

## Medicina regenerativa no esporte: potencial e limitações das células-tronco na recuperação de lesões tendíneas e musculares em atletas

Regenerative medicine in sports: potential and limitations of stem cells in recovery from tendon and muscle injuries in athletes

Maria Clara Mansur Zanetti<sup>1</sup>; Ana Luiza Kale Tavares<sup>2</sup>; Arthur Alves Fiorotti<sup>3</sup>; Bruno Lima Terra<sup>4</sup>; Gabriela Santos Mendonça Campos<sup>5</sup>; Isadora Sarmento Guimarães<sup>6</sup>; João Pedro Kill<sup>7</sup>; Diego Rangel Sobral<sup>8</sup>

### Resumo

**Introdução:** A medicina regenerativa no esporte, com foco em células-tronco mesenquimais (MSC), oferece abordagens inovadoras para lesões musculoesqueléticas em atletas, modulando inflamação e promovendo regeneração tecidual. **Objetivos:** Analisar a produção científica (2021-2026) sobre o potencial e limitações das células-tronco na recuperação de lesões tendíneas e musculares em atletas, identificando achados, tendências e lacunas. **Método:** Revisão narrativa descritiva e analítica, com busca em LILACS, MEDLINE/PubMed, SCOPUS, Web of Science e Google Acadêmico, utilizando descritores como "Células-tronco" e "Medicina regenerativa". Critérios de inclusão: artigos completos em português, inglês ou espanhol, com exclusão de duplicatas e materiais sem rigor metodológico. **Discussão:** A terapia com MSC é um pilar emergente, atuando por

<sup>1</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: mcmz.estudos07@gmail.com

<sup>2</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: kaleanaliza@gmail.com

<sup>3</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: arthurfiorotti4@gmail.com

<sup>4</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: brunnoimat@gmail.com

<sup>5</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: isadora0408@gmail.com

<sup>6</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: gabrielamendonca032@gmail.com

<sup>7</sup>Discente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória e-mail: jpsbkill@gmail.com

<sup>8</sup> Docente do Curso Superior de Medicina do Instituto Multivix *Campus* Vitória. Mestre em PPGMAD/UNIR. e-mail: diegorsobral@gmail.com

diferenciação, sinalização parácrina, imunomodulação e remodelamento da matriz. Aplicações clínicas mostram eficácia em osteoartrite, lesões tendíneas, musculares e defeitos ósseos, embora com resultados heterogêneos. MSC superam PRP em lesões osteocondrais. Avanços incluem exossomos e modificação genética. Limitações: heterogeneidade, riscos biológicos, alto custo e escassez de dados de longo prazo. Lacunas exigem padronização de protocolos e ensaios clínicos robustos. **Conclusão:** MSC são promissoras para medicina esportiva, mas as evidências ainda são insuficientes para padronização. A incorporação rotineira depende de estudos clínicos mais robustos, padronizados e de longo prazo para confirmar eficácia e segurança em atletas.

**Palavras-chave:** Atletas. Medicina Regenerativa. Traumatismo em atletas.

## **ABSTRACT**

**Introduction:** Regenerative medicine in sports, with a focus on mesenchymal stem cells (MSCs), offers innovative approaches for the treatment of musculoskeletal injuries in athletes by modulating inflammation and promoting tissue regeneration. **Objectives:** To analyze the scientific literature published between 2021 and 2026 on the potential and limitations of stem cells in the recovery of tendon and muscle injuries in athletes, identifying key findings, trends, and research gaps. **Method:** A descriptive and analytical narrative review was conducted through searches in LILACS, MEDLINE/PubMed, SCOPUS, Web of Science, and Google Scholar using descriptors such as "Stem Cells" and "Regenerative Medicine." Inclusion criteria comprised full-text articles published in Portuguese, English, or Spanish. Duplicate records and studies lacking methodological rigor were excluded. **Discussion:** MSC therapy has emerged as a cornerstone of regenerative medicine, acting through cellular differentiation, paracrine signaling, immunomodulation, and extracellular matrix remodeling. Clinical applications have demonstrated efficacy in the treatment of osteoarthritis, tendon injuries, muscle injuries, and bone defects, although results remain heterogeneous. In osteochondral lesions, MSCs have shown superior outcomes compared with platelet-rich plasma (PRP). Recent advances include the use of exosomes and genetically modified MSCs. However, important limitations remain, including study heterogeneity, biological risks, high costs, and the lack of long-term data. Existing gaps highlight the need for standardized protocols and robust clinical trials. **Conclusion:** MSCs represent a promising therapeutic strategy in sports medicine; however, current evidence remains insufficient to support standardized clinical use. Their routine incorporation into clinical practice depends on further robust, standardized, and long-term clinical studies to confirm their efficacy and safety in athletes.

Keywords: Athletes. Regenerative Medicine. Athletic Injuries.

## **1 INTRODUÇÃO**

Na medicina do esporte, lesões tendíneas, musculares e até mesmo osteocondrais são muito comuns, causando afastamento dos atletas dos treinos e da prática de seu esporte, interferindo em seu desempenho em competições. Lesões nesses atletas, sejam elas por desgaste decorrente do uso excessivo, rupturas causadas por acidentes inerentes aos esportes ou erros na execução dos movimentos, podem diferenciar a vitória da derrota em uma competição.

