

LEONARDO TEOTONIO

**EFEITOS DO EXERCÍCIO FATIGANTE GERAL NA RECUPERAÇÃO DO
CONTROLE POSTURAL DE ADULTOS JOVENS**

BAURU
2025

Leonardo Teotonio

**EFEITOS DO EXERCÍCIO FATIGANTE GERAL NA RECUPERAÇÃO DO
CONTROLE POSTURAL DE ADULTOS JOVENS**

Orientador: Dr. Tiago Penedo

Co-orientador: Dr. Fabio Augusto Barbieri

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” - Câmpus de Bauru,
para obtenção do grau de Bacharel em
Educação Física.

**BAURU
2025**

T314e

Teotonio, Leonardo

Efeitos do exercício fatigante geral na recuperação do controle postural de adultos jovens / Leonardo Teotonio. -- Bauru, 2025
21 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Educação Física) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências,
Bauru

Orientador: Tiago Penedo

Coorientador: Fabio Augusto Barbieri

1. Controle postural. 2. Fadiga. 3. Centro de pressão. 4. Exercício
geral. I. Título.

RESUMO

A fadiga muscular perturba o sistema de controle postural, exigindo maior demanda dos mecanismos sensório-motores responsáveis pela manutenção do equilíbrio. Neste sentido, a fadiga induzida pelo exercício altera o controle postural, aumentando a oscilação corporal. Estudos anteriores mostraram que o exercício fatigante localizado deixa efeitos residuais ao controle postural de adultos jovens. Entretanto, a recuperação do controle postural após a realização do exercício fatigante geral ainda é pouco conhecida. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi analisar os efeitos de um exercício fatigante geral sobre a recuperação (de curto e longo prazo) do controle postural de adultos jovens. Dezenove participantes realizaram corrida incremental em esteira até a exaustão, sendo avaliados quanto à força muscular máxima (indicativo de fadiga muscular) e aos parâmetros do controle postural derivados do centro de pressão (CoP) antes do exercício, imediatamente após, aos 5 e 20 minutos, e entre 48 e 192 horas. Os dados foram analisados por ANOVA *one-way*, com fator para momento ($p < 0,05$). Imediatamente após o protocolo de fadiga, observou-se uma redução significativa na força (N), quando comparado ao momento pré-exercício ($p < 0,001$), confirmando a condição de fadiga neuromuscular. Entretanto, a partir de 5 minutos, nota-se uma recuperação gradual da força, evidenciando a retomada da capacidade contrátil. Em relação ao controle postural, os resultados demonstraram aumento imediato da velocidade anteroposterior e médio-lateral do CoP, quando comparado ao pré-exercício ($p < 0,001$), indicando perturbação aguda no controle postural. Porém, observou-se recuperação rápida dos parâmetros do CoP em aproximadamente vinte minutos, sugerindo reorganização neuromuscular eficiente e possível contribuição compensatória dos sistemas sensoriais para restabelecer a estabilidade. Não foram verificadas alterações relevantes nas avaliações tardias de 48h, 120 e 192h, o que indica ausência de efeitos residuais prolongados da corrida incremental, diferentemente do que pode ocorrer em modelos de fadiga com maior potencial de dano estrutural, como a fadiga muscular localizada. Conclui-se que a corrida incremental provoca instabilidade postural imediata, porém de curta duração, reforçando a capacidade adaptativa do sistema de controle postural diante desse modelo de exercício. Esses achados destacam os minutos iniciais pós-esforço como período crítico de maior risco para desequilíbrios e possíveis quedas, especialmente em contextos esportivos e ocupacionais que exigem

respostas motoras seguras e precisas. Pesquisas futuras devem comparar diferentes modelos de exercício fatigante e incorporar medidas complementares para ampliar a compreensão dos mecanismos envolvidos na recuperação do equilíbrio após o exercício.

Palavras-chaves: controle postural; fadiga; centro de pressão; exercício geral.

