Conde G, Antonioli ML, et al. Biocompatibility and biodegradation of poly(lactic acid) (PLA) and an immiscible PLA/poly(ϵ -caprolactone) (PCL) blend compatibilized by poly(ϵ -caprolactone-*b*-tetrahydrofuran) implanted in horses. *Polym J* 2020;52:629–643
 - 17 Kamiya TY, Maceno MMC, Kleina M. Methodology of Environmental and Financial Performance Evaluation in 3D Printing. In: *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*; 2021. doi:10.1007/978-3-030-69695-5_2. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-69695-5?noAccess=true#toc>
 - 18 Goes Filho PRS. *Confecção e avaliação mecânica de implantes ortopédicos produzidos em poli (L-ácido lático) (PLLA) por impressoras 3D [dissertação]*. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco; 2016
 - 19 Corrigendum to. Corrigendum to “Mechanical Comparison of 3D-Printed Plates and Screws for Open Reduction and Internal Fixation of Fractures”. *Orthop J Sports Med* 2022;10(05):23259671221103840
 - 20 Tappa K, Jammalamadaka U, Weisman JA, et al. 3D Printing Custom Bioactive and Absorbable Surgical Screws, Pins, and Bone Plates for Localized Drug Delivery. *J Funct Biomater* 2019;10(02):17
 - 21 MacLeod A, Patterson M, MacTear K, Gill HS. 3D printed locking osteosynthesis screw threads have comparable strength to machined or hand-tapped screw threads. *J Orthop Res* 2020;38(07):1559–1565