Dessa forma, foram desenvolvidas terapias que aceleram a recuperação das lesões desses atletas, com o objetivo de minimizar o prejuízo causado ao seu rendimento e acelerar sua recuperação. O uso de células-tronco na ortopedia do esporte mostrou-se um grande avanço na área, pois essas células indiferenciadas acabam por acelerar processos necessários para a recuperação, diferenciando-se em células teciduais especializadas, aumentando a resposta inflamatória, remodelando a matriz extracelular e reduzindo a formação de tecido cicatricial, ajudando a diminuir a perda funcional do tecido lesionado (PAL et al., 2024).

Muito se discute, porém, sobre os riscos e limitações desses tratamentos e os cuidados que se deve ter ao tratar os atletas, uma vez que ainda existem muitas lacunas na pesquisa e ausência de uma regulamentação apropriada. Os riscos devem ser considerados, principalmente em uma população na qual a condição física é tão importante. A ausência de estudos sobre os impactos em longo prazo desses tratamentos levanta uma discussão acerca da relação risco-benefício de sua utilização nesses atletas, tornando necessárias novas pesquisas e discussões acerca da existência, do uso e dos riscos desses procedimentos, de forma a criar diretrizes e estudos que embasam e orientam o uso de células-tronco na reparação tecidual de forma segura e eficaz (AHMAD et al., 2025; KAR et al., 2025).

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA**

A terapia com células-tronco representa uma mudança de paradigma na medicina ortopédica, oferecendo uma alternativa regenerativa aos tratamentos convencionais, que costumam se limitar ao alívio sintomático sem reparar o dano tecidual subjacente (VAISH; VAISHYA, 2024). As células-tronco mesenquimais (CTM), tipo mais estudado nesse contexto, atuam por diferenciação celular, sinalização parácrina, imunomodulação e remodelação da matriz extracelular, sendo aplicadas no tratamento de osteoartrite, necrose avascular, defeitos ósseos e lesões tendíneas e ligamentares (VAISH; VAISHYA, 2024).

Na medicina esportiva, Stewart (2021) destaca que as lesões musculoesqueléticas representam um dos maiores desafios clínicos e financeiros do esporte, impulsionando o crescimento da medicina regenerativa — incluindo CTM, plasma rico em plaquetas (PRP), engenharia tecidual e vesículas extracelulares — como estratégias para otimizar a reparação e o retorno à prática esportiva, embora a autora ressalta que nenhuma abordagem isolada seja ainda definitiva, sendo necessária maior compreensão da comunicação celular e ensaios clínicos multicêntricos robustos.

O PRP, obtido pela centrifugação do sangue autólogo, apresenta elevada concentração de fatores de crescimento capazes de modular a inflamação e estimular a proliferação celular, sendo eficaz principalmente em lesões musculares agudas, com redução média de cinco a oito dias no retorno ao esporte, embora com resultados heterogêneos entre estudos (FILARDO et al., 2025; FITZPATRICK et al., 2025; SMITH et al., 2025). As CTM, por sua vez, apresentam benefícios promissores em lesões osteocondrais e degeneração articular precoce, ainda que limitadas pelo alto custo e pela escassez de estudos multicêntricos de longo prazo (ZHANG et al., 2025; MALANGA; NAKHLA, 2026).

Corroborando essas evidências, estudos pré-clínicos também demonstram o potencial regenerativo das CTM. Ahmad et al. (2025), em modelo animal de laceração muscular, verificaram que a injeção de CTM alogênicas promoveu recuperação funcional superior e menor fibrose em comparação aos grupos controle, sugerindo um mecanismo de ação predominantemente parácrino. Complementando essas descobertas, Stephenson et al. (2026) desenvolveram um modelo in vitro tridimensional capaz de guiar a auto-organização de CTM e mioblastos em neo tendões e neo músculos, evidenciando o papel do TGF- $\beta$ 2 no alinhamento do citoesqueleto e na formação inicial de colágeno.

Em conjunto, essas evidências mostram que a terapia com células-tronco, o PRP e os modelos de engenharia tecidual constituem abordagens complementares e promissoras na medicina regenerativa ortopédica e esportiva, mas ainda dependem de padronização metodológica, estudos multicêntricos robustos e maior compreensão dos mecanismos celulares envolvidos para sua consolidação clínica (VAISH; VAISHYA, 2024; STEWART, 2021; AHMAD et al., 2025; STEPHENSON et al., 2026; MALANGA; NAKHLA, 2026).

### **3 METODOLOGIA**

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de caráter descritivo e analítico, desenvolvida com o objetivo de analisar a produção científica relacionada à Medicina regenerativa no esporte: potencial e limitações das células-tronco na recuperação de lesões tendíneas e musculares em atletas, buscando identificar os principais achados, tendências, lacunas e contribuições da literatura para a compreensão do potencial terapêutico, da segurança e da real eficácia clínica da terapia celular no manejo dessas patologias em atletas de alto rendimento.

A busca dos estudos foi realizada entre abril e junho de 2026, contemplando publicações disponibilizadas no período de 2021 a 2026. Foram consultadas as bases de dados Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde (LILACS), Medical Literature Analysis and Retrieval System Online (MEDLINE/PubMed), SCOPUS e Web of Science (WoS) acessadas via Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e pelo Google Acadêmico. Essas fontes foram selecionadas em razão de sua alta relevância para a área da saúde e pela abrangência na recuperação de publicações científicas nacionais e internacionais.