ABSTRACT

Muscle fatigue disrupts the postural control system, increasing the demand on sensorimotor mechanisms responsible for maintaining balance. In this context, exercise-induced fatigue alters postural control by increasing body sway. Previous studies have shown that localized fatiguing exercise produces residual effects on the postural control of young adults; however, the recovery of postural control following general fatiguing exercise remains poorly understood. The aim of this undergraduate thesis was to analyze the effects of a general fatiguing exercise on the short- and long-term recovery of postural control in young adults. Nineteen participants performed an incremental treadmill running test to exhaustion and were evaluated for maximal muscle strength (as an indicator of neuromuscular fatigue) and postural control parameters derived from the center of pressure (CoP) before exercise, immediately after, at 5 and 20 minutes, and between 48 and 192 hours. Data were analyzed using one-way ANOVA with time as a factor ($p < 0.05$). Immediately after the fatiguing protocol, a significant reduction in maximal strength (N) was observed compared with the pre-exercise condition ($p < 0.001$), confirming the presence of neuromuscular fatigue. From 5 minutes onward, strength values showed gradual recovery, indicating the restoration of contractile capacity. Regarding postural control, results demonstrated an immediate increase in anteroposterior and mediolateral CoP velocity compared with pre-exercise values ($p < 0.001$), indicating an acute disturbance in postural stability. However, CoP parameters returned to baseline within approximately 20 minutes, suggesting efficient neuromuscular reorganization and possible compensatory contributions from sensory systems to restore stability. No meaningful changes were observed at the delayed assessments (48h, 120h, and 192h), indicating the absence of prolonged residual effects following incremental running, unlike what may occur in fatigue models with greater structural damage potential, such as localized muscle fatigue. In conclusion, incremental running induces immediate but short-lasting postural instability, reinforcing the adaptive capacity of the postural control system in response to this exercise model. These findings highlight the initial minutes post-exercise as a critical period of increased risk for imbalance and potential falls, especially in athletic and occupational environments that require safe and precise motor responses. Future research should compare different fatiguing exercise models

and incorporate complementary measures to advance the understanding of mechanisms involved in post-exercise balance recovery.

Keywords: postural control; fatigue; center of pressure; general exercise.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. CONTROLE POSTURAL	4
2.2. FADIGA MUSCULAR	5
2.3. EFEITO DA FADIGA NO CONTROLE POSTURAL	7
2.3.1 EFEITOS IMEDIATO	8
2.3.2 EFEITO DE CURTA DURAÇÃO	9
2.3.3 EFEITO DE LONGA DURAÇÃO	10
3. MÉTODOS	10
3.1. PARTICIPANTES	10
3.2. DESENHO EXPERIMENTAL	11
3.3. PROTOCOLO DE CONTROLE POSTURAL	13
3.4. PROTOCOLO DE CVM	13
3.5. PROTOCOLO DE EXERCÍCIO FATIGANTE GERAL	14
3.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA	14
4. RESULTADOS	15
4.1. CARACTERÍSTICAS DOS PARTICIPANTES	15
4.2. FADIGA MUSCULAR E RECUPERAÇÃO	16
4.3. EFEITOS DA FADIGA SOBRE OS PARÂMETROS DO COP	16
5. DISCUSSÃO	19
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
7. REFEÊNCIAS	20

1. INTRODUÇÃO

O controle postural é um componente essencial para a realização de atividades motoras cotidianas, como a manutenção da postura em pé parado em uma fila, ou então em um cenário esportivo, manter a postura estática durante o tiro ao alvo. A eficácia do controle postural depende da integração entre sistemas sensoriais e motores, que permitem ajustes rápidos e precisos para estabilizar o corpo (LIN *et al.*, 2009a). Sob o efeito da fadiga muscular, especialmente após a realização de exercícios intensos (i.e., fadiga induzida pelo exercício), esses sistemas sensoriais sofrem prejuízos, gerando dificuldade na manutenção da estabilidade pelo aumento da oscilação postural (LIN *et al.*, 2009a).

A fadiga neuromuscular exige do sistema nervoso central (SNC) a adoção de mecanismos compensatórios, como maior dependência de informações visuais ou alterações nos padrões de ativação muscular (BARBIERI *et al.*, 2019). No caso de exercícios gerais, como a corrida em esteira, observa-se uma sobrecarga sistêmica que impacta não apenas a força muscular, mas também a capacidade de realizar ajustes finos de equilíbrio, tornando o controle postural mais suscetível à déficits (GUIDETTI *et al.*, 2011; DEGACHE *et al.*, 2014). Embora a literatura já tenha demonstrado que os efeitos imediatos da fadiga aumentam a instabilidade postural (DUARTE; FREITAS, 2010; NARDONE *et al.*, 1997), ainda existem lacunas importantes sobre a duração desses efeitos e sobre o processo de recuperação da estabilidade ao longo do tempo após esforços exaustivos. Evidências recentes indicam que esses prejuízos podem se estender por horas ou até dias após a atividade, caracterizando efeitos tardios que comprometem a eficiência do sistema de controle postural mesmo após a recuperação parcial da força muscular (AMIRI *et al.*, 2024; NARDON *et al.*, 2025).

Efeitos residuais causados pelo exercício fatigante como a dor muscular de início tardio (DOMS), comuns entre 24 a 72 horas após exercícios fatigantes, podem agravar a instabilidade postural, uma vez que a dor e a rigidez muscular alteram os padrões de ativação muscular e reduzem a sensibilidade proprioceptiva (CHEUNG; HEMMINGS; MAXWELL, 2003; TORRES *et al.*, 2012). Esses efeitos gerados pela DOMS começam a apresentar uma redução gradual entre 120 a 192 horas após o esforço físico (EBBELING; CLARKSON, 1989; LEWIS; RUBY; BUSH-JOSEPH, 2012; THOMAS *et al.*, 2017), sugerindo que o impacto da fadiga muscular sobre o equilíbrio

corporal não se restringe ao período imediato, mas pode influenciar a recuperação postural em médio e longo prazo.

Compreender esses mecanismos é relevante tanto do ponto de vista científico quanto prático. Alterações prolongadas no controle postural podem aumentar o risco de quedas e comprometer o desempenho em contextos que exigem alta demanda física, como o durante atividades esportivas e ocupacionais (PENEDO *et al.*, 2021a). Dessa forma, investigar a recuperação do controle postural após fadiga induzida por exercício geral pode fornecer subsídios para estratégias de prevenção de instabilidade e ampliar o conhecimento sobre a recuperação neuromuscular.

Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: “Quais são os efeitos de um protocolo de exercício fatigante geral na recuperação do controle postural de adultos jovens saudáveis?” Portanto, o objetivo deste estudo é analisar os efeitos de curta e longa duração de um protocolo de exercício fatigante geral sobre o controle postural de adultos jovens. As hipóteses propostas são: i) o exercício fatigante geral aumentará a oscilação postural imediatamente após sua realização; ii) déficits no controle postural persistirão em curto prazo (até 20 minutos), ainda que haja sinais de recuperação parcial; iii) em longo prazo (48h a 192h), espera-se que ocorram alterações compensatórias nos padrões de oscilação postural, caracterizadas pela recuperação do controle postural (i.e., redução da oscilação corporal) juntamente com a recuperação da força muscular.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Controle Postural

O controle postural é definido pela capacidade em manter, alcançar e restaurar um estado de equilíbrio durante tarefas estáticas e dinâmicas (WINTER, 1995). Esse processo é altamente complexo e envolve a integração precisa entre os sistemas sensoriais (visual, vestibular e somatossensorial), o SNC e os sistemas musculoesqueléticos responsáveis pela execução motora (SHUMWAY-COOK e WOOLLACOTT, 2017).

Durante a postura ereta, o corpo humano está constantemente exposto a perturbações internas, como os movimentos respiratórios e batimentos cardíacos, bem como a perturbações externas discretas, como a força da gravidade. Essas condições exigem ajustes contínuos do sistema de controle postural, regulados por mecanismos de *feedback* e *feedforward*, cuja eficácia depende da integridade

funcional dos sistemas sensoriais envolvidos para manter a estabilidade (WINTER, 1995). Dessa forma, a regulação postural eficiente permite a realização segura de atividades do cotidiano e de tarefas como práticas esportivas ou operacionais.

Uma das formas mais utilizadas para mensurar o controle postural é a análise do centro de pressão (CoP), que representa o ponto médio de todas as forças de reação vertical exercidas na base de suporte (IVANENKO e GURFINKEL, