

Análise do Comportamento Mecânico de um Modelo Animal de Enxerto de Trança Tripla de Isquiotibiais para Reconstrução Combinada de Ligamento Cruzado Anterior (LCA) e Ligamento Anterolateral (LAL) em Túnel Único Femoral, com Foco na Reconstrução do LAL.

Celina Maria Simão Damasceno¹, Rodrigo Nogueira de Codes², Diego Ariel de Lima³

Resumo: Lesões do ligamento cruzado anterior (LCA), comuns em atletas, têm recebido atenção especial, com estudos destacando o papel do ligamento anterolateral (LAL) na estabilidade do joelho. Lesões combinadas do LCA e LAL podem afetar a recuperação pós-reconstrução do LCA. A reconstrução combinada do LAL e LCA mostra promessa em reduzir falhas do enxerto. Embora o uso de enxertos de isquiotibiais em formato quádruplo seja comum, dividir um enxerto "triplo" para reconstruir ambos os ligamentos podem enfraquecê-lo. O estudo testou uma nova configuração de enxerto triplo de isquiotibiais para reconstruir simultaneamente o LCA e LAL em um único túnel femoral. Utilizou-se tendão flexor de porcos em simulações cirúrgicas com modelos animais. Os experimentos foram categorizados em três grupos: enxerto quádruplo (controle), enxerto triplo simples e enxerto triplo trançado. Os resultados indicaram que o enxerto triplo trançado aumentou o diâmetro e a força de pico em relação ao enxerto triplo simples, alcançando desempenho similar ao enxerto quádruplo. Não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos triplo trançado e quádruplo. Portanto, a configuração de enxerto triplo de isquiotibiais para reconstrução conjunta do LCA e LAL em um único túnel femoral é uma solução clinicamente viável e mecânica, com potencial para aplicação clínica.

Palavras-chave: Reconstrução ligamentar; Trança; Ligamento cruzado anterior; Ligamento anterolateral.

1. INTRODUÇÃO

As lesões do ligamento cruzado anterior (LCA) são muito frequentes em nosso meio, principalmente em decorrência da prática de esportes [1,2]. Só nos Estados Unidos mais de 100.000 lesões são reportadas anualmente [3]. Muitos autores defendem que o ligamento anterolateral do joelho (LAL) contribui para a estabilidade do joelho, tendo uma ação sinérgica ao LCA, principalmente na estabilidade rotacional [3,4]. Esses autores defendem que a lesão combinada do LCA e do LAL pode ser responsável por uma porcentagem de pacientes que não evoluem de maneira satisfatória após a reconstrução intra-articular isolada do LCA, e defendem a reconstrução do LAL para restaurar a estabilidade do joelho [3,5,6].

A reconstrução combinada do LAL e do LCA tem mostrado excelentes resultados. Isso poderia potencialmente reduzir a falha do enxerto e melhorar os resultados em pacientes de alto risco. Existem várias técnicas cirúrgicas descritas. Os isquiotibiais, em formato quádruplo, são os enxertos mais usados para esse tipo de reconstrução [7].

Todavia, a utilização de uma das "pernas" dos isquiotibiais para a reconstrução do LAL deixa somente um enxerto "triplo" para a reconstrução do LCA, o que potencialmente o deixaria mais fraco, pois estaria mais fino.

Assim, o objetivo do presente estudo é descrever e testar mecanicamente em modelo animal uma configuração que simule o enxerto de trança tripla de isquiotibiais para reconstrução combinada de LCA e LAL com túnel único femoral com uma "perna" para reconstrução do LAL (Figuras 1 e 2).