Para a estratégia de busca, foram utilizados os seguintes descritores e/ou palavras-chave: “Células-tronco”, “Tendão”, “Medicina regenerativa”, “Esporte” e “Lesão”, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR.

Foram adotados como critérios de inclusão: artigos científicos disponíveis na íntegra; publicações nos idiomas português, inglês e/ou espanhol; estudos publicados no período definido; e produções com relação direta com o tema. Foram excluídos: estudos duplicados, textos incompletos, editoriais, teses, dissertações e materiais sem rigor metodológico. A seleção dos estudos ocorreu em etapas sucessivas: identificação nas bases, exclusão de duplicidades, triagem por leitura de títulos e resumos, seguida da análise na íntegra para composição do corpus de discussão.

### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Esta seção apresenta e discute os principais achados extraídos dos estudos incluídos nesta revisão bibliográfica sobre o emprego de células-tronco na ortopedia e na medicina esportiva. A discussão foi organizada em oito subseções, contemplando os tipos celulares empregados, os mecanismos de ação, as principais aplicações clínicas por tecido-alvo, a comparação entre células-tronco e plasma rico em plaquetas (PRP), os avanços tecnológicos recentes, as limitações identificadas e as lacunas de pesquisa que orientam a agenda futura da área.

## **4.1 Panorama geral da terapia com células-tronco em ortopedia e medicina esportiva**

A leitura conjunta dos estudos evidencia que a terapia com células-tronco (TCT) consolidou-se, na última década, como um dos pilares emergentes da medicina regenerativa musculoesquelética, sendo investigada em um espectro amplo de condições que abrange desde a osteoartrite (OA) e a necrose avascular até lesões tendíneas, ligamentares, musculares e defeitos ósseos (VAISH; VAISHYA, 2024; PAL et al., 2024). Há convergência entre os autores quanto ao papel central das células-tronco mesenquimais (MSC), derivadas sobretudo de medula óssea e de tecido adiposo, como principal veículo terapêutico, sendo também crescente o interesse por produtos derivados de células, como exossomos e vesículas extracelulares, que reproduziram parte relevante do efeito biológico das células íntegras com menor risco imunogênico (KAR et al., 2025; ZHAO; WANG, 2026).

## **4.2 Tipos e fontes de células-tronco empregadas**

Quanto à potência de diferenciação, os estudos classificam as células-tronco em totipotentes, pluripotentes, multipotentes e unipotentes, sendo as multipotentes — sobretudo as MSC — as mais amplamente empregadas em aplicações ortopédicas, em razão de sua capacidade de diferenciação em osteoblastos, condrócitos, miócitos e tenócitos, associada a menor complexidade ética de obtenção em comparação às células-tronco embrionárias (VAISH; VAISHYA, 2024; STEWART, 2021). As MSC derivadas de medula óssea (BM-MSC) permanecem como a fonte mais estudada, ainda que apresentem menor rendimento celular por aspirado em relação às MSC derivadas de tecido adiposo (AD-MSC ou ADSC), que se destacam pela coleta menos invasiva e pelo maior número de células obtidas por procedimento (PAL et al., 2024). Já as células-tronco/progenitoras tendíneas (TSPC) mostram-se mais primadas para a diferenciação tenogênica espontânea, com desempenho superior ao das BM-MSC e das AD-MSC em modelos animais de reparo tendíneo, embora a ausência de marcadores de superfície consensuais ainda dificulte sua isolamento padronizada (KAR et al., 2025). As células-tronco pluripotentes induzidas (iPSC), obtidas por reprogramação de células somáticas adultas mediante a expressão forçada de fatores de transcrição como Oct4, Sox2, Myc e Klf4, representam alternativa às células embrionárias, sendo menos imunogênicas, ainda que seu uso clínico permaneça incipiente em razão do custo de produção e do risco teórico de formação de teratomas (VAISH; VAISHYA, 2024; PAL et al., 2024). O Quadro 1 sintetiza as principais características dessas populações celulares.

Quadro 1 – Principais tipos de células-tronco utilizados em ortopedia e medicina esportiva

| Tipo celular                                  | Fonte principal                            | Potência / linhagens de diferenciação                         | Vantagens                                                   | Limitações                                                            |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| MSC (medula óssea)                            | Aspirado de medula óssea (crista ilíaca)   | Multipotente: osteoblastos, condrócitos, miócitos, adipócitos | Tipo mais estudado; efeito imunomodulador bem caracterizado | Baixo rendimento celular por aspirado; heterogeneidade entre doadores |
| MSC (tecido adiposo – ADSC)                   | Tecido adiposo subcutâneo                  | Multipotente, similar à BM-MSC                                | Coleta menos invasiva; maior rendimento celular             | Maior propensão adipogênica em doadores idosos                        |
| Células-tronco /progenitoras tendíneas (TSPC) | Tecido tendíneo                            | Primada para diferenciação tenogênica espontânea              | Maior aderência à linhagem de tenócitos                     | Marcadores de isolamento ainda não padronizados                       |
| Células-tronco pluripotentes induzidas (iPSC) | Reprogramação de células somáticas adultas | Pluripotente (três folhetos germinativos)                     | Baixa imunogenicidade; não depende de embriões              | Custo elevado de produção; risco teórico de teratoma                  |

Fonte: elaborado pelos autores com base em Vaish e Vaishya (2024), Pal et al. (2024) e Kar et al. (2025).

