



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ENXERTOS SUÍNOS FIXADOS COM PARAFUSOS DE INTERFERÊNCIA FABRICADOS EM PLA EM IMPRESSORA 3D POR MEIO DE ENSAIOS DE TRAÇÃO DE MONTAGEM REPRESENTANDO A CIRURGIA DE RECONSTRUÇÃO DO LCA.

Anderson Ramon Santos Vitorino de Oliveira^[0000-0001-9761-0160], Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), ramoncpp084@gmail.com

Juliana Pereira de Oliveira^[0000-0003-3998-1013], Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), juuholiveira456@gmail.com

Macleanne Ferreira Leite Monteiro^[0000-0002-0193-357X], Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), macleanne.34@gmail.com

Rodrigo Nogueira de Codes^[0000-0003-4600-2266], Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), rncodes@ufersa.edu.br

Diego Ariel de Lima^[0000-0002-5702-1529], Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), diego.lima@ufersa.edu.br

Lana Lacerda de Lima^[0000-0001-5869-9174], Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), lanapotiguar@gmail.com

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo do filamento PLA (Ácido Polilático), um polímero bioabsorvível, como material para a impressão 3D de parafusos de interferência utilizados em cirurgias ortopédicas, como a reconstrução do ligamento cruzado anterior. Em tais procedimentos cirúrgicos, são comumente utilizados parafusos bioabsorvíveis ou metálicos, geralmente à base de titânio. Com isso, o objetivo foi de realizar ensaios mecânicos em uma representação cirúrgica da reconstrução do ligamento cruzado anterior de joelho suíno, além de realizar uma análise comparativa entre o comportamento do enxerto com a fixação por meio de parafusos de PLA, impressos em 3D, e parafusos de Titânio, como amostra controle. Para a montagem do ensaio foram necessárias duas morsas, com intuito de fixação do osso suíno sem escorregamento. Como resultados, observou-se que ambos os parafusos fixaram o enxerto no túnel ósseo dos joelhos suínos sem escorregamento, de forma satisfatória e sem aparente danificação dos parafusos.

Palavras chave: PLA (Ácido Polilático). Parafuso de Interferência. Impressora 3D. Ligamento Cruzado Anterior.

1. INTRODUÇÃO

A criação de Impressoras 3D foi uma das maiores inovações tecnológicas dos últimos tempos e sua capacidade de criação de objetos tridimensionais vem sendo, constantemente, estudada e aprimorada por pesquisadores e estudiosos. A impressão 3D, criada em 1984 por Chuck Hull, foi inventada inicialmente para aplicar camadas finas de plásticos sobre mesas e móveis. Entretanto, hoje já existem estudos que trabalham com a criação e impressão de objetos tridimensionais para auxílio na área da medicina, onde há a confecção de hastes, placas auxiliares e parafusos (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021).

Aliado à impressão 3D, o filamento de ácido polilático (PLA), que se trata de um polímero biodegradável, passou também a ser estudado como um material usável nesses processos. Seus benefícios para essa prática são vários, como o fato de apresentar baixo custo quando comparado a outros materiais, e principalmente por ser biodegradável, não causando danos ao meio ambiente durante seu uso. Além disso, este material apresenta características muito importantes para a impressão 3D presentes em outros materiais já usados, como a sua facilidade de moldagem quando derretido em certas temperaturas (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021).

Tendo em vista o potencial de criação deste material aliado à impressão 3D, o mundo de possibilidades de inovação e teste com peças modeladas são imensuráveis, dentre elas a criação de parafusos de interferência utilizados para a cirurgia de reconstrução ligamentar, como a do ligamento cruzado anterior (LCA).

O LCA está localizado dentro da articulação do joelho e é uma estrutura fibrosa, semelhante a uma corda, que, durante os movimentos do cotidiano, tem a função de “segurar” a tíbia, evitando que ela seja deslocada, sobretudo anteriormente. Quando este ligamento sofre uma lesão, uma das técnicas mais utilizadas para a reconstrução, é a cirurgia, onde o ligamento lesionado é substituído por um enxerto que possa fazer o melhor papel possível do ligamento cruzado que foi lesionado (FUKUDA, 2020).

