

REMODELAMENTO CARDÍACO FISIOLÓGICO EM ATLETAS DE ENDURANCE: UMA REVISÃO NARRATIVA

PHYSIOLOGICAL CARDIAC REMODELING IN ENDURANCE ATHLETES: A NARRATIVE REVIEW

REMODELADO CARDÍACO FISIOLÓGICO EN ATLETAS DE RESISTENCIA: UNA REVISIÓN NARRATIVA



10.56238/revgeov17n3-160

João Carlos dos Santos Junior

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Gabriel de Albuquerque Mello

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Renan Cauper Pinto Carvalho

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Vinícius Guimarães Biason

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Heitor dos Santos Veloso

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Matheus de Carvalho Pita

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Guilherme Soares da Silva

Graduando em Medicina

Instituição: Universidade Estadual do Amazonas (UEA)

Natália Ferreira Souza

Graduanda em Medicina

Instituição: Faculdade Metropolitana de Manaus (FAMETRO)



RESUMO

O remodelamento cardíaco fisiológico induzido pelo exercício representa um conjunto de adaptações estruturais e funcionais que ocorrem no miocárdio em resposta à prática crônica de atividade física intensa, sendo particularmente evidente em atletas de endurance. Esse fenômeno reflete a plasticidade do sistema cardiovascular diante das elevadas demandas metabólicas impostas pelo exercício aeróbico prolongado, caracterizado por aumentos sustentados do débito cardíaco associados à manutenção ou redução da resistência vascular periférica. Nesse contexto hemodinâmico, estabelece-se uma sobrecarga crônica de volume que atua como principal estímulo mecânico para o estiramento das fibras miocárdicas, desencadeando um processo de remodelamento cardíaco relativamente equilibrado que envolve a expansão das quatro câmaras cardíacas. Entre essas adaptações estruturais, o ventrículo esquerdo desempenha papel central na otimização do desempenho cardiovascular. Uma das manifestações mais marcantes desse processo é o aumento do volume sistólico, decorrente da ampliação da cavidade ventricular associada ao aumento da complacência miocárdica, permitindo que o coração ejeite maiores volumes de sangue sem comprometimento da função sistólica. Como consequência, observa-se aumento do volume diastólico final do ventrículo esquerdo, mecanismo fundamental para a geração de débitos cardíacos elevados durante o esforço físico. Do ponto de vista estrutural, a adaptação mais característica observada em atletas de endurance é a hipertrofia ventricular esquerda excêntrica, padrão geométrico definido pela dilatação da cavidade ventricular acompanhada de aumento proporcional da massa miocárdica e da espessura das paredes. Esse padrão resulta principalmente da sobrecarga de volume associada ao exercício de resistência e permite a expansão ventricular sem perda da eficiência contrátil. Evidências obtidas por estudos ecocardiográficos e de ressonância magnética demonstram que esse remodelamento se caracteriza por aumento das dimensões das câmaras cardíacas e da massa ventricular esquerda, configurando o fenótipo predominante de adaptação cardíaca em atletas de endurance.

Palavras-chave: Remodelamento Cardíaco. Coração do Atleta. Atletas de Endurance. Hipertrofia Ventricular Esquerda. Fisiologia do Exercício.

ABSTRACT

Exercise-induced physiological cardiac remodeling represents a set of structural and functional adaptations that occur in the myocardium in response to chronic and intense physical training, being particularly evident in endurance athletes. This phenomenon reflects the plasticity of the cardiovascular system in response to the high metabolic demands imposed by prolonged aerobic exercise, characterized by sustained increases in cardiac output associated with maintenance or reduction of peripheral vascular resistance. In this hemodynamic context, a chronic volume overload is established, acting as the primary mechanical stimulus for myocardial fiber stretching and triggering a relatively balanced cardiac remodeling process involving expansion of the four cardiac chambers. Among these structural adaptations, the left ventricle plays a central role in optimizing cardiovascular performance. One of the most notable manifestations of this process is the increase in stroke volume, resulting from enlargement of the ventricular cavity combined with increased myocardial compliance, allowing the heart to eject greater volumes of blood without compromising systolic function. Consequently, an increase in left ventricular end-diastolic volume is observed, representing a fundamental mechanism for generating higher cardiac outputs during physical exertion. From a structural perspective, the most characteristic adaptation observed in endurance athletes is eccentric left ventricular hypertrophy, a geometric pattern defined by dilation of the ventricular cavity accompanied by proportional increases in myocardial mass and wall thickness. This pattern results primarily from the chronic volume overload associated with endurance exercise and allows ventricular expansion without loss of contractile efficiency. Evidence derived from echocardiographic and cardiac magnetic resonance studies demonstrates that this remodeling is characterized by increased cardiac chamber dimensions and elevated left ventricular mass, representing the predominant phenotype of cardiac adaptation in endurance athletes.