### 4.3 Mecanismos de ação convergentes entre os estudos

As terapias biológicas, representadas principalmente pelo plasma rico em plaquetas (PRP) e pelas células-tronco mesenquimais (MSCs), apresentam mecanismos de ação distintos, assim como resultados variados conforme o tipo de lesão. Apesar do potencial terapêutico demonstrado por ambas as abordagens, a ausência de protocolos padronizados ainda representa um desafio para a consolidação de sua aplicação clínica (FILARDO et al., 2025; MURRAY et al., 2025; MALANGA; NAKHLA, 2026 apud MARTINS et al., 2026).

O PRP possui alta concentração de fatores de crescimento, induzindo a modulação inflamatória, o estímulo da angiogênese e a proliferação celular, tornando-se mais adequado para o uso em lesões musculares agudas e tendinopatias degenerativas. Além disso, as lesões musculares dos isquiotibiais apresentaram resultados mais consistentes. Em ensaios clínicos randomizados, observou-se redução média de cinco a oito dias no tempo de retorno ao esporte, entre atletas que realizaram a infiltração de PRP precoce em conjunto com fisioterapia. Ademais, não foi demonstrada padronização quanto às técnicas de preparo e

aplicação, o que dificulta sua incorporação como estratégia terapêutica padronizada na medicina esportiva (SMITH et al., 2025; FITZPATRICK et al., 2025; VAVKEN et al., 2025; CHAHAL et al., 2025; FILARDO et al., 2025 apud MARTINS et al., 2026).

Por sua vez, as MSCs parecem exercer seus principais efeitos terapêuticos por meio de mecanismos parácrinos, destacando sua influência imunomoduladora, por meio da secreção de citocinas anti-inflamatórias e outros fatores bioativos no local lesionado. Esses mecanismos têm sido apontados como uma das principais explicações para os resultados promissores observados no reparo de tecidos musculoesqueléticos. Entretanto, ainda são necessários estudos clínicos robustos que confirmem sua eficácia e segurança em longo prazo (KRAEUTLER et al., 2025; ANZ et al., 2025; MURRAY et al., 2025; ZHANG et al., 2025; ZHAO et al., 2026; MALANGA; NAKHLA, 2026 apud MARTINS et al., 2026).

Há razoável consenso entre os trabalhos quanto aos mecanismos pelos quais as MSCs promovem a reparação tecidual, os quais podem ser agrupados em quatro eixos complementares: (i) diferenciação direta em células teciduais especializadas; (ii) sinalização parácrina, mediada pela secreção de citocinas, fatores de crescimento e vesículas extracelulares que estimulam a angiogênese e recrutam progenitores residentes; (iii) imunomodulação, com atenuação da resposta inflamatória por meio da polarização de macrófagos do fenótipo pró-inflamatório M1 para o fenótipo reparador M2; e (iv) remodelamento da matriz extracelular, favorecendo a deposição organizada de colágeno tipo I em detrimento do colágeno tipo III, o que reduz a formação de tecido cicatricial fibrótico e desorganizado (VAISH; VAISHYA, 2024; KAR et al., 2025). Estudos experimentais recentes reforçam que o efeito parácrino, mais do que a diferenciação celular propriamente dita, parece ser o principal determinante do benefício terapêutico observado em curto prazo, uma vez que as células transplantadas frequentemente não se diferenciam efetivamente em miofibras ou tenócitos maduros, como discutido adiante no caso das lesões musculares (AHMAD et al., 2025).

Torna-se importante analisar as terapias regenerativas dentro de um contexto multidisciplinar, de forma que fatores psicológicos, progressão de carga, estratégias terapêuticas de reabilitação individualizadas e recuperação neuromuscular, atuem de forma integrada (ANZ et al., 2025; DEMANGE et al., 2025; FITZPATRICK et al., 2025 apud MARTINS et al., 2026). Essa abordagem favorece desfechos clínicos mais satisfatórios, uma vez que considera as necessidades específicas tanto de atletas de alto rendimento quanto de praticantes recreativos (MARTINS et al., 2026).

Apesar dos resultados promissores observados em estudos experimentais e clínicos, os principais entraves para o avanço e a consolidação das terapias regenerativas incluem a carência de protocolos padronizados, a falta de critérios claros para definição do sucesso terapêutico, a escassez de estudos com evidências robustas e de larga escala, além dos elevados custos operacionais e das barreiras regulatórias. Em conjunto, esses fatores dificultam o levantamento de evidências científicas consistentes, a implementação clínica e a validação da segurança e eficácia dessas abordagens (GOULIAN et al., 2025; STEWART, 2021).

## **4.4 Aplicações clínicas por tecido-alvo**

### **4.4.1 Osteoartrite e regeneração cartilaginosa**

As MSC e as ADSC demonstram eficácia na promoção da regeneração cartilaginosa e no alívio sintomático da osteoartrite, atuando por diferenciação condrogênica dependente de fatores de transcrição como SOX9, associada a efeitos parácrinos e imunomoduladores (VAISH; VAISHYA, 2024; PAL et al., 2024). Estudos clínicos com seguimento de até onze anos relatam segurança do transplante autólogo de MSC de medula óssea em pacientes com defeitos condrais, sem evidência de tumorigênese (PAL et al., 2024). MSC derivadas de sangue de cordão umbilical (UCB-MSC) têm apresentado desempenho comparável, ou mesmo superior, ao concentrado de aspirado de medula óssea (BMAC) na regeneração cartilaginosa após osteotomia tibial alta, com melhora de escores funcionais de dor e função articular (PAL et al., 2024). Vesículas extracelulares derivadas de MSC também demonstram potencial condroprotetor, prevenindo a degradação da matriz extracelular e a apoptose de condrócitos em modelos experimentais de osteoartrite (PAL et al., 2024).

### **4.4.2 Lesões tendíneas e ligamentares**

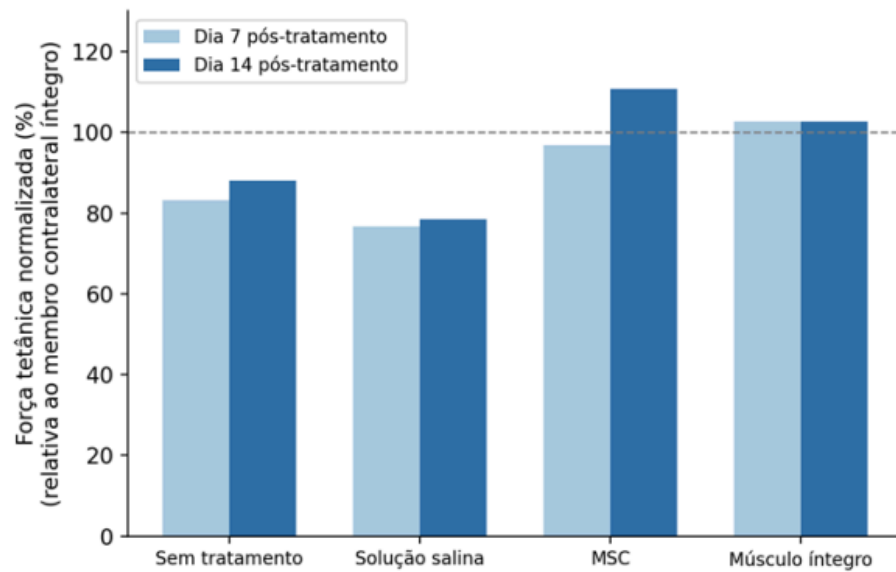
O reparo tendíneo permanece um dos maiores desafios da medicina regenerativa musculoesquelética, em razão da baixa vascularização e da lenta taxa de renovação celular desse tecido (KAR et al., 2025; STEWART, 2021). Estudos clínicos documentam reduções de 77% a 90% no volume da lesão tendínea seis meses após a injeção de células-tronco, acompanhadas de melhora da rigidez tecidual e da amplitude de movimento (KAR et al., 2025). Os resultados, contudo, são heterogêneos conforme o tipo de tendão avaliado: tendões intrassinovial, como os do manguito rotador, apresentam pior cicatrização espontânea e maior propensão à formação de aderências do que tendões extra sinoviais, como o tendão de Aquiles

(KAR et al., 2025). No contexto da reconstrução do ligamento cruzado anterior (LCA), o protocolo registrado por Zhao e Wang (2026) ressalta que a integração insatisfatória entre tendão e osso é um dos principais determinantes das taxas de falha do enxerto, que variam entre 10% e 20%, o que justifica a investigação sistemática de MSC e de seus derivados — exossomos e vesículas extracelulares — como adjuvantes biológicos capazes de promover osteogênese, angiogênese e modulação inflamatória na interface tendão-osso.

#### **4.4.3 Lesões musculares esqueléticas**

Modelos pré-clínicos de laceração muscular demonstram que a injeção local de MSC alôgenicas derivadas de medula óssea melhora significativamente a recuperação funcional. No estudo de Ahmad et al. (2025), a força tetânica normalizada em relação ao membro contralateral íntegro atingiu 96,8% ( $\pm 15,0\%$ ) no grupo tratado com MSC no sétimo dia pós-tratamento, contra 76,7% ( $\pm 4,6\%$ ) no grupo tratado com solução salina ( $p = 0,0393$ ), diferença que se acentuou no décimo quarto dia, atingindo 110,8% ( $\pm 6,46\%$ ) no grupo MSC frente a 78,4% ( $\pm 6,47\%$ ) no grupo salina ( $p < 0,0001$ ), praticamente equiparando — e até superando — o desempenho do músculo lesado ao do músculo íntegro (Figura 2). Esses achados funcionais foram acompanhados de menor infiltrado inflamatório, maior número de mioblastos bem formados e índice de fibrose reduzido no grupo tratado ( $29,30\% \pm 0,29\%$ ) em comparação ao grupo salina ( $31,77\% \pm 0,43\%$ ;  $p < 0,0001$ ), conforme ilustrado na Figura 3 (AHMAD et al., 2025). Tais resultados sugerem que o principal mecanismo envolvido nesse intervalo curto de avaliação é de natureza parácrina, e não de diferenciação miogênica direta, hipótese reforçada pela ausência de evidência morfológica de fusão das MSC transplantadas às miofibrilas residentes.