Para esta cirurgia, a maioria das técnicas utilizam parafusos de interferência, que têm a função de fixar o enxerto substituto do LCA na tíbia e no fêmur (FUKUDA, 2020). Todavia, o custo de tais dispositivos ainda é um entrave

considerável. Quando se propõe políticas de saúde pública, notadamente em países que disponibilizam poucos recursos para a saúde, o custo do material a ser utilizado em cirurgia ainda é fator decisivo na escolha desse material (Zeng, C. et al., 2018).

Sendo assim, o vigente trabalho visa modelar e criar parafusos de interferência feito a base de filamento PLA e impressos em impressoras 3D, para a cirurgia de reconstrução do LCA, sendo um possível substituto aos parafusos comuns de titânio já utilizados. A confecção deste modelo será feita com base na norma ABNT NBR 15998, que fornece parâmetros de padronização a fim de verificar a confiabilidade e funcionalidade de placas e parafusos absorvíveis para osteossíntese.

2. ACIDO POLILÁCTICO

O Ácido Polilático é extraído, principalmente, do bagaço de cana-de-açúcar e pode ser sintetizado de modo químico ou biológico, possuindo diversas aplicações como utensílios, embalagens e peças biomédicas, por exemplo, além de ser capaz de substituir outros polímeros que são derivados do petróleo e possuir um baixo teor de poluição.

Esse polímero é um ácido orgânico composto por moléculas de ácido láctico retirado de fontes renováveis e fornece características que baseiam a idealização da fabricação dos parafusos de interferência, dentre as quais encontra-se, principalmente, a biocompatibilidade e biodegradabilidade, o que possibilita que o material seja compatível com tecidos vivos e se degrade no meio em que está situado, respectivamente. Vale salientar que tal degradação pode variar de seis meses a dois anos (LASPRILLA, 2011).

3. LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR

O Ligamento Cruzado Anterior está localizado no interior da articulação do joelho, sendo responsável por sua estabilidade anteroposterior e rotacional, fundamental à ação de locomoção humana. A ruptura desse ligamento é frequentemente observada, sobretudo em atletas, por realizarem movimentos bruscos e pivotantes. No entanto, nada impede a possibilidade de acontecer a ruptura de LCA na realização de tarefas diárias. Entre as causas dessa lesão destacam-se a parada abrupta de movimento, a mudança de sentido repentino durante a movimentação e os saltos com pouso irregular (SCOTT, W., 2011).

As reconstruções ligamentares do joelho, sobretudo do Ligamento Cruzado Anterior (LCA), estão entre as cirurgias mais realizadas na ortopedia (Figura 1). Tipicamente, esses ligamentos não são elegíveis para refia primária, sendo necessária a substituição do ligamento lesionado por um enxerto. Por isso, muito se tem estudado quanto ao tipo de enxerto e métodos de fixação desses enxertos (Danieli, M. V. & Padovani, C. R., 2011).

O enxerto ideal de substituição dos ligamentos rompidos deve ter propriedades estruturais e mecânicas semelhantes ao ligamento nativo, permitir fixação segura, rápida incorporação biológica e limitada morbidade no sítio doador. Geralmente são utilizados como enxertos uma dessas três opções: os tendões dos músculos semitendíneo e grácil (também conhecidos como tendões flexores); uma porção do tendão quadricipital; ou uma porção do tendão patelar (Pailhé, R. et al., (2015).

