

Endocrinologia e Medicina Estética

Edição XI

Capítulo 24

ENDOCRINOLOGIA DO ESPORTE: ADAPTAÇÕES FISIOLÓGICAS DO EXERCÍCIO

ARAMIS THOMAS VAN OPSTAL SBRANA¹
ANGELINA TROMB YOUSSEF¹
ISABELA LOPES SCHIMITH¹
ROSA MORGANA PIMENTA FERREIRA¹

¹Discente - Medicina da Universidade Santo Amaro.

Palavras-chave: Fisiologia; Exercício; Adaptação Hormonal.

DOI

10.59290/6459070711

EP EDITORA
PASTEUR

INTRODUÇÃO

O exercício físico constitui um importante estímulo fisiológico capaz de promover alterações coordenadas nos sistemas endócrino, metabólico e musculoesquelético. Durante a realização do exercício, a demanda energética aumenta progressivamente, cenário que exige ajustes na disponibilidade e utilização de substratos, no controle da glicemia e, por fim, na função muscular. Desse modo, essas respostas envolvem alterações na ação de hormônios como insulina, catecolaminas, glucagon e hormônios relacionados ao eixo hipotálamo-hipófise, permitindo adequar o metabolismo às necessidades impostas pelo esforço (HARGREAVES; SPRIET, 2020; FUJIKAWA *et al.*, 2017; SYLOW *et al.*, 2017).

Além das respostas hormonais agudas, a repetição sistemática do exercício promove adaptações que modificam a capacidade metabólica e funcional do organismo. O músculo esquelético apresenta papel central nesse processo, não apenas como principal tecido responsável pela execução do movimento, mas também como órgão secretor capaz de produzir miocinas, moléculas que participam da comunicação entre o músculo e outros tecidos. Essas adaptações contribuem para a manutenção da homeostase metabólica, melhora da capacidade muscular e preservação da função durante o envelhecimento (SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020; CARTEE *et al.*, 2022).

Entretanto, a resposta endócrina ao exercício depende da interação entre intensidade e duração do esforço, disponibilidade energética e capacidade de recuperação. Quando a demanda energética supera persistentemente a disponibilidade de energia, podem ocorrer alterações fisiológicas associadas à deficiência energética relativa no esporte, enquanto a exposição pro-

longada a cargas elevadas sem recuperação adequada pode estar relacionada ao desenvolvimento de estados de fadiga e redução do desempenho. Dessa forma, compreender as adaptações hormonais ao exercício também é fundamental para a diferenciação entre respostas fisiológicas esperadas de alterações decorrentes de treinamento excessivo ou inadequadamente recuperado (MOUNTJOY *et al.*, 2023; MEEUSEN *et al.*, 2013; CARRARD *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a endocrinologia do exercício permite o entendimento da interrelação entre os sistemas hormonal, metabólico e muscular diante do estímulo físico. Isso posto, a análise dessas respostas contribui para compreender os mecanismos responsáveis pelas adaptações ao treinamento, pela manutenção da saúde metabólica e muscular e pelas alterações decorrentes de baixa disponibilidade energética ou excesso de carga, estabelecendo uma interface relevante entre fisiologia, desempenho esportivo e saúde.

O objetivo desse capítulo foi analisar as principais adaptações hormonais e metabólicas desencadeadas pelo exercício físico, os mecanismos envolvidos na regulação endócrina durante o esforço e as adaptações decorrentes do treinamento. Procurou ainda compreender a participação do hipotálamo, da insulina, do músculo esquelético e das miocinas na integração metabólica, bem como discutir as repercussões da baixa disponibilidade energética, do treinamento excessivo e da recuperação inadequada sobre a resposta fisiológica ao exercício.

MÉTODO

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, realizada no período de abril a agosto de 2026, por meio de pesquisas na base de dados PubMed, com prioridade para revisões fisiológicas, estudos clínicos, trabalhos translacionais,

consensos e documentos relevantes à compreensão da relação entre exercício físico, sistema endócrino, metabolismo energético e adaptações musculares. A seleção concentrou-se em publicações sobre respostas hormonais ao exercício, regulação hipotalâmica do metabolismo, ação da insulina durante o esforço, metabolismo energético do músculo esquelético, miocinas, envelhecimento muscular, deficiência energética relativa no esporte e síndrome do *overtraining*.