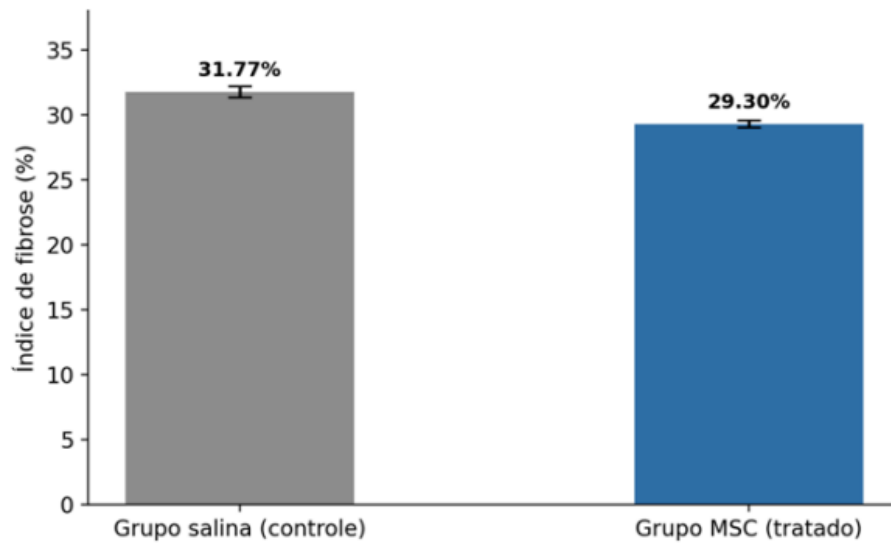
**Figura 2 – Recuperação funcional da força muscular normalizada ao membro contralateral íntegro, 7 e 14 dias após laceração muscular e tratamento com células-tronco mesenquimais (MSC) em modelo murino**



Fonte: elaborado pelos autores com base em Ahmad et al. (2025).

A mesma investigação demonstrou índice de fibrose significativamente menor no grupo tratado com MSC em comparação ao grupo controle (salina), conforme a Figura 3, achado consistente com a hipótese de que a modulação parácrina da inflamação favorece a substituição do tecido lesado por miofibrilas regeneradas, em vez de tecido cicatricial desorganizado (AHMAD et al., 2025).

**Figura 3 – Índice de fibrose no sítio da laceração muscular, sete dias após tratamento com solução salina (controle) ou com células-tronco mesenquimais (MSC)**



**Fonte: elaborado pelos autores com base em Ahmad et al. (2025).**

#### **4.4.4 Defeitos ósseos, não uniões e osteonecrose**

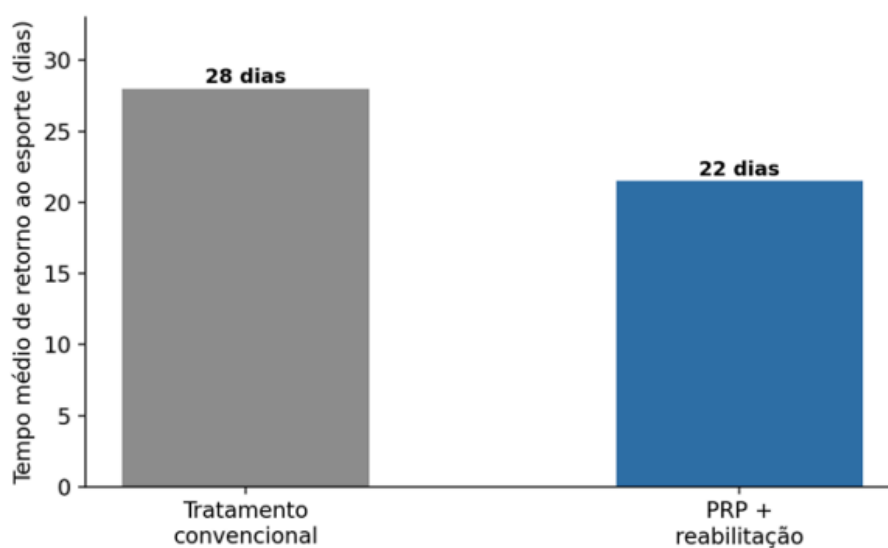
Para defeitos ósseos traumáticos e não uniões de fratura, a combinação de células-tronco com arcabouços (scaffolds) ou fatores de crescimento favorece a formação de calo ósseo e o preenchimento do defeito (VAISH; VAISHYA, 2024; PAL et al., 2024). O concentrado de aspirado de medula óssea (BMAC), rico em MSC, é amplamente utilizado no tratamento da necrose avascular da cabeça femoral, contribuindo para a regulação da atividade osteoblástica e para a prevenção do colapso articular tardio (VAISH; VAISHYA, 2024). Séries de casos descrevem cicatrização completa, sem recidiva, em pacientes com necrose avascular tratados com MSC de medula óssea, embora a robustez desses relatos ainda seja limitada pelo pequeno número de pacientes e pela ausência de grupos-controle adequados (PAL et al., 2024).

#### **4.5 Terapia com células-tronco versus plasma rico em plaquetas (PRP)**

A revisão narrativa de Martins et al. (2026) comparou sistematicamente o desempenho do plasma rico em plaquetas (PRP) e das MSC no contexto da medicina esportiva regenerativa, evidenciando que, embora ambas as terapias apresentem potencial biológico relevante, seus perfis de indicação diferem substancialmente. O PRP mostrou-se mais consistente em lesões musculares agudas dos isquiotibiais, com redução média de cinco a oito dias no tempo de retorno ao esporte quando associado à fisioterapia estruturada —

equivalente a 20 a 23 dias, contra 28 dias do tratamento convencional —, conforme ilustrado na Figura 1, ao passo que seus efeitos em tendinopatias crônicas e em reconstruções ligamentares mostraram-se mais modestos e inconsistentes entre os estudos (MARTINS et al., 2026). Já as MSC concentraram os achados mais promissores em lesões osteocondrais e nos estágios iniciais da degeneração articular, com melhora sustentada da dor e da função e evidências de regeneração tecidual, ainda que a evidência disponível para retorno esportivo rápido permaneça limitada (MARTINS et al., 2026). O Quadro 2 sintetiza essa comparação.