Surpreendentemente, a resistência biomecânica desses enxertos chega a ser superior à resistência do LCA nativo, contudo o elo fraco desta cirurgia é a fixação dos tendões (enxertos) aos túneis ósseos. Uma fixação inadequada pode levar a falha na integração biológica do enxerto e, conseqüentemente, frouxidão anterior do joelho. Existem muitos materiais para fixação destes tendões no fêmur e na tíbia, variando muito a técnica e o custo da cirurgia. Na prática cirúrgica, os parafusos de interferência são uma opção bastante aceita e utilizada (Harilainen, A. et al., 2006).



Figura 1. Representação da cirurgia de reconstrução do ligamento cruzado anterior, ORTOPediaBR (2021).

3.1. Parafuso de Interferência



O parafuso de interferência é um dispositivo rosqueado, cônico, desenhado de maneira a comprimir o enxerto contra as paredes dos túneis, à medida que sua inserção progride, fixando o mesmo por interferência. Este dispositivo pode ser composto por metal ou materiais bioabsorvíveis. Os metálicos são confeccionados de titânio, enquanto que, dentre os de materiais bioabsorvíveis, incluem-se diversos tipos de polímeros, tais como o ácido-L-polilático (PLLA) ou ácido-polglicólico (PGA), que se degradam ao longo do tempo, por hidrólise. Entretanto, a fabricação a base de polímeros possui um alto valor aquisitivo tendo em vista que esse material possui características mecânicas equivalentes ao aço e propriedades biológicas únicas (são absorvíveis) o que, consequentemente, eleva o preço do procedimento cirúrgico quando utiliza-se tal material (SMITH & NEPHEW COMÉRCIO DE PRODUTOS MÉDICOS LTDA, 2016).

Como já visto, o PLA pode ser utilizado como matéria prima na fabricação de peça na impressora 3D e o parafuso de interferência é facilmente modelado em diversos softwares especializados. Ou seja, a produção desses parafusos na impressora 3D é um fato, mas ainda é necessário averiguar se ele atende às necessidades de maneira semelhante ao que existe no mercado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista a potencial possibilidade de uso dos parafusos de interferência, produzidos por meio da impressão 3D, faz-se necessário a realização de ensaios mecânicos para a comprovação de sua eficiência. Dentre eles, tem-se o ensaio de tração uniaxial do conjunto parafuso-enxerto, sendo eles fixados ao osso suíno que possui densidade semelhante ao osso de um ser humano.

4.1. Fabricação do parafuso de interferência na impressora 3D

Para a fabricação do Parafuso de interferência (Figura 2), utilizou-se o software Autodesk Fusion 360 que é especializado na modelagem 3D, onde as dimensões escolhidas para o parafuso são de 30 mm de comprimento, com um diâmetro de 9 mm e um passo de rosca de 2 mm. O arquivo modelado foi fatiado, ou seja, foi analisado e mostrado pelo software Ultimaker Cura um desenho prévio do material a ser impresso, para então ser passado à impressora. Os parâmetros de impressão estão descritos na Tabela 1. A impressora utilizada para realizar a impressão foi a Creality Ender 3 Pro com um filamento de PLA da 3DLAB, da coloração branca e espessura de 1,75 mm.

Tabela 1. Dados referentes à impressão 3D, autoria própria.

Parâmetros	Velocidade de impressão	Temperatura do bico	Temperatura da mesa	Orientação de impressão	Altura da camada	Preenchimento
Dados	50 mm/s	200°C	60°C	Concêntrico	0,16 mm	100%



Figura 2. Parafuso de interferência impresso em PLA, autoria própria.

4.2. Procedimento de ensaio

Para a realização dos ensaios foram preparados 4 (quatro) montagens com joelhos suínos com o enxerto fixado em parafusos de interferência. O Ensaio 1 teve ambos os lados fixados por parafusos de PLA. Já os Ensaios 2 e 3 tiveram em suas fixações um parafuso de titânio de um lado e de PLA do outro lado e, por fim, o Ensaio 4 teve ambos os lados fixados por parafusos de titânio. Outro ponto a se destacar é a fixação de todo o conjunto na máquina de ensaio eletromecânica EMIC DL 10000. Para isso, Lavor (2021) desenvolveu uma morsa para uma maior estabilização do osso durante o processo de ensaios com essa proporção.