Foram utilizados os descritores e termos livres “*exercise*”, “*exercise physiology*”, “*exercise endocrinology*”, “*hormonal adaptations*”, “*endocrine response*”, “*metabolic adaptations*”, “*skeletal muscle*”, “*insulin*”, “*glucose uptake*”, “*glucose metabolism*”, “*myokines*”, “*muscle-organ crosstalk*”, “*energy metabolism*”, “*overtraining syndrome*”, “*relative energy deficiency in sport*”, “*RED-S*”, “*energy availability*”, “*athlete*”, “*muscle aging*” e “*healthy aging*”, além de seus correspondentes em português quando aplicáveis. Os termos foram combinados pelos operadores booleanos “AND” e “OR”, com estratégias direcionadas à identificação dos mecanismos hormonais, metabólicos e musculares relacionados ao exercício e às consequências da baixa disponibilidade energética e do excesso de treinamento.

Os critérios de inclusão compreenderam os oito artigos previamente selecionados para o desenvolvimento do trabalho, publicados entre 2013 e 2023, abrangendo revisões, estudos de síntese, consensos internacionais e trabalhos científicos relevantes ao tema. Foram considerados estudos relacionados diretamente às adaptações hormonais e metabólicas ao exercício, à regulação do metabolismo energético, à ação da insulina, à função endócrina do músculo esquelético, às adaptações musculares decorrentes do exercício, à deficiência energética relativa no esporte e à síndrome do *overtraining* (RED-S).

Foram excluídas publicações que não apresentassem relação direta com o objetivo do trabalho ou que não contribuíssem para a compreensão dos mecanismos selecionados.

Os estudos foram submetidos à leitura crítica para identificação de informações relacionadas às respostas hormonais agudas, adaptações decorrentes do treinamento, metabolismo energético, regulação da glicose, comunicação endócrina entre o músculo e outros órgãos, manutenção da função muscular e alterações decorrentes de baixa disponibilidade energética ou recuperação inadequada. A análise considerou a distinção entre respostas fisiológicas esperadas ao exercício e alterações associadas ao excesso de treinamento ou à inadequação da disponibilidade energética. Por se tratar de revisão narrativa, não foi realizada metanálise, avaliação formal de risco de viés ou estimativa quantitativa combinada dos efeitos, sendo os achados interpretados por meio de integração crítica e descritiva da literatura selecionada.

A discussão e os resultados foram organizados de forma descritiva em categorias temáticas, contemplando a resposta endócrina aguda ao exercício; regulação hipotálamo-metabólica das adaptações ao esforço; participação da insulina e mecanismos de captação de glicose pelo músculo esquelético; metabolismo energético durante o exercício; função endócrina do músculo e atuação das miocinas; exercício e envelhecimento muscular; baixa disponibilidade energética e deficiência energética relativa no esporte; e síndrome do *overtraining*, incluindo seus mecanismos, manifestações e implicações para desempenho e saúde.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Bases fisiológicas da resposta endócrina e metabólica ao exercício

O exercício físico promove uma resposta interligada entre sistema nervoso central, sistema

endócrino, músculo esquelético e tecidos metabolicamente ativos. Um cenário de esforço, alterações na disponibilidade energética e na demanda metabólica são integradas por estruturas centrais, incluindo o hipotálamo, que participa da regulação das adaptações metabólicas ao exercício. Paralelamente, o músculo modifica a utilização de substratos energéticos conforme a intensidade e a duração do exercício, ajustando a produção de ATP às necessidades da contração muscular (FUJIKAWA *et al.*, 2017; HARGREAVES; SPRIET, 2020).

A resposta metabólica (**Quadro 24.1**) depende da utilização coordenada de carboidratos e lipídios, cuja contribuição relativa varia conforme as características do exercício. Como as reservas imediatas de ATP são limitadas, o músculo precisa ativar continuamente diferentes vias para sustentar a contração. O exercício, portanto, representa um estímulo capaz de modificar simultaneamente disponibilidade de substratos, metabolismo energético e sinalização celular (HARGREAVES; SPRIET, 2020).