**Figura 1 – Tempo médio estimado de retorno ao esporte após lesão muscular aguda dos isquiotibiais, conforme a estratégia terapêutica empregada**



Fonte: elaborado pelos autores com base em Martins et al. (2026).

**Quadro 2 – Comparação entre plasma rico em plaquetas (PRP) e células-tronco mesenquimais (MSC) na medicina esportiva regenerativa**

| Aspecto                  | Plasma rico em plaquetas (PRP)                                                               | Células-tronco mesenquimais (MSC)                                                     |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Origem biológica         | Sangue autólogo centrifugado                                                                 | Medula óssea ou tecido adiposo                                                        |
| Mecanismo predominante   | Liberação de fatores de crescimento (PDGF, TGF- $\beta$ , VEGF, IGF-1)                       | Efeito parácrino, imunomodulação e diferenciação multipotente                         |
| Principais indicações    | Lesões musculares agudas; tendinopatias crônicas; reconstrução ligamentar                    | Lesões osteocondrais; degeneração articular precoce; reparo tendíneo                  |
| Evidência de eficácia    | Redução média de 5 a 8 dias no retorno ao esporte em lesões musculares                       | Melhora sustentada de dor e função; regeneração tecidual em cartilagem e tendão       |
| Principais limitações    | Heterogeneidade dos protocolos de preparo (concentração plaquetária, presença de leucócitos) | Alto custo; necessidade de infraestrutura laboratorial; poucos estudos multicêntricos |
| Nível atual de evidência | Moderado, com resultados promissores, porém inconsistentes                                   | Inicial/emergente, com perfil de segurança aceitável                                  |

Fonte: adaptado de Martins et al. (2026).

## 4.6 Avanços tecnológicos recentes

Entre as inovações mais promissoras destacam-se os exossomos e as vesículas extracelulares derivados de MSC, que carregam micro RNAs e proteínas sinalizadoras capazes de reproduzir parte relevante do efeito terapêutico das células íntegras, com a vantagem de menor risco imunogênico e tumorigênico (PAL et al., 2024; KAR et al., 2025). O protocolo de revisão sistemática registrado por Zhao e Wang (2026) para lesões do ligamento cruzado anterior prevê justamente a síntese comparativa entre células vivas e produtos derivados de células quanto a desfechos biomecânicos, tomográficos e histológicos, o que deverá, quando concluído, esclarecer o peso relativo de cada abordagem na integração tendão-osso. Paralelamente, estratégias de modificação genética de MSC — como a transdução com o fator de transcrição escleraxia (SCX) ou com o gene EGR1 — têm demonstrado potencial para direcionar de forma mais eficiente a diferenciação tenogênica e para aumentar a resistência mecânica do reparo (KAR et al., 2025). O uso de biomateriais e arcabouços, como géis de fibrina, colágeno e matrizes descelularização, também vem sendo explorado para melhorar a retenção e a sobrevida celular no sítio da lesão (KAR et al., 2025; PAL et al., 2024).

Adicionalmente, as células-tronco pluripotentes induzidas despontam como plataforma escalável para a produção padronizada de tenócitos e de MSC, o que poderia reduzir a variabilidade associada às fontes autólogas (KAR et al., 2025).

#### **4.7 Limitações, riscos e heterogeneidade metodológica**

Apesar do entusiasmo em torno da TCT, os estudos revisados convergem na identificação de barreiras relevantes à sua adoção clínica generalizada. A heterogeneidade das MSC — decorrente de variações quanto à fonte tecidual, à idade e às condições clínicas do doador, ao número de passagens em cultura e ao protocolo de isolamento — compromete a reprodutibilidade dos resultados terapêuticos entre estudos (PAL et al., 2024; KAR et al., 2025). Riscos biológicos potenciais incluem transformação maligna após cultivo prolongado, formação de teratomas, contaminação viral ou por micoplasma e diferenciação ectópica das células implantadas, com relatos de calcificação heterotópica em sítios tendíneos (PAL et al., 2024; KAR et al., 2025). Do ponto de vista econômico, o custo de uma única aplicação de células-tronco pode superar em até quatro vezes o de uma aplicação equivalente de PRP nos Estados Unidos, o que, associado à ausência de aprovações regulatórias amplas, têm restringido o acesso à terapia fora de contextos de pesquisa (KAR et al., 2025). Some-se a isso a escassez de dados de segurança e eficácia em longo prazo, uma vez que a maioria dos estudos pré-clínicos e clínicos disponíveis avaliar desfechos em janelas de tempo inferiores a seis meses (AHMAD et al., 2025; KAR et al., 2025). No campo esportivo especificamente, Stewart (2021) alerta ainda para a necessidade de considerar variáveis individuais do atleta — idade, sexo, nível de atividade e comorbidades — na interpretação da eficácia relatada em diferentes ensaios.