Na Figura 3 são apresentados detalhes da montagem do experimento na máquina de ensaios universal. O conjunto do ensaio é composto por dois joelhos suínos (no topo e na base), onde foram feitos, em cada um deles, túneis ósseos para a fixação do enxerto com um parafuso em cada osso (PLA ou titânio). A figura mostra detalhes do experimento antes de qualquer carregamento (Figuras 3a, 3b e 3c), ao longo do ensaio (Figura 3d) e a ruptura do enxerto (Figura 3e), além do escorregamento do enxerto em um dos parafusos ao final do ensaio (Figura 3f), o que ocorre na maioria dos casos. Vale ressaltar que o enxerto é um material biológico que se deforma muito e diminui muito consideravelmente sua seção transversal.

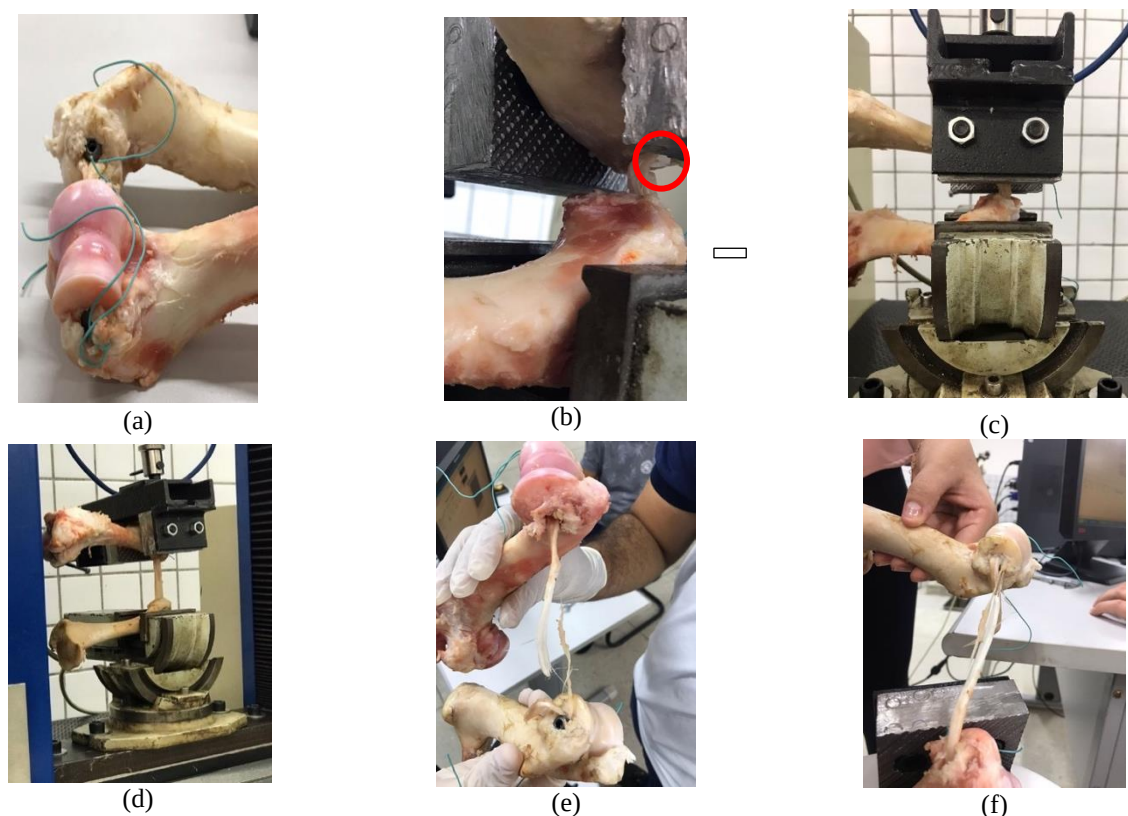


Figura 3. Ensaios de tração na montagem joelho suíno, parafuso (PLA ou titânio), enxerto, parafuso, joelho: (a) Montagem antes da realização do experimento utilizando parafusos de titânio (Ensaio 4); (b) Fixação da montagem do Ensaio 3 (detalhe do parafuso de PLA); (c) Ensaio 3 antes do seu início na máquina de ensaios mecânicos; (d) Ensaio 2 em andamento (parafuso de titânio no topo e de PLA na base); (e) Ruptura do enxerto no Ensaio 4 (parafusos de titânio); (f) Escorregamento do enxerto

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a realização dos ensaios, foram obtidos os gráficos relacionado a Força e o Deslocamento no enxerto, e estes são apresentados na Figura. 4. Além disso, a Tabela 2 mostra parâmetros usados em cada um dos ensaios e seus principais resultados.

A partir dos gráficos obtidos, nota-se que o comportamento inicial das curvas é semelhante para todos os ensaios, contudo a variação após 10 mm de deslocamento, que representa aproximadamente 15% de deformação, apresenta divergências. No primeiro ensaio, onde ambos os parafusos são de PLA, a força necessária para ocasionar deformação máxima no enxerto foi de 237,9 N. Esse valor de força máxima foi inferior às demais e pode estar ligado à qualidade do enxerto, no que diz respeito à sua seção transversal. Porém o ensaio procedeu como o esperado e ambos os parafusos cumpriram seus papéis sem haver escorregamentos e tampouco nenhuma deformação permanente, permanecendo aparentemente intactos. Não houve rompimento do enxerto, mas houve seu deslizamento em uma das extremidades.

Já no segundo ensaio, onde foi usado um parafuso de PLA e outro de titânio, sendo que o de PLA estava localizado no topo e com a cabeça voltada para cima, enquanto o de titânio estava no osso da base com a cabeça posicionada para cima, depois de atingida a força máxima e já com aproximadamente pouco mais de 15% de deformação global do enxerto e grande diminuição de sua seção transversal, ocorreram sucessivos deslizamentos do enxerto no parafuso, devido sua deformação no interior do canal que está fixado, fazendo com que ele acabe se soltando de algumas voltas do parafuso de titânio. No entanto, foi atingido um pico de força de aproximadamente 350 N e, novamente, não observado escorregamento dos parafusos nos túneis ósseos e tampouco deformações aparentes nos parafusos.

Com relação ao terceiro ensaio, o parafuso de PLA, que estava fixado na morsa superior com a cabeça voltada para baixo, desliza para fora do osso gradualmente após a força máxima de 400 N ser atingida. No entanto, deu-se continuidade ao procedimento para observar se em algum momento o enxerto iria prender-se novamente ao parafuso. Dentre as possíveis causas do ocorrido, destaca-se o tamanho do diâmetro do túnel ósseo, pois a deformação do osso devido a compressão gerada pela morsa aparentemente não aconteceu. O parafuso continuou intacto e o enxerto sofreu uma deformação elástica.



Por fim, no quarto ensaio onde ambos os parafusos usados foram de titânio, foi alcançado um pico de força de aproximadamente 300 N, e o ensaio ocorreu até que o enxerto fosse totalmente rompido. Nele, pode-se observar o quanto o enxerto consegue se alongar, porém a força tende a decair à medida que este se alonga, pois a diminuição da seção transversal é bem importante. Também, ocorreram deslizamentos em ambas as fixações e os parafusos permaneceram inalterados.