Entre as principais respostas está o aumento da utilização de glicose pelo músculo esquelético. Durante o exercício, mecanismos relacionados à contração muscular estimulam a captação de glicose por vias parcialmente independentes da sinalização convencional da insulina.

Essa adaptação permite aumentar a disponibilidade de glicose para a produção energética durante o esforço e contribui para a regulação metabólica no período de recuperação (SYLOW *et al.*, 2017).

A intensidade dessa resposta evidencia a importância do exercício para a homeostase energética. A captação de glicose pelo músculo pode aumentar até 50 vezes durante o exercício, enquanto a melhora da sensibilidade à insulina pode persistir por até 48 horas. Além disso, mais de 1.000 sítios de fosforilação no músculo humano são regulados pelo exercício, demonstrando que as adaptações metabólicas envolvem uma extensa rede de sinalização intracelular (SYLOW *et al.*, 2017).

Dessa forma, a resposta endócrino-metabólica ao exercício não depende da alteração isolada de determinado hormônio, mas da integração entre controle central, metabolismo energético, sinalização insulínica e atividade muscular. Essa interação permite ajustar a utilização de substratos às necessidades do exercício e constitui uma das bases fisiológicas das adaptações promovidas pelo treinamento (FUJIKAWA *et al.*, 2017; HARGREAVES; SPRIET, 2020; SYLOW *et al.*, 2017).

Quadro 24.1 Principais respostas metabólicas associadas ao exercício

Resposta metabólica	Dado quantitativo	Principal efeito
Captação muscular de glicose	Até 50×	Aumenta a disponibilidade de glicose para o músculo
Sensibilidade à insulina	Até 48 h	Permanece aumentada após o exercício
Ressíntese de ATP	2 vias principais	Metabolismo anaeróbio e oxidativo
Etapas da captação de glicose	3 etapas	Entrega, transporte e metabolismo intracelular
Sinalização muscular	>1.000 sítios de fosforilação	Demonstra a complexidade da resposta ao exercício

Regulação da glicose e sinalização da insulina

A regulação da glicose durante o exercício constitui uma das principais adaptações metabólicas desencadeadas pela contração do músculo esquelético. Em repouso, a insulina exerce papel central na captação de glicose; durante o exercício, entretanto, a contração muscular ativa mecanismos parcialmente independentes da sinalização insulínica, permitindo aumentar a entrada de glicose na fibra muscular de acordo com a demanda energética (SYLOW *et al.*, 2017).

O GLUT4 constitui um dos principais componentes desse processo. A insulina e a contração muscular promovem, por mecanismos parcialmente distintos, a mobilização do GLUT4 para a membrana plasmática, aumentando o transporte de glicose para o interior da célula. Assim, o exercício mantém a capacidade de estimular a captação de glicose mesmo quando a sinalização convencional da insulina apresenta menor participação relativa (SYLOW *et al.*, 2017).

Essas alterações possuem relevância para o controle metabólico, pois permitem que o músculo funcione como importante regulador da glicemia durante e após a atividade física. A manutenção da maior sensibilidade à insulina no período de recuperação prolonga os efeitos metabólicos da sessão de exercício, enquanto a repetição sistemática do estímulo contribui para adaptações metabólicas mais duradouras (SYLOW *et al.*, 2017).

Portanto, a resposta glicêmica ao exercício resulta da integração entre sinalização hormonal e mecanismos diretamente ativados pela contração muscular. Isso porque, a capacidade de aumentar a captação de glicose independentemente da ação clássica da insulina demonstra que a endocrinologia do exercício depende não

apenas das concentrações hormonais circulantes, mas também da capacidade dos tecidos de responder aos estímulos metabólicos e mecânicos (SYLOW *et al.*, 2017).

Músculo esquelético como órgão endócrino e comunicação interorgânica

O músculo esquelético atua não apenas na produção de força e no metabolismo energético, mas também como órgão endócrino por meio da produção e liberação de miocinas. Essas moléculas podem exercer ações autócrinas, parácrinas e endócrinas, estabelecendo comunicação entre o músculo e diferentes tecidos. A identificação de mais de 650 miocinas demonstra a complexidade da atividade secretora muscular, embora apenas aproximadamente 5% apresentem função biológica caracterizada (SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

O exercício constitui um importante estímulo para essa transmissão, modificando a atividade contrátil e metabólica do músculo e favorecendo a liberação de diferentes mediadores. As miocinas participam do chamado *muscle-organ crosstalk*, uma comunicação que envolve cérebro, tecido adiposo, fígado, osso, intestino, pâncreas, sistema vascular e pele. Dessa maneira, uma alteração localizada na atividade muscular pode produzir respostas fisiológicas em tecidos distantes (SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

Nesse sentido, a comunicação músculo-órgão possui importante função na regulação metabólica. De maneira que, durante o exercício, o músculo aumenta sua demanda energética e modifica a utilização de substratos, enquanto diferentes órgãos participam da manutenção da disponibilidade energética. Dessa forma, a interação entre músculo, fígado, tecido adiposo e sistema nervoso central permite coordenar a utilização e a disponibilidade de nutrientes con-

forme as necessidades do organismo (HARGREAVES; SPRIET, 2020; FUJIKAWA *et al.*, 2017; SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

Essa comunicação também apresenta relevância notável para a manutenção da saúde muscular ao longo do envelhecimento. A partir deste fato, sua fundamentação se baseia no conceito de que o exercício regular preserva a função muscular e, simultaneamente, mantém a atividade de um tecido metabolicamente ativo capaz de produzir sinais com efeitos sistêmicos. Assim, os benefícios da atividade física ultrapassam a manutenção de massa e força, envolvendo também mecanismos de comunicação metabólica entre diferentes órgãos (CARTEE *et al.*, 2016; SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

Portanto, o conceito de músculo como órgão endócrino amplia a compreensão das adaptações ao exercício. A atividade muscular desencadeia uma rede integrada de sinalização que conecta músculo, cérebro e tecidos periféricos, contribuindo para respostas metabólicas sistêmicas. Entretanto, o fato de apenas cerca de 5% das miocinas identificadas apresentarem função biológica conhecida demonstra que essa área permanece em desenvolvimento e que grande parte dos mecanismos envolvidos ainda necessita de investigação (SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

Adaptações hormonais e controle neuroendócrino do metabolismo

O exercício provoca alterações coordenadas nos sistemas neuroendócrino e metabólico com o objetivo de adequar a disponibilidade energética às necessidades impostas pela atividade muscular. O hipotálamo exerce papel central nesse processo, integrando informações relacionadas ao estado energético e coordenando respostas que envolvem diferentes tecidos. Dessa maneira, a adaptação ao exercício resulta da interação entre mecanismos centrais e periféricos,

permitindo modificar o metabolismo conforme a intensidade e a duração do esforço (FUJIKAWA *et al.*, 2017).

Na esfera do controle neuroendócrino, a regulação hipotalâmica participa especialmente da adaptação metabólica ao exercício prolongado e repetido. O mecanismo se baseia na detecção de alterações na disponibilidade de nutrientes e nos sinais provenientes dos tecidos periféricos que são integradas pelo sistema nervoso central, coordenador das respostas destinadas a preservar um ambiente de homeostase energética. O exercício, portanto, representa não apenas um estímulo periférico sobre o músculo, mas também um estímulo capaz de modificar mecanismos centrais relacionados ao metabolismo (FUJIKAWA *et al.*, 2017).

No músculo esquelético, essas adaptações ocorrem paralelamente à alteração da utilização de substratos energéticos. A atividade muscular aumenta a demanda por ATP e promove ajustes na utilização de carboidratos e lipídios, cuja contribuição depende das características do exercício. A integração entre controle central e metabolismo muscular permite adequar a disponibilidade e o consumo de energia durante o esforço (HARGREAVES; SPRIET, 2020; FUJIKAWA *et al.*, 2017).

A sinalização metabólica produzida pelo exercício também se relaciona à comunicação entre diferentes órgãos. O músculo ativo libera mediadores capazes de participar da comunicação com tecidos periféricos e com o sistema nervoso central, enquanto os sinais provenientes desses tecidos contribuem para a regulação das respostas metabólicas. Essa interação demonstra que as adaptações hormonais ao exercício fazem parte de uma rede fisiológica integrada, e não de respostas isoladas de determinado eixo endócrino (SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020; FUJIKAWA *et al.*, 2017).

Assim, o controle neuroendócrino do exercício pode ser compreendido como uma resposta dinâmica destinada a manter a homeostase energética diante do aumento da demanda metabólica. A integração entre hipotálamo, músculo e órgãos periféricos permite coordenar utilização de substratos, disponibilidade energética e adaptações metabólicas; logo, constitui um dos principais fundamentos da endocrinologia do exercício (FUJIKAWA *et al.*, 2017; HARGREAVES; SPRIET, 2020).

Implicações clínicas

Embora o exercício produza importantes adaptações fisiológicas, a exposição excessiva ao treinamento, especialmente quando associada à recuperação inadequada, pode resultar em alterações persistentes do desempenho e da resposta ao esforço. A síndrome do *overtraining* caracteriza-se por redução prolongada do desempenho acompanhada de alterações relacionadas à recuperação e ao estado fisiológico do indivíduo. Seu diagnóstico permanece complexo porque não existe um marcador isolado capaz de confirmar a condição (CARRARD *et al.*, 2022; MEEUSEN *et al.*, 2013).

A avaliação deve considerar a relação entre carga de treinamento, recuperação, desempenho e manifestações associadas. A simples presença de fadiga após exercícios intensos não é suficiente para estabelecer síndrome de *overtraining*, uma vez que diferentes estados de fadiga e recuperação inadequada podem apresentar manifestações semelhantes. Por isso, a avaliação longitudinal do desempenho e do contexto de treinamento possui papel fundamental na diferenciação entre respostas fisiológicas esperadas e condições de excesso de treinamento (CARRARD *et al.*, 2022).

O equilíbrio entre estímulo e recuperação é particularmente importante porque as adaptações ao exercício dependem da capacidade de o

organismo responder ao estresse imposto pelo treinamento. Quando a carga é elevada e a recuperação é insuficiente, os mecanismos envolvidos na adaptação podem deixar de produzir melhora do desempenho e passar a associar-se a redução da capacidade funcional. Assim, o treinamento deve ser compreendido como uma relação dinâmica entre estímulo, recuperação e adaptação (MEEUSEN *et al.*, 2013).

A identificação do *overtraining* exige ainda excluir outras condições capazes de explicar queda de desempenho e fadiga. Alterações nutricionais, doenças, distúrbios do sono e outros fatores devem ser considerados durante a avaliação, uma vez que manifestações inespecíficas podem ocorrer em diferentes situações. Dessa maneira, o diagnóstico não deve depender de uma única alteração hormonal ou metabólica, mas da integração entre história clínica, treinamento, recuperação e evolução do desempenho (CARRARD *et al.*, 2022; MEEUSEN *et al.*, 2013).

O reconhecimento precoce dessas alterações é fundamental para adequar a carga de treinamento e restabelecer o equilíbrio entre estímulo e recuperação. Os autores destacam que não existe atualmente um biomarcador isolado ou teste laboratorial único capaz de estabelecer o diagnóstico de síndrome de *overtraining* (RED-S), sendo necessária avaliação clínica integrada e exclusão de outras causas de queda persistente do desempenho (**Quadro 24.2**). Dessa maneira, a endocrinologia do exercício também envolve compreender os limites entre adaptação fisiológica e estresse excessivo. Por fim, O exercício adequado promove adaptações positivas, enquanto a combinação de cargas excessivas e recuperação insuficiente pode comprometer o desempenho e a capacidade de adaptação (CARRARD *et al.*, 2022; MEEUSEN *et al.*, 2013).