Keywords: Cardiac Remodeling. Athlete's Heart. Endurance Athletes. Left Ventricular Hypertrophy. Exercise Physiology.

RESUMEN

El remodelado cardíaco fisiológico inducido por el ejercicio representa un conjunto de adaptaciones estructurales y funcionales que ocurren en el miocardio en respuesta a la práctica crónica de actividad física intensa, siendo particularmente evidente en atletas de resistencia. Este fenómeno refleja la plasticidad del sistema cardiovascular frente a las elevadas demandas metabólicas impuestas por el ejercicio aeróbico prolongado, caracterizado por aumentos sostenidos del gasto cardíaco asociados al mantenimiento o reducción de la resistencia vascular periférica. En este contexto hemodinámico se establece una sobrecarga crónica de volumen que actúa como principal estímulo mecánico para el estiramiento de las fibras miocárdicas, desencadenando un proceso de remodelado cardíaco relativamente equilibrado que involucra la expansión de las cuatro cavidades cardíacas. Entre estas adaptaciones estructurales, el ventrículo izquierdo desempeña un papel central en la optimización del rendimiento cardiovascular. Una de las manifestaciones más destacadas de este proceso es el aumento del volumen sistólico, resultado de la ampliación de la cavidad ventricular asociada al incremento de la complacencia miocárdica, lo que permite que el corazón expulse mayores volúmenes de sangre sin comprometer la función sistólica. Como consecuencia, se observa un aumento del volumen diastólico final del ventrículo izquierdo, mecanismo fundamental para la generación de mayores gastos cardíacos durante el esfuerzo físico. Desde el punto de vista estructural, la adaptación más característica observada en atletas de resistencia es la hipertrofia ventricular izquierda excéntrica, un patrón geométrico definido por la dilatación de la cavidad ventricular acompañada de un aumento proporcional de la masa miocárdica y del grosor de las paredes. Este patrón resulta principalmente de la sobrecarga de volumen asociada al ejercicio de resistencia y permite la expansión ventricular sin pérdida de la eficiencia contráctil. Evidencias obtenidas mediante estudios ecocardiográficos y de resonancia magnética cardíaca demuestran que este remodelado se caracteriza por el aumento de las dimensiones de las cavidades cardíacas y de la masa ventricular izquierda, configurando el fenotipo predominante de adaptación cardíaca en atletas de resistencia.

Palabras clave: Remodelado Cardíaco. Corazón del Atleta. Atletas de Resistencia. Hipertrofia Ventricular Izquierda. Fisiología del Ejercicio.



1 INTRODUÇÃO

O remodelamento cardíaco induzido pelo exercício corresponde a um conjunto de adaptações estruturais, funcionais e elétricas que ocorrem no miocárdio em resposta à prática crônica de atividade física intensa (Hsieh et al., 2025). Descrito na literatura há mais de um século, esse fenômeno representa uma forma de plasticidade cardíaca fisiológica que melhora a eficiência do sistema cardiovascular diante das elevadas demandas metabólicas impostas pelo exercício prolongado e pelo aumento do transporte de oxigênio (Weiner; Baggish, 2012).

No contexto do treinamento de endurance, o coração é submetido a condições hemodinâmicas únicas, caracterizadas principalmente por aumentos sustentados do débito cardíaco acompanhados de resistência vascular periférica normal ou mesmo reduzida (Baggish; Wood, 2011). Como consequência, estabelece-se uma sobrecarga crônica de volume que atua como o principal estímulo mecânico para o estiramento das fibras miocárdicas. Esse processo desencadeia uma adaptação morfológica biventricular relativamente equilibrada, marcada pela expansão das quatro câmaras cardíacas (Hsieh et al., 2025).

Dentro desse processo adaptativo, o ventrículo esquerdo assume papel central, demonstrando notável capacidade de adaptação estrutural e funcional para otimizar o desempenho cardiovascular (Brown et al., 2020). Uma das características mais marcantes do coração de atletas de endurance é o aumento substancial do volume sistólico, resultado da ampliação da cavidade ventricular associada ao aumento da complacência miocárdica (Weiner; Baggish, 2012). Dessa forma, o coração torna-se capaz de ejetar maiores volumes de sangue mantendo função sistólica preservada. O aumento do volume diastólico final passa a ser, portanto, um mecanismo fundamental para a geração de débitos cardíacos mais elevados durante o esforço físico (Janik et al., 2025).