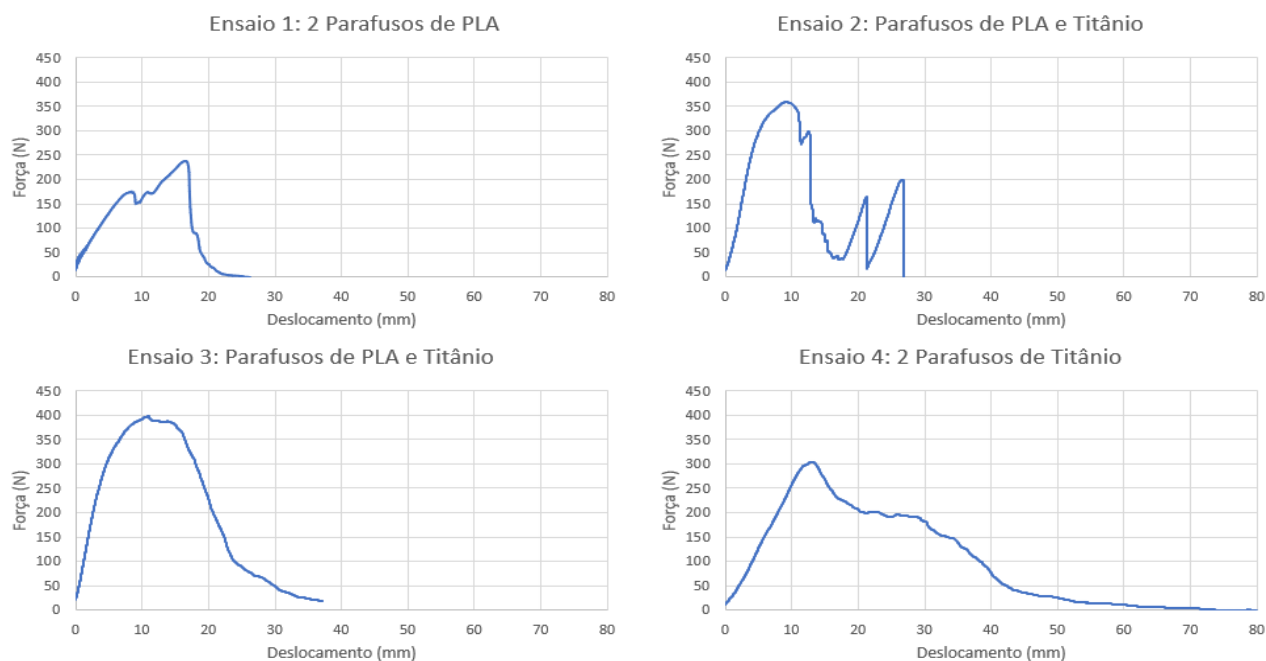


Figura 4. Gráficos resultantes dos ensaios realizados, autoria própria.

Tabela 2. Parâmetros de ensaio e ruptura obtida, autoria própria.

	Comprimento útil do Enxerto (mm)	Velocidade de deslocamento (mm/s)	Força máxima (N)	Comportamento do Enxerto
Ensaio 1	72,95	0,09	237,91	Deslizamento iniciando após 15% de deformação em uma das extremidades. Deslizamento na fixação de titânio iniciando após 15% de deformação. Escorregamento de um dos parafusos. Túnel ósseo com diâmetro inadequado. Um pouco de deslizamento em ambas as fixações, mas houve a ruptura do enxerto.
Ensaio 2	72,05	0,09	359,07	
Ensaio 3	96,05	0,09	387,53	
Ensaio 4	80,05	0,09	304,02	

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi realizada a montagem de um ensaio de tração em enxerto suíno, simulando uma cirurgia de ligamento cruzado anterior, onde foram fixados em ambas as extremidades na máquina de ensaios universal joelhos de porco nas duas extremidades e fixado o enxerto em ambos os lados em parafusos de interferência. O objetivo era de realizar o ensaio no enxerto e visualizar o comportamento de todo o conjunto, especialmente com relação à fixação no túnel ósseo do enxerto no parafuso. Objetivou-se também criar parafusos de interferência feito à base de filamento PLA e impressos em impressoras 3D, para a cirurgia de reconstrução do LCA, sendo um possível substituto aos parafusos comuns de titânio já utilizados, que foram testados também como amostra de controle.