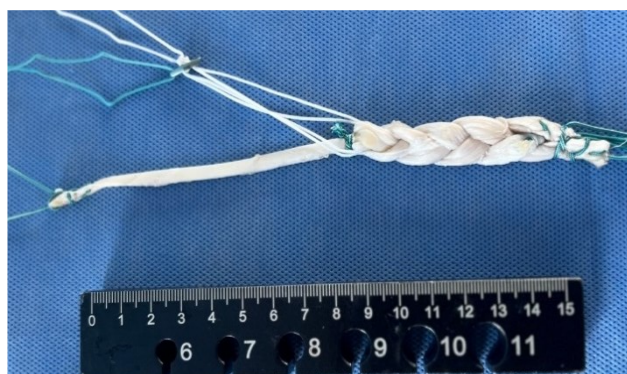


Figura 1. Enxerto de trança tripla de isquiotibiais para o Ligamento Cruzado Anterior e com uma "perna" para reconstrução do Ligamento Antero Lateral (autoria própria).

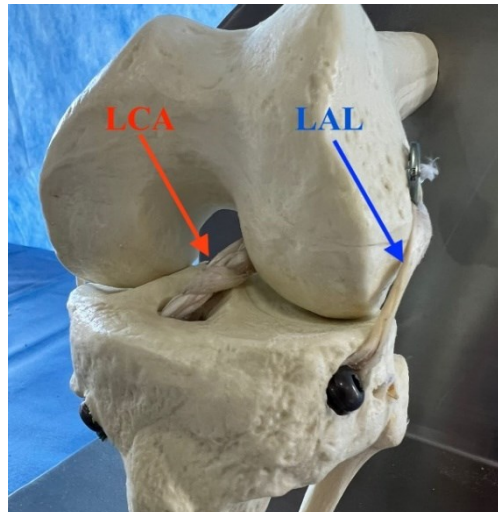


Figura 2. Modelo demonstrando técnica de reconstrução de Ligamento Cruzado Anterior (LCA) e Ligamento Antero Lateral (LAL) com enxerto de trança tripla de isquiotibiais para o LCA e com uma "perna" para reconstrução do LAL (autoria

2. DESENVOLVIMENTO

AMOSTRAS DE ENSAIO

Para o preparo das amostras ensaiadas, foi efetuada uma “simulação” do que acontece em uma cirurgia real, onde um orifício foi aberto no bloco de poliuretano, representando o “túnel ósseo”, para que posteriormente possa ser possível promover a inserção do enxerto, fixando-o com o parafuso de interferência.

De acordo com a ABNT NBR 15678:2020, que versa sobre material-padrão para a realização de ensaios mecânicos de implantes e instrumentais ortopédicos, foi utilizada espuma rígida de poliuretano unicelular, com as seguintes características:

- Dimensões: 100 mm x 100 mm x 30 mm;
- Cor: marrom;
- Densidade: 40 PCF – 0,96g/cm³;
- Orifício / túnel: comprimento de 30 mm no eixo central da face de 100 mm x 100 mm, ao longo de toda a altura do bloco, e diâmetro igual ao diâmetro do enxerto.

ENXERTO

Semelhante ao descrito no estudo biomecânico de *Moré et al.* [8], foram utilizadas nos experimentos pernas de porco recém-congeladas de espécimes Landrace, obtidas de frigorífico. As pernas foram armazenadas a –20 °C e descongelados 12 horas antes dos testes. Cada tíbia foi dissecada e o tendão flexor, de aproximadamente 2,5 mm de diâmetro e 9 cm de comprimento, os quais foram extraídos para uso como enxerto (Figura 3).



(a)



(b)

Figura 3. (a) Enxertos em processo de descongelamento a 12 horas em embalagem à vácuo. (b) Enxertos trançados descongelados fora da embalagem à vácuo.

PREPARO DAS AMOSTRAS ENSAIADAS

As amostras foram divididas em três grupos (Figura 4):