Quadro 24.2 Aspectos relacionados ao *overtraining*

Aspecto avaliado	Dados do estudo	Principal achado
Estudos/publicações analisados	39	Evidências sobre diagnóstico e biomarcadores de OTS
Participantes	952	328 com OTS e 624 controles
Avaliação hormonal basal	17 estudos	Uma das principais categorias de biomarcadores investigados
Testosterona/estradiol	4 estudos	Alterações da razão T/E foram descritas
Cortisol	4 estudos	Alterações foram relatadas em diferentes matrizes biológicas

Diagnóstico e avaliação endocrinológica das adaptações ao exercício

A avaliação endocrinológica das adaptações ao exercício deve partir da compreensão de que a resposta ao treinamento não corresponde à alteração isolada de um hormônio, mas à integração entre metabolismo energético, sinalização hormonal, tecido muscular e comunicação entre órgãos. Durante o exercício, o músculo esquelético modifica intensamente a utilização de glicose e outros substratos energéticos, enquanto a contração muscular também estimula a liberação de mioquinas, estabelecendo comunicação com tecidos como fígado, tecido adiposo e sistema nervoso. Dessa forma, a avaliação deve considerar a resposta sistêmica ao exercício, e não apenas concentrações hormonais séricas isoladas (HARGREAVES; SPRIET, 2020; SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020; SYLOW *et al.*, 2017).

Do ponto de vista metabólico, a avaliação deve considerar principalmente a capacidade de utilização de glicose e a resposta à insulina. O exercício aumenta a captação muscular de glicose por mecanismos dependentes da contração, independentes da ação imediata da insulina, e promove aumento subsequente da sensibilidade à insulina. Essa resposta pode permanecer por aproximadamente 48 horas após o exercício, tornando relevante o intervalo entre a última sessão de treinamento e a realização de avaliações metabólicas (SYLOW *et al.*, 2017).

Em relação ao eixo neuroendócrino, alterações persistentes na relação entre treinamento e recuperação devem ser investigadas quando houver queda inexplicada do desempenho, fadiga prolongada ou alterações sistêmicas. Entretanto, nenhum marcador hormonal isolado apresenta capacidade suficiente para estabelecer diagnóstico de síndrome de *overtraining*. A avaliação deve integrar histórico de treinamento, desempenho, recuperação, manifestações clínicas e exclusão de outras condições que possam produzir sintomas semelhantes (MEEUSEN *et al.*, 2013; CARRARD *et al.*, 2022).

A disponibilidade energética constitui outro componente fundamental da avaliação endocrinológica, particularmente quando existem alterações menstruais, redução do desempenho, alterações ósseas, fadiga persistente ou outros sinais compatíveis com RED-S. A investigação deve abranger ingestão energética, demanda do exercício, composição corporal, função reprodutiva, saúde óssea, metabolismo e desempenho. Embora valores de aproximadamente 45 kcal/kg de massa livre de gordura/dia tenham sido utilizados historicamente como referência de disponibilidade energética adequada e valores ≤ 30 kcal/kg de massa livre de gordura/dia tenham sido associados a alterações fisiológicas, o consenso atual ressalta que esses números não constituem critérios diagnósticos universais (MOUNTJOY *et al.*, 2023).

Assim, a avaliação endocrinológica das adaptações ao exercício deve ser longitudinal e multidimensional, relacionando alterações metabólicas, hormonais, musculares e funcionais à carga de treinamento e à recuperação. A interpretação conjunta desses elementos permite diferenciar adaptações fisiológicas esperadas de situações de baixa disponibilidade energética, recuperação inadequada e possível *overtraining*. Portanto, exames hormonais e metabólicos devem atuar como componentes de uma avaliação clínica integrada, e não como marcadores isolados da qualidade da adaptação ao exercício (CARRARD *et al.*, 2022; MEEUSEN *et al.*, 2013; MOUNTJOY *et al.*, 2023).

Tratamento, disponibilidade energética e comunicação muscular

A baixa disponibilidade energética representa um importante ponto de integração entre metabolismo, endocrinologia e exercício, pois ocorre quando a energia disponível após o gasto relacionado ao exercício é insuficiente para sustentar adequadamente as funções fisiológicas. No contexto da RED-S, essa condição pode produzir alterações sistêmicas que ultrapassam o músculo esquelético, atingindo metabolismo, função reprodutiva, saúde óssea, imunidade, sistema cardiovascular e desempenho esportivo. Portanto, seu manejo deve considerar a interação entre demanda energética, carga de treinamento e recuperação (MOUNTJOY *et al.*, 2023).