De acordo com os resultados, observou-se que o parafuso de PLA, impresso em impressora 3D, fixa os enxertos de forma satisfatória assim como os parafusos de titânio. Os resultados encontrados por meio dos ensaios mecânicos mostraram que o parafuso impresso é promissor comparado ao parafuso de titânio comumente usados nesses procedimentos. No entanto, para trabalhos futuros, é importante o estudo, conforme normas específicas, de ensaios mecânicos no parafuso propriamente dito, como o ensaio de torque e arrancamento dinâmico, além do estudo para



aperfeiçoamento das técnicas de impressão a fim de aprimorar as características do material e encontrar os parâmetros ideais, respectivamente.

7. REFERÊNCIAS

- 3D LAB INDUSTRIA LTDA..**PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA**. Disponível em <https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>. Acesso em: 23 novembro 2021.
- 3DLAB. **Primeira Impressora 3D do mundo: conheça a história!** 2021. Disponível em: <https://3dlab.com.br/a-primeira-impressora-3d-do-mundo/>. Acesso em: 04 fev. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15998-1: Implantes para ortopedia — Placas e Parafusos absorvíveis para osteossíntese. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 8 p.
- AYALA-MEJÍAS, J. D.; GARCÍA-ESTRADA, G. A.; PÉREZ-ESPAÑA, Alcocer. Lesiones del ligamento cruzado anterior. **Acta ortopédica mexicana**, v. 28, n. 1, p. 57-67, 2014.
- Danieli, M. V. & Padovani, C. R. Comparação entre parafuso de interferência e transcondilar na reconstrução do LCA. **Acta Ortopédica Bras.** 19, 2011.
- FUKUDA, Thiago. **Cirurgia De Ligamento Cruzado Anterior (LCA)**. 2020. Disponível em: <https://www.institutotrata.com.br/cirurgia-de-ligamento-cruzado-anterior-lca/>. Acesso em: 04 fev. 2022.
- 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. in *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy* 14, (2006).
- LASPRILLA, Astrid Juliana Rincón. SÍNTESE DO POLI-ÁCIDO LÁCTICO A PARTIR DO ÁCIDO LÁCTICO PARA APLICAÇÃO BIOMÉDICA. 2011. 138 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- LAVOR, Marcos Vinicius da Silva. CONSTRUÇÃO DE UMA MORSA PARA FIXAÇÃO DE ENXERTO DE LIGAMENTO SUÍNO PARA ENSAIO DE ARRANCAMENTO AXIAL DE PARAFUSOS DE INTERFERÊNCIA. Curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi Árido, 2021.
- ORTOPEDIABR. **Reconstrução do ligamento cruzado anterior (LCA). Como é a recuperação?** Disponível em: <http://www.ortopediabr.com.br/reconstrucao-do-ligamento-cruzado-anterior/>. Acesso em: 24 novembro 2021.
- Pailhé, R., Cavaignac, E., Murgier, J., Laffosse, J. M. & Swider, P. Biomechanical study of ACL reconstruction grafts. *J. Orthop. Res.* 33, (2015).
- SCOTT, W. Norman. *Insall & Scott surgery of the knee E-book*. Elsevier Health Sciences, 2011.
- SMITH & NEPHEW COMÉRCIO DE PRODUTOS MÉDICOS LTDA. Instruções de uso: Parafuso de Interferência Absorvível. **We are Smith & Nephew**, p. 1-10, abril 2016.
- Zeng, C., Lei, G., Gao, S. & Luo, W. Methods and devices for graft fixation in anterior cruciate ligament reconstruction. *Cochrane Database Syst. Rev.* 2018.

5. AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são prestados à Universidade Federal Rural do Semi Árido, UFERSA, por meio do financiamento de bolsas de iniciação científica através do PICI/UFERSA.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.