- Grupo 1) grupo controle: o enxerto foi unido de forma “quádrupla” e fixado em suas extremidades aos blocos de poliuretano com parafusos de interferência metálicos, em liga titânio ASTM F136 (Traumédica®), com 30 mm de comprimento e diâmetro igual ao do enxerto;
- Grupo 2) grupo enxerto “triplo” simples: o enxerto foi unido de forma “triplo”, paralelos, e fixado em suas extremidades aos blocos de poliuretano com parafusos de interferência metálicos, em liga titânio ASTM F136 (Traumédica®), com 30 mm de comprimento e diâmetro igual ao do enxerto;
- Grupo 3) grupo enxerto “triplo” trançado: o enxerto foi unido de forma “triplo” e trançado de forma “pura”: $(\sigma_1\sigma_2^{-1})^{3n}$, com n inteiro positivo, isto é, a sequência de concatenações $\sigma_1\sigma_2^{-1}$ $\sigma_1\sigma_2^{-1}$ $\sigma_1\sigma_2^{-1}$ repetida um número inteiro de vezes (Figura 5). A sequência básica $(\sigma_1\sigma_2^{-1})^3$ pode ser correlacionada com as permutações dos pontos (p_1, p_2, p_3) , nessa ordem: (p_1, p_2, p_3) , (p_2, p_1, p_3) , (p_2, p_3, p_1) , (p_3, p_2, p_1) , (p_3, p_1, p_2) , (p_1, p_3, p_2) , (p_1, p_2, p_3) [9]. O enxerto trançado foi fixado em suas extremidades aos blocos de poliuretano com parafusos de interferência metálicos, em liga titânio ASTM F136 (Traumédica®), com 30 mm de comprimento e diâmetro igual ao do enxerto.



Figura 4. Amostras divididas em três grupos. (Grupo 1) Grupo Controle: o enxerto é unido de forma "quádrupla"; (Grupo 2) Grupo Enxerto "triplo" Simples; (Grupo 3) Grupo Enxerto "triplo" Trançado (autoria própria).

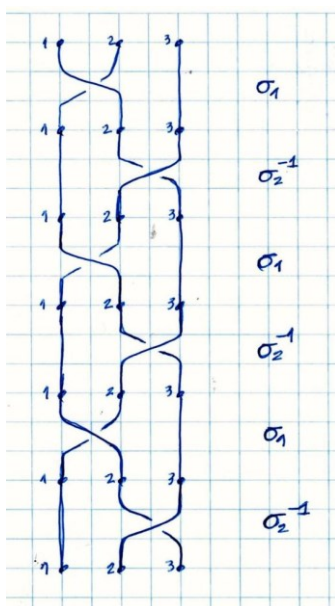
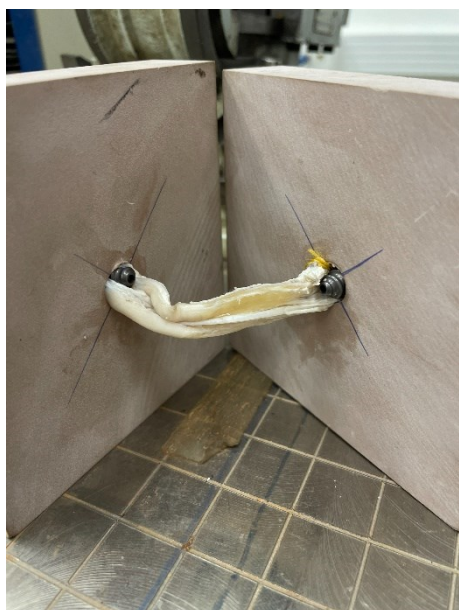


Figura 5. Trança de forma "pura" (autoria própria).

Os enxertos possuíam comprimento médio de 9 cm, sendo 3 cm dentro de cada bloco e 3 cm “livre” entre os blocos. Os procedimentos de fixação foram realizados por um cirurgião ortopédico treinado. Todos os blocos de poliuretano possuíam um túnel de diâmetro igual ao do enxerto, perfurado pelo cirurgião, no qual o enxerto foi inserido. Uma técnica de inserção de parafuso de fora para dentro foi realizada. O parafuso foi implantado com o auxílio de um fio de Kirschner como guia para evitar divergência. No final, os corpos de prova ficaram com a seguinte configuração: Parafuso – Bloco – Enxerto – Bloco – Parafuso (Figura 6).



(b)



(b)

Figura 6. (a) Corpo de prova executado com Parafuso - Bloco - Enxerto - Bloco - Parafuso, com a amostra do (Grupo 2) Triplo Simples. (b) Parafusos em liga titânio ASTM F136 e equipamento utilizado para parafusar (autoria própria).

REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os experimentos foram realizados através da máquina eletromecânica de ensaios universais, EMIC DL 10000 (Figura 7), especificamente utilizando o seu modo de tração axial.



Figura 7. Máquina eletromecânica de ensaios universais (EMIC DL 1000), com Bloco-Enxerto-Parafusos acoplados à mesma, pronta para realizar o ensaio (autoria própria).

Nos ensaios, fez-se uma correlação do comprimento útil da amostra pela derivada da deformação em relação ao tempo (segundos), estipulada em $10^{-2}/s$, sendo a tração aplicada até rompimento do enxerto ou escorregamento do conjunto parafuso/enxerto. Foram realizados no total nove ensaios para todos os grupos, sendo três ensaios para cada grupo.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS

As variáveis categóricas e numéricas foram tabuladas e analisadas com auxílio do software R, for Mac OS X GUI 1.73 (7892 Catalina build), o qual forneceu medidas de tendências centrais, valores percentil e dispersão.

A normalidade dos dados foi verificada pelo Teste de Shapiro-Wilk. A homogeneidade das variâncias dos grupos foi verificada pelo teste de Levene. A comparação de médias dos grupos, para rejeitar ou não uma hipótese nula, foi feita através do teste t para amostras independentes. A presença de outliers foi verificada através da construção de boxplots. A homoscedasticidade foi testada através da construção de modelo de regressão linear entre as variáveis.

Foram consideradas estatisticamente significativas as análises com intervalo de confiança de 95% e p menor de que 0,05.

AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO

Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia e Tecnologia da UFERSA, sob supervisão dos professores Diego Ariel de Lima e Rodrigo Nogueira De Codes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos a partir dos ensaios foram o tempo (s), a deformação (mm) e a Força (N) a qual a amostra foi submetida. Com esses dados, foram confeccionados gráficos da relação Força (N) / deformação (mm) sofrida pela amostra fixada com o parafuso de titânio e com parafuso de PLA.

As amostras do Grupo 1, onde o enxerto foi unido de forma “quádrupla”, obtiveram um pico de força de $816,28 \pm 78,78$ N. Com o avançar da deformação do enxerto, a força foi decaindo, até o enxerto se romper, com cerca de $41,30 \pm 10,01$ mm de deformação em relação ao comprimento inicial (Gráfico 1).

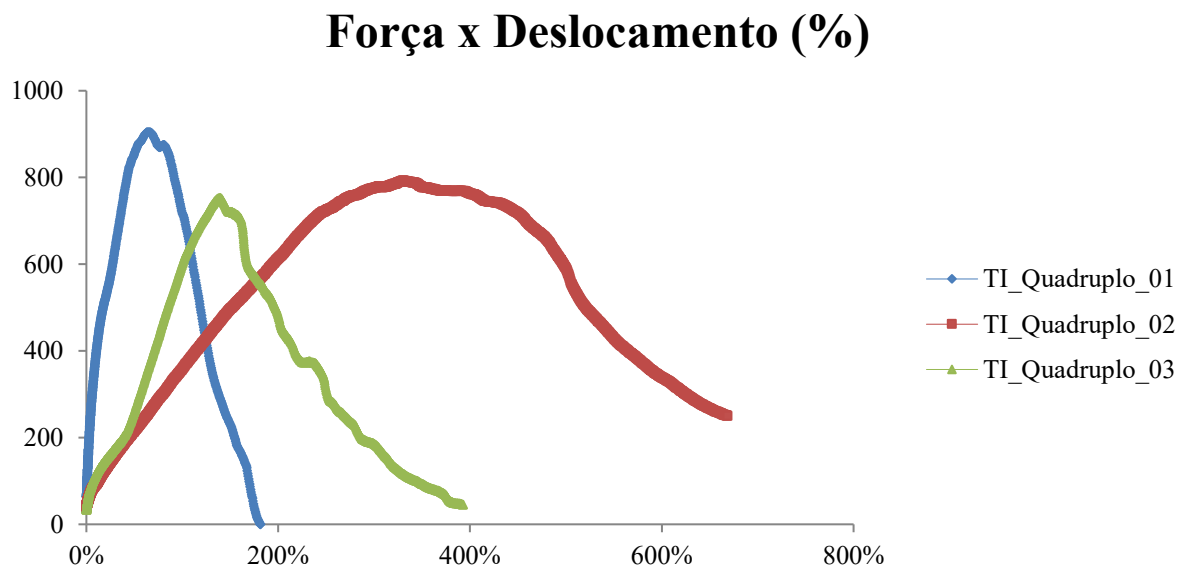


Gráfico 1. Ensaio do grupo 1 (autoria própria).

As amostras do Grupo 2, onde o enxerto foi unido de forma “tripla simples”, obtiveram um pico de força de $506,95 \pm 151,30$ N. Com o avançar da deformação do enxerto, a força foi decaindo, até o enxerto se romper, com cerca de $36,28 \pm 3,25$ mm de deformação em relação ao comprimento inicial (Gráfico 2).

Força x Deslocamento (%)

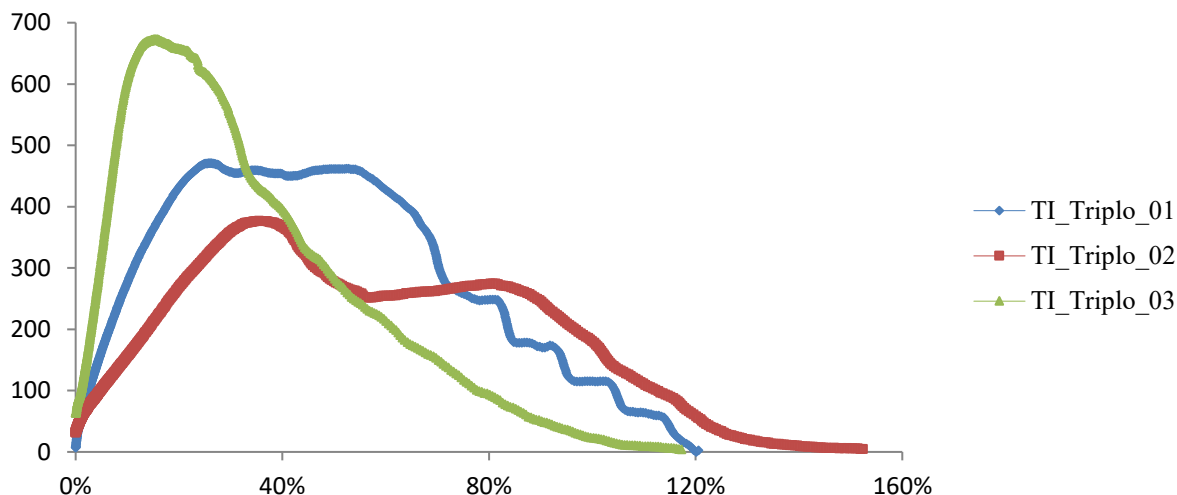


Gráfico 2. Ensaio do grupo 2 (autoria própria).

As amostras do Grupo 3, onde o enxerto foi unido de forma “tripla trançada”, obtiveram um pico de força de $723,16 \pm 316,15$ N. Com o avançar da deformação do enxerto, a força foi decaindo, até o enxerto se romper, com cerca de $52,38 \pm 17,35$ mm de deformação em relação ao comprimento inicial (Gráfico 3).

Força x Deslocamento (%)

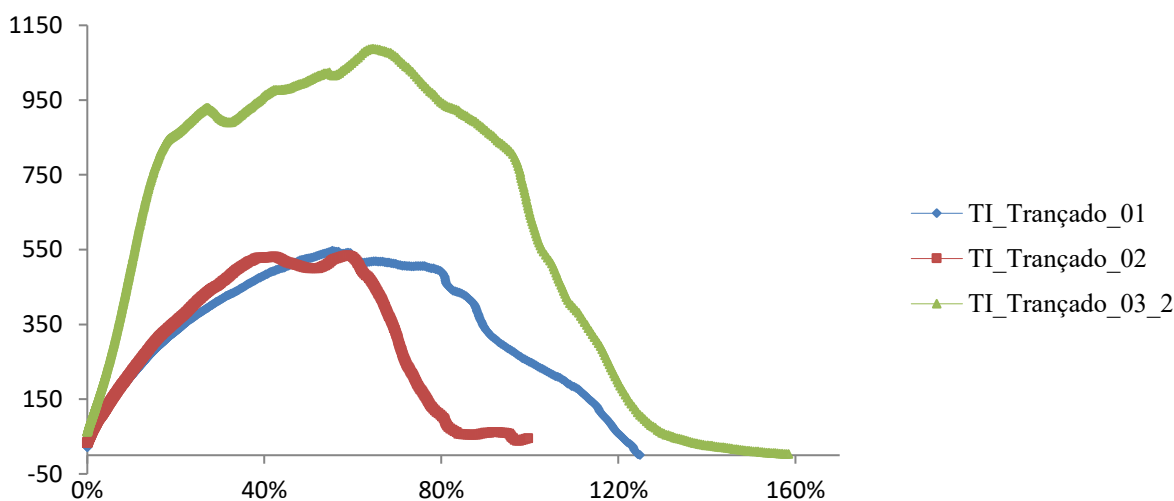
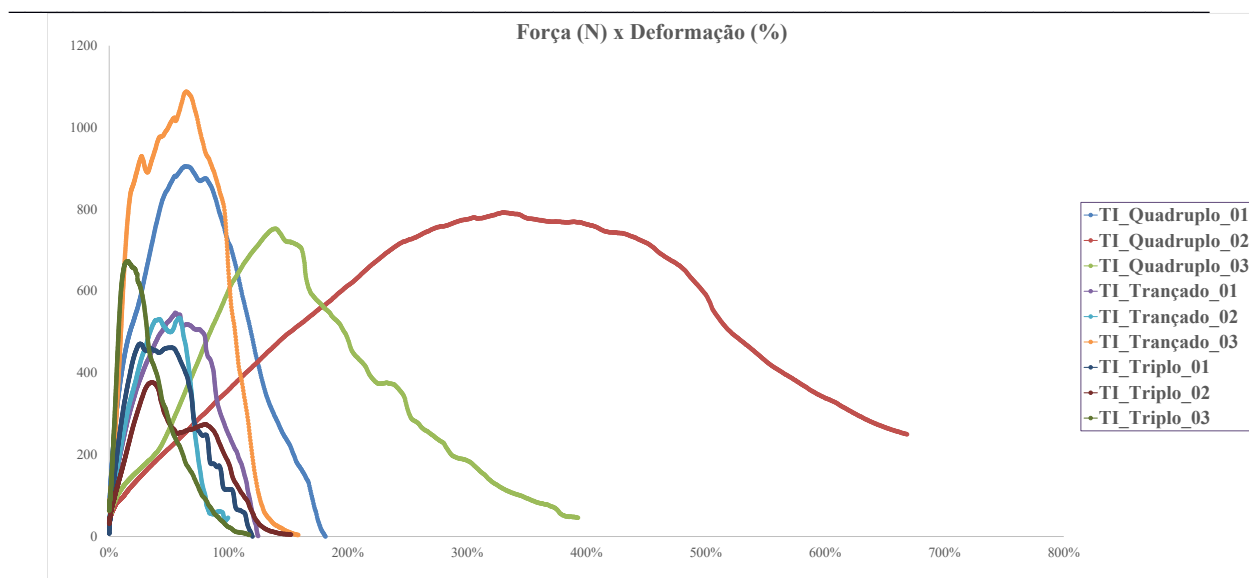


Gráfico 3. Ensaio do grupo 3 (autoria própria).