Do ponto de vista estrutural, a adaptação mais característica decorrente desse estímulo é a hipertrofia ventricular esquerda excêntrica. Esse padrão se distingue pela dilatação da cavidade ventricular acompanhada de aumento proporcional da espessura das paredes e da massa miocárdica total (Morganroth et al., 1975; Trachsel et al., 2018).

Apesar do reconhecimento consolidado do remodelamento cardíaco associado ao exercício, a literatura contemporânea ainda apresenta considerável heterogeneidade nos critérios utilizados para caracterizar a hipertrofia ventricular esquerda excêntrica (Trachsel et al., 2018). Observa-se, nesse cenário, uma transição metodológica importante: modelos geométricos tradicionais baseados em medidas lineares vêm gradualmente sendo substituídos por abordagens mais recentes fundamentadas em avaliações volumétricas tridimensionais das cavidades cardíacas (Brown et al., 2020). Compreender a precisão desses diferentes padrões geométricos e sua relação com a carga de treinamento é fundamental para o avanço do conhecimento na fisiologia do exercício (Hsieh et al., 2025).



Diante disso, esta revisão narrativa tem como objetivo discutir o remodelamento cardíaco fisiológico observado em atletas de endurance, com ênfase na hipertrofia ventricular esquerda excêntrica e na evolução dos modelos de classificação geométrica descritos na literatura.

2 METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido como uma revisão narrativa da literatura dedicada ao remodelamento cardíaco fisiológico em atletas de endurance, com foco particular na hipertrofia ventricular esquerda excêntrica. A busca bibliográfica foi realizada nas bases PubMed, Scopus e Google Scholar utilizando os descritores “athlete’s heart”, “exercise-induced cardiac remodeling”, “endurance athletes”, “endurance exercise”, “left ventricular hypertrophy”, “eccentric hypertrophy” e “left ventricular remodeling”, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR. Foram priorizados estudos publicados entre 2016 e 2026, redigidos em inglês, disponíveis na íntegra e conduzidos em humanos, que abordassem diretamente as adaptações estruturais relacionadas ao remodelamento cardíaco em atletas de endurance. Houve a adição de artigos que datam entre 1975 a 2026, com o intuito de dar embasamentos teórico. Foram excluídos estudos duplicados, investigações experimentais em modelos animais, publicações sem relação direta com o tema ou centradas predominantemente em cardiopatias patológicas. A busca inicial identificou 32 registros. Após a leitura dos títulos e resumos, dez estudos foram considerados potencialmente elegíveis e, após a remoção de quatro duplicatas, seis estudos principais foram incluídos para análise. Além disso, foi realizada busca manual nas listas de referências dos artigos selecionados, permitindo a incorporação de três estudos adicionais relevantes. Quatro publicações adicionais foram incluídas como suporte conceitual para fundamentar a compreensão fisiológica do remodelamento cardíaco induzido pelo exercício, incluindo referências clássicas anteriores ao recorte temporal inicialmente priorizado. Ao final, a revisão foi composta por treze estudos analisados diretamente, complementados por três referências clássicas, totalizando dezesseis referências utilizadas no manuscrito.

3 RESULTADOS

As evidências provenientes de estudos ecocardiográficos e de ressonância magnética cardíaca demonstram que o remodelamento cardíaco em atletas de endurance se caracteriza por aumentos significativos nas dimensões das câmaras cardíacas e na espessura das paredes miocárdicas (La Gerche et al., 2022). De maneira geral, esse processo é descrito como um fenômeno biventricular equilibrado, envolvendo uma expansão relativamente harmoniosa das quatro cavidades cardíacas em resposta à sobrecarga de volume associada ao treinamento prolongado (Weiner; Baggish, 2012; Bohm et al., 2016).



A dilatação da cavidade ventricular esquerda constitui um dos achados mais frequentemente relatados na literatura, com valores de diâmetro diastólico final que frequentemente ultrapassam os limites considerados normais para a população geral (Pelliccia et al., 1999). Em grandes coortes de atletas de elite, por exemplo, observou-se que aproximadamente 45% dos indivíduos apresentavam diâmetro diastólico do ventrículo esquerdo superior a 55 mm (Weiner; Baggish, 2012).

Paralelamente à dilatação cavitária, diversos estudos relatam aumento da massa ventricular esquerda, resultado tanto da ampliação das dimensões internas quanto do espessamento das paredes miocárdicas (Brown et al., 2020; Trachsel et al., 2018). A dilatação das câmaras atriais também representa um achado recorrente. O treinamento de endurance tem sido consistentemente associado ao aumento do volume atrial esquerdo e à ampliação das dimensões do átrio direito (Baggish; Wood, 2011; Hsieh et al., 2025). Estudos longitudinais indicam ainda que o aumento do volume diastólico final do ventrículo esquerdo constitui uma das adaptações mais precoces e consistentes ao treinamento crônico de resistência (Baggish; Wood, 2011).

No que se refere aos padrões geométricos de remodelamento, a literatura aponta a hipertrofia ventricular esquerda excêntrica como o fenótipo predominante entre atletas de endurance (Morganroth et al., 1975; Trachsel et al., 2018). Esse padrão é definido pelo aumento da massa ventricular acompanhado de espessura relativa de parede preservada (RWT), geralmente mantida em valores iguais ou inferiores a 0,42 (Kusy et al., 2021). Em populações específicas, como ciclistas de estrada de elite, a hipertrofia excêntrica dilatada foi identificada em mais de um terço dos indivíduos avaliados, apresentando magnitude de adaptação estrutural superior à observada em atletas de nível sub-élite ou recreacional (Brown et al., 2020).

4 DISCUSSÃO

A análise das adaptações estruturais observadas no coração de atletas de endurance sugere um processo de remodelamento relativamente harmonioso, caracterizado pela expansão das quatro câmaras cardíacas para acomodar o aumento do fluxo sanguíneo associado ao exercício prolongado (Hsieh et al., 2025). Esse aumento global das dimensões cardíacas não representa apenas uma modificação morfológica; ele constitui a base fisiológica que permite a geração de volumes sistólicos elevados e, conseqüentemente, débitos cardíacos extremamente altos durante o esforço máximo (Baggish; Wood, 2011).

Nesse contexto, a hipertrofia ventricular esquerda excêntrica emerge como a principal adaptação estrutural observada nesses atletas. Tal configuração resulta predominantemente das demandas de volume impostas pelo exercício de resistência, que favorecem o acréscimo de sarcômeros em série nas fibras miocárdicas (Morganroth et al., 1975; Brown et al., 2020). Como consequência, desenvolve-se uma cavidade ventricular dilatada associada a um espessamento proporcional das



paredes. Essa arquitetura preserva a complacência miocárdica e facilita o enchimento ventricular rápido, mesmo em frequências cardíacas elevadas durante o exercício intenso (Janik et al., 2025).

A discussão recente sobre modelos de classificação geométrica sugere que a abordagem tradicional baseada apenas em medidas lineares e massa ventricular pode não capturar plenamente a complexidade da plasticidade cardíaca induzida pelo exercício (Trachsel et al., 2018). Modelos mais recentes, estruturados em quatro categorias e baseados em avaliações volumétricas tridimensionais das cavidades ventriculares, têm demonstrado maior sensibilidade na identificação de diferentes fenótipos de remodelamento (Brown et al., 2020). Dentro desses modelos, o padrão de hipertrofia excêntrica dilatada apresenta forte associação com volumes elevados de treinamento e com níveis superiores de desempenho aeróbico. Isso sugere que a incorporação de critérios volumétricos indexados pode fornecer uma representação mais precisa das adaptações cardíacas observadas em atletas de endurance (Trachsel et al., 2018; Brown et al., 2020).

Apesar dos avanços no entendimento desse fenômeno, a literatura ainda apresenta limitações importantes. Grande parte dos estudos disponíveis possui desenho transversal, o que dificulta a avaliação da evolução temporal completa dessas adaptações estruturais (Weiner; Baggish, 2012). Além disso, observa-se heterogeneidade nos critérios de normalidade aplicados a diferentes populações, incluindo variações relacionadas a sexo, etnia e características antropométricas, o que exige cautela na interpretação dos resultados (Baggish; Wood, 2011; Hsieh et al., 2025). Fatores como o volume cumulativo de treinamento e as diferenças fisiológicas entre modalidades esportivas — por exemplo, ciclismo em comparação com corrida — ainda requerem investigações longitudinais mais robustas para esclarecer os limites da adaptação fisiológica extrema (Moser et al., 2025).

5 CONCLUSÃO

O remodelamento cardíaco associado ao treinamento de endurance representa uma adaptação estrutural caracterizada pela expansão relativamente equilibrada das cavidades ventriculares e atriais em resposta à sobrecarga crônica de volume. Nesse contexto, a hipertrofia ventricular esquerda excêntrica configura-se como o padrão geométrico predominante, sendo caracterizada pela dilatação da cavidade ventricular associada ao aumento proporcional da massa miocárdica. Do ponto de vista funcional, essa configuração favorece a geração de volumes sistólicos elevados, preservando a complacência ventricular e mantendo as funções sistólica e diastólica adequadas.

Entretanto, a caracterização dessas adaptações ainda demanda métodos de avaliação mais precisos. Abordagens baseadas em análises volumétricas tridimensionais demonstram maior capacidade de descrever a geometria cardíaca em atletas quando comparadas às medidas lineares tradicionais. Dessa forma, o refinamento dos critérios de classificação da hipertrofia ventricular esquerda excêntrica pode contribuir para uma compreensão mais precisa da plasticidade miocárdica



induzida pelo exercício. Estudos futuros, especialmente com delineamento longitudinal, serão fundamentais para avaliar a estabilidade dessas adaptações e o impacto de diferentes cargas de treinamento sobre a morfologia cardíaca ao longo do tempo.



REFERÊNCIAS

- BAGGISH, Aaron L.; WOOD, Malissa J. Athlete's heart and cardiovascular care of the athlete: scientific and clinical update. *Circulation*, v. 123, n. 23, p. 2723–2735, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.110.981571>
- BOHM, Philipp et al. Right and left ventricular function and mass in male elite master athletes: a controlled contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance study. *Circulation*, v. 133, n. 19, p. 1927–1935, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1161/circulationaha.115.020975>
- BROWN, Benjamin et al. Left ventricular remodeling in elite and sub-elite road cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, v. 30, n. 7, p. 1132–1139, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/sms.13656>
- CASELLI, Stefano et al. Patterns of left ventricular diastolic function in Olympic athletes. *Journal of the American Society of Echocardiography*, v. 28, n. 2, p. 236–244, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.echo.2014.09.013>
- CASELLI, Stefano et al. Patterns of left ventricular longitudinal strain and strain rate in Olympic athletes. *Journal of the American Society of Echocardiography*, v. 28, n. 2, p. 245–253, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.echo.2014.10.010>
- HSIEH, Paishiun Nelson et al. Athlete's heart revisited: historical, clinical, and molecular perspectives. *Circulation Research*, v. 137, n. 2, p. 231–254, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.125.325638>
- JANIK, Michał et al. Adaptive changes in endurance athletes: a review of molecular, echocardiographic and electrocardiographic findings. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 26, n. 17, p. 8329, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26178329>
- KUSY, Krzysztof et al. Aging athlete's heart: an echocardiographic evaluation of competitive sprint-versus endurance-trained master athletes. *Journal of the American Society of Echocardiography*, v. 34, n. 11, p. 1160–1169, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.echo.2021.06.009>
- LA GERCHE, Andre et al. The athlete's heart—challenges and controversies. *Journal of the American College of Cardiology*, v. 80, n. 14, p. 1346–1362, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.110.981571>
- LANG, Roberto M. et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Journal of the American Society of Echocardiography*, v. 28, n. 1, p. 1–39, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.echo.2014.10.003>
- MORGANROTH, Joel et al. Comparative left ventricular dimensions in trained athletes. *Annals of Internal Medicine*, v. 82, n. 4, p. 521–524, 1975. DOI: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-82-4-521>
- MOSER, Othmar et al. Cardiovascular remodeling and potential controversies in master endurance athletes: a narrative review. *Life*, v. 15, n. 7, p. 1095, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/life15071095>
- PELLICCIA, Antonio et al. Physiologic left ventricular cavity dilatation in elite athletes. *Annals of Internal Medicine*, v. 130, n. 1, p. 23–31, 1999. DOI: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-130-1-199901050-00005>



TRACHSEL, Lukas D. et al. Exercise-induced cardiac remodeling in non-elite endurance athletes: comparison of 2-tiered and 4-tiered classification of left ventricular hypertrophy. PLoS ONE, v. 13, n. 2, e0193203, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193203>

WASFY, Meagan M.; WEINER, Rory B. Differentiating the athlete's heart from hypertrophic cardiomyopathy. Current Opinion in Cardiology, v. 30, n. 5, p. 500–505, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1097/hco.0000000000000203>

WEINER, Rory B.; BAGGISH, Aaron L. Exercise-induced cardiac remodeling. Progress in Cardiovascular Diseases, v. 54, n. 5, p. 380–386, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2012.01.006>