A avaliação deve ser realizada de forma longitudinal, uma vez que não existe um marcador hormonal único capaz de diagnosticar RED-S ou determinar isoladamente uma adaptação inadequada ao exercício. O histórico de treinamento, alterações de desempenho, fadiga, recuperação, ingestão energética e manifestações clínicas devem ser integrados aos exames com-

plementares quando indicados. Os valores já citados de aproximadamente 45 kcal/kg de massa livre de gordura/dia e ≤ 30 kcal/kg de massa livre de gordura/dia antes associados a alterações fisiológicas em estudos experimentais não constituem atualmente pontos definitivos de corte diagnósticos universais (MOUNTJOY *et al.*, 2023; CARRARD *et al.*, 2022).

A resposta metabólica ao exercício também constitui componente fundamental dessa avaliação. A contração muscular estimula a captação de glicose por mecanismos que não dependem exclusivamente da sinalização da insulina, favorecendo a utilização de glicose durante o esforço. Após o exercício, a sensibilidade à insulina permanece aumentada por aproximadamente 48 horas, demonstrando que os efeitos metabólicos do treinamento ultrapassam o período imediato da sessão. Dessa forma, a interpretação de parâmetros glicêmicos e de sensibilidade à insulina deve considerar o intervalo entre o exercício e a avaliação laboratorial (SYLOW *et al.*, 2017).

A comunicação entre o músculo e os demais órgãos acrescenta outra dimensão à endocrinologia do exercício. As miocinas são moléculas produzidas pelo músculo esquelético em resposta à atividade contrátil e podem atuar de maneira autócrina, parácrina e endócrina. Por meio dessa comunicação, o músculo participa da regulação do metabolismo energético e influencia tecidos como fígado, tecido adiposo e sistema nervoso. Assim, o músculo não deve ser compreendido apenas como órgão responsável pela execução do movimento, mas também como importante órgão endócrino envolvido na adaptação sistêmica ao exercício (SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

O metabolismo energético muscular apresenta relação direta com a intensidade e a duração do exercício. Durante o esforço, carboidra-

tos e lipídios são utilizados em proporções variáveis, de acordo com a demanda energética e as condições fisiológicas. A disponibilidade de substratos influencia a capacidade de sustentar o exercício e participa da sinalização responsável pelas adaptações posteriores. Dessa forma, uma programação adequada do treinamento deve considerar não apenas o estímulo mecânico, mas também a capacidade metabólica de fornecer energia e recuperar os sistemas envolvidos (HARGREAVES; SPRIET, 2020).

Quando a relação entre estímulo e recuperação é inadequada, podem surgir alterações persistentes de desempenho e fadiga. Entretanto, a identificação da síndrome de *overtraining* permanece essencialmente clínica e exige exclusão de outras causas possíveis. Alterações hormonais isoladas apresentam utilidade limitada para estabelecer o diagnóstico, sendo necessária a integração entre desempenho, carga de treinamento, recuperação, sintomas e avaliação clínica. O tratamento, portanto, não consiste na administração de um hormônio específico, mas na correção do desequilíbrio entre estímulo e recuperação (MEEUSEN *et al.*, 2013; CARRARD *et al.*, 2022).

No contexto da baixa disponibilidade energética, o tratamento deve priorizar a restauração da disponibilidade energética e a adequação da carga de exercício. Dependendo da gravidade das manifestações, pode ser necessária redução temporária do volume ou da intensidade do treinamento, associada à adequação nutricional e acompanhamento multidisciplinar. O objetivo não é simplesmente normalizar um marcador laboratorial, mas recuperar as funções fisiológicas comprometidas e permitir retorno progressivo e seguro ao treinamento (MOUNTJOY *et al.*, 2023).