Quando comparados diâmetro e comprimento dos grupos 2 e 3, a confecção de uma trança em um enxerto unido de forma “tripla simples” aumentou seu diâmetro em cerca de 9 a 14%, todavia culminando com um encurtamento do mesmo em cerca de 4 a 8% de seu comprimento, com um aumento médio de pico de força de aproximadamente 200 N ($p < 0,05$), ou seja, aumento aproximado de 40% de seu pico de força.

Em relação aos picos de força do Grupo 1 - controle (quádruplo) e do Grupo 2 (triplo simples), o teste-t demonstrou que houve diferença estatisticamente significativa entre eles (Figura 2) ($t = 3,1452$, $p\text{-value} = 0,03467$). Nessa avaliação tivemos um $p < 0,05$, rejeitando a hipótese nula (H_0) de não diferença entre os dois grupos. Ou seja, no estudo, os enxertos quádruplos e triplo simples apresentaram picos de força diferentes (Gráfico 4).



Em relação aos picos de força do Grupo 1 - controle (quádruplo) e do Grupo 3 (triplo trançado), o teste-t demonstrou que não houve diferença estatisticamente significativa entre eles (Figura 2) ($t = 0,49722$, $p\text{-value} = 0,6451$). Nessa avaliação tivemos um $p > 0,05$, confirmando a hipótese nula (H_0) de não diferença entre os dois grupos. Ou seja, no estudo, os enxertos quádruplos e triplo trançado apresentaram picos de força similares (tabela 1).

Tabela 1. Valores dos ensaios de deformação de força dos enxertos isquiotibiais

Ensaio	Maior força (N)	Deslocamento Final (mm)	Média de Força (N)	Média de Desloc. (mm)
Triplo-01	470,92	40,79	506,95	36,277
Triplo-02	377,00	33,00		
Triplo-03	672,93	35,049		
Quádruplo-01	904,67	36,169	816,61	41,303
Quádruplo-02	792,52	32,427		
Quádruplo-03	752,65	55,314		
Trançado-01	547,26	33,586	723,16	52,379
Trançado-02	534,42	48,092		
Trançado-03	1087,8	75,459		

O parafuso de titânio ofereceu uma boa fixação do enxerto no bloco de poliuretano, sem apresentar nenhum tipo de deslizamento ou deformação aparente. Em todas as amostras, o ensaio culminou no rompimento do enxerto.

No presente estudo, tratamos uma das preocupações com relação a reconstrução combinada do Ligamento Cruzado Anterior (LCA) e do Ligamento Anterolateral (LAL) que é manter a resistência do enxerto de tendões isquiotibiais, uma vez que o procedimento do presente estudo é realizado em pacientes de alto risco e indivíduos envolvidos em práticas esportivas.

Há uma discussão quanto a realização de reconstrução combinada sobre a sua eficácia e resistência ser menor que a reconstrução isolada quando se trata do uso do enxerto "triplo" realizado para a reconstrução da LCA e uma das "pernas" dos isquiotibiais utilizada para reconstruir o LAL.

A abordagem do estudo propõe que a reconstrução combinada de LCA e LAL, com enxerto "triplo" trançado de isquiotibiais pode resultar em uma maior estabilidade do joelho e reduzir riscos de lesões recorrentes. O mesmo foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência mecânica em um modelo animal. Os resultados obtidos apontaram que o enxerto "triplo" trançado obteve um pico de força intermediário entre o enxerto quádruplo (controle) e o enxerto "triplo" simples. Também foi possível constatar que não houve diferença estática significativa entre os picos de força do enxerto "triplo" trançado e o enxerto quádruplo (controle), a trança do enxerto triplo não só aumentou o seu diâmetro, como também proporcionou um aumento significativo no pico de força em comparação com o enxerto "triplo" simples.

No entanto, é importante realizar estudos adicionais para avaliar a eficácia e segurança na prática clínica em humanos, vale ressaltar que o estudo foi realizado em um modelo animal e, portanto, os resultados não se aplicam

a humanos. Além disso, a biomecânica do joelho e os padrões de reabilitação pós-operatória devem ser avaliados para garantir a melhor recuperação possível dos pacientes.