#### **4.8 Lacunas de pesquisa e direções futuras**

A síntese dos estudos analisados aponta para necessidades convergentes de pesquisa: (i) padronização de protocolos de isolamento, caracterização, dosagem celular e via de administração; (ii) identificação de biomarcadores e critérios de seleção de pacientes que permitam prever a resposta terapêutica; (iii) condução de ensaios clínicos randomizados, duplo-cegos, com grupo placebo e seguimento mínimo de 24 meses; e (iv) aprofundamento do conhecimento sobre os mecanismos moleculares — sobretudo parácrinos e imunomodulatórios — que sustentam o benefício observado (VAISH; VAISHYA, 2024; KAR et al., 2025; ZHAO; WANG, 2026). A convergência entre terapia celular, engenharia de tecidos, biomateriais funcionalizados e produtos derivados de células (exossomos) desponta

como a via mais provável para a maturação clínica da medicina regenerativa musculoesquelética nos próximos anos (STEWART, 2021; PAL et al., 2024).

## 5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A medicina regenerativa tem se consolidado como uma área promissora da medicina esportiva ao propor abordagens capazes de atuar diretamente nos mecanismos biológicos de reparação tecidual, especialmente em lesões tendíneas e musculares que frequentemente comprometem o desempenho e a carreira de atletas. Nesse contexto, as células-tronco mesenquimais destacam-se por sua capacidade de modular a resposta inflamatória, estimular a regeneração tecidual por meio da liberação de fatores bioativos e favorecer o remodelamento da matriz extracelular, apresentando potencial para superar as limitações naturais de cicatrização observadas principalmente nos tendões, tecidos caracterizados por baixa vascularização e reduzida atividade metabólica. Entretanto, embora estudos experimentais e ensaios clínicos preliminares demonstrem resultados encorajadores quanto à melhora estrutural e funcional dos tecidos lesionados, as evidências científicas ainda são insuficientes para estabelecer essas terapias como padrão de tratamento na prática esportiva, devido à heterogeneidade dos protocolos empregados, às diferenças nas fontes celulares, aos métodos de processamento e à limitada padronização dos desfechos avaliados. Além disso, os benefícios relacionados à redução do tempo de recuperação e ao retorno mais precoce ao esporte permanecem inconsistentes, variando conforme o tipo de lesão e as características individuais dos pacientes. Dessa forma, conclui-se que as células-tronco mesenquimais representam uma alternativa terapêutica de grande potencial para o futuro da medicina esportiva, mas sua incorporação rotineira ainda depende da realização de estudos clínicos mais robustos, com metodologias padronizadas e acompanhamento em longo prazo, capazes de confirmar sua eficácia, segurança e real impacto na recuperação de atletas.

## REFERÊNCIAS

DIAS, T. D. Mesenchymal stem cell secretome in tendon regeneration: therapeutic potential, mechanisms of action, and future perspectives. **Biomedicines**, v. 13, n. 2, p. 815-832, 2025.

GOULIAN, A. J.; GOLDSTEIN, B.; SAAD, M. A. Advancements in regenerative therapies for orthopedics: a comprehensive review of platelet-rich plasma, mesenchymal stem cells, peptide therapies, and biomimetic applications. **Journal of Clinical Medicine**, v. 14, n. 6, p. 2061-2085, 2025.

KAR, S. Stem cell approaches for tendon repair: delusion or insight. **The Journal of Physiology**, v. 603, n. 4, p. 711-724, 2025.

MENDOZA-VALDERREY, A. *et al.* Biomechanical and histological evaluation of engineered scaffolds for tendon tissue engineering. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, art. 1357696, p. 1-15, 2024.

OGUNSOLA, A. S. Recent trends of stem cell therapies in the tendon healing. **Stem Cell Research & Therapy**, v. 16, n. 1, p. 122-134, 2025.

SMITH, J. R.; JONES, L. M. Tendon niche signals and their role in modulating stem cell fate. **Essays in Biochemistry**, v. 65, n. 3, p. 415-427, 2021.

THOMPSON, R. H. *et al.* Translation of cell-based therapies in musculoskeletal disorders: a regulatory overview. **Current Research in Translational Medicine**, v. 72, n. 3, art. 100390, p. 1-10, 2024

WANG, Y. *et al.* Molecular characterization and mechanotransduction mechanisms of tendon-derived stem cells. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 175, art. 11219, p. 1-12, 2025.

ZHAO, S. Effect of stem cell therapies on tendon-bone healing after anterior cruciate ligament reconstruction in animal models: protocol for a systematic review and meta-analysis. **PLOS ONE**, v. 21, n. 2, p. e0341859, 2026.

ZHOU, X. *et al.* Pathological phenotypic alterations of tendon stem cells in chronic tendinopathy. **Annals of Medicine Review**, v. 8, n. 6, p. 106-118, 2024.

MARTINS, Willyam Padilha et al. Plasma rico em plaquetas – PRP e células-tronco mesenquimais: influência na velocidade de recuperação em lesões osteomusculares – revisão de literatura. *Revista Aracê*, São José dos Pinhais, v. 8, n. 6, p. 1-10, 2026.

STEWART, Claire E. Stem cells and regenerative medicine in sport science. *Emerging Topics in Life Sciences*, v. 5, n. 4, p. 563-573, 2021.

UPTODATE. Terapias biológicas para lesões de tendões e músculos. Atualizado em 23 abr. 2026.

VAISH, Abhishek; VAISHYA, Raju. Stem cells in orthopaedics and sports injuries: a comprehensive review and future research directions. *Journal of Orthopaedic Reports*, v. 3, p. 100344, 2024.