Em suma, a abordagem terapêutica das alterações endocrinometabólicas relacionadas ao

exercício deve ser individualizada e fundamentada na relação entre energia, treinamento, recuperação e comunicação muscular. A avaliação integrada permite diferenciar adaptações fisiológicas esperadas de respostas associadas à sobrecarga ou à disponibilidade energética inadequada. Nesse modelo, marcadores hormonais e metabólicos funcionam como componentes complementares da avaliação, enquanto o tratamento deve atuar prioritariamente sobre os fatores determinantes da alteração fisiológica, evitando intervenções hormonais indiscriminadas (CARRARD *et al.*, 2022; MOUNTJOY *et al.*, 2023; SEVERINSEN; PEDERSEN, 2020).

CONCLUSÃO

A endocrinologia do exercício evidencia que a prática física constitui um potente estímulo sistêmico capaz de modificar o metabolismo energético, a sinalização hormonal e a comunicação entre diferentes órgãos. As adaptações ao exercício envolvem respostas integradas do músculo esquelético, sistema nervoso, tecido adiposo e demais tecidos, com destaque para o aumento da utilização de substratos energéticos, da captação de glicose e da sensibilidade à insulina. Nesse processo, as miocinas ampliam a função endócrina do músculo, estabelecendo mecanismos de comunicação que contribuem para a adaptação metabólica e para a manutenção da homeostase.

Neste contexto abordado, a resposta ao exercício, entretanto, depende do equilíbrio entre estímulo, disponibilidade energética e recuperação. A exposição excessiva à carga de treinamento, especialmente quando acompanhada de recuperação insuficiente ou baixa disponibilidade energética, pode comprometer as adaptações fisiológicas e resultar em alterações metabólicas, hormonais e funcionais. Nesse contexto, a RED-S representa uma manifestação

sistêmica da inadequação energética, enquanto a síndrome de *overtraining* está relacionada à incapacidade de recuperação adequada diante da carga imposta. O diagnóstico dessas condições não deve depender de um único hormônio ou exame, sendo necessária uma avaliação integrada de desempenho, treinamento, recuperação, estado energético, manifestações clínicas e parâmetros metabólicos.

Assim, o exercício deve ser compreendido simultaneamente como estímulo fisiológico, metabólico e endócrino, cuja resposta depende da adequada interação entre treinamento, substratos energéticos e recuperação. A avaliação

endocrinológica permite identificar adaptações favoráveis e reconhecer precocemente respostas inadequadas, enquanto o tratamento deve priorizar a correção dos fatores determinantes, com ajuste da carga, recuperação adequada e restauração da disponibilidade energética quando necessário. Logo, A compreensão desses mecanismos reforça que a endocrinologia do exercício não se limita ao estudo das alterações hormonais, mas abrange uma complexa rede de comunicação e adaptação responsável pelos efeitos sistêmicos do exercício sobre saúde, desempenho e homeostase.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARRARD, J. *et al.* Diagnosing overtraining syndrome: a scoping review. *Sports Health*, v. 14, p. 665, 2022. doi: 10.1177/19417381211044739.
- CARTEE, G.D. *et al.* Exercise promotes healthy aging of skeletal muscle. *Cell Metabolism*, v. 34, p. 677, 2022. doi: 10.1016/j.cmet.2016.05.007.
- FUJIKAWA, T. *et al.* The hypothalamic regulation of metabolic adaptations to exercise. *Journal of Neuroendocrinology*, v. 29, e12533, 2017. doi: 10.1111/jne.12533.
- HARGREAVES, M. & SPRIET, L.L. Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature Metabolism*, v. 2, p. 817, 2020. doi: 10.1038/s42255-020-0251-4.
- MEEUSEN, R. *et al.* Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, v. 45, p. 186, 2013. doi: 10.1249/MSS.0b013e318279a10a.
- MOUNTJOY, M. *et al.* 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (REDs). *British Journal of Sports Medicine*, v. 57, p. 1073, 2023. doi: 10.1136/bjsports-2023-106994.
- SEVERINSEN, M.C.K. & PEDERSEN, B.K. Muscle-organ crosstalk: the emerging roles of myokines. *Endocrine Reviews*, v. 41, p. 594, 2020. doi: 10.1210/endrev/bnaa016.
- SYLOW, L. *et al.* Exercise-stimulated glucose uptake: regulation and implications for glycaemic control. *Nature Reviews Endocrinology*, v. 13, p. 133, 2017. doi: 10.1038/nrendo.2016.162.