Em resumo, a utilização do enxerto "triplo" trançado de tendões isquiotibiais, pode ser uma abordagem promissora para a reconstrução combinada do LCA e LAL, oferecendo estabilidade e resistência ao joelho, além de uma recuperação mais rápida e eficaz dos pacientes.

4. CONCLUSÃO

Em conclusão, esse estudo abordou a questão da reconstrução combinada dos Ligamentos Cruzado Anterior (LCA) e Ligamento Anterolateral (LAL) do joelho, com o objetivo de aprimorar os resultados em pacientes com lesões ligamentares complexas.

A configuração de enxerto de trança tripla de isquiotibiais para reconstrução combinada de LCA e LAL para túnel único femoral com uma "perna" para reconstrução do LAL pode vir a ser uma solução mecanicamente viável e com possível aplicação clínica. Também foi observado valores discrepantes em um tipo de enxerto para o ensaio trançado. Recomenda-se que mais ensaios sejam realizados para verificar os resultados e se a média atinge um bom resultado com relação ao trançado. Por se tratar de um material biológico, sabemos que os resultados podem divergir.

Em termos de recomendações para trabalhos futuros, sugere-se estudos que investiguem diferentes protocolos de reabilitação e avaliem os resultados funcionais a longo prazo. Como realização de estudos clínicos controlados e randomizados em humanos para comparar diretamente a reconstrução combinada de LCA e LAL com enxerto "triplo" trançado com outras técnicas de reconstrução. Além disso, análises biomecânicas mais detalhadas, incluindo estudos de estresse e fadiga, podem ajudar a esclarecer ainda mais a eficácia e segurança dessa abordagem.

Por fim, estudos que explorem diferentes protocolos de reabilitação e avaliem desfechos funcionais a longo prazo são fundamentais para orientar a prática clínica e melhorar os resultados para os pacientes com lesões ligamentares do joelho. Esses estudos podem fornecer informações importantes sobre os desfechos funcionais a longo prazo e a taxa de complicações associadas às diferentes técnicas cirúrgicas, o que pode ajudar a informar as decisões clínicas e melhorar os resultados para os pacientes.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTUR, Diego Costa, et al. Lesões do ligamento cruzado anterior e do menisco no esporte: incidência, tempo de prática até a lesão e limitações causadas pelo trauma. *Revista brasileira de ortopedia*, 2016, 51: 652-656.
- [2] GIUGLIANO, Danica N.; SOLOMON, Jennifer L. ACL tears in female athletes. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 2007, 18.3: 417-438.
- [3] DAGGETT, Matt, et al. The anterolateral ligament: an anatomic study on sex-based differences. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 2017, 5.2: 2325967116689387.
- [4] SONNERY-COTTET, Bertrand, et al. Outcome of a combined anterior cruciate ligament and anterolateral ligament reconstruction technique with a minimum 2-year follow-up. *The American journal of sports medicine*, 2015, 43.7: 1598-1605.
- [5] HUSSEIN, Mohsen, et al. Individualized anterior cruciate ligament surgery: a prospective study comparing anatomic single-and double-bundle reconstruction. *The American journal of sports medicine*, 2012, 40.8: 1781-1788.
- [6] LIMA, Diego Ariel de, et al. Surgical indications for anterior cruciate ligament reconstruction combined with extra-articular lateral tenodesis or anterolateral ligament reconstruction. *Revista brasileira de ortopedia*, 2018, 53: 661-667.
- [7] HELITO, Camilo Partezani; GUIMARÃES, Tales Mollica; SOBRADO, Marcel Faraco. Graft Preparation for Combined ACL and ALL Reconstruction With a Single Femoral Tunnel. *Video Journal of Sports Medicine*, 2021, 1.3: 26350254211004597.
- [8] MORÉ, Ari Digiácomo Ocampo, et al. Graft tendon slippage with metallic and bioabsorbable interference screws under cyclic load: a biomechanical study in a porcine model. *Research on Biomedical Engineering*, 2015, 31: 56-61.
- [9] OCAMPO URIBE, Oscar Eduardo. Grupos de tranças Brunnianas e grupos de homotopia da esfera S². 2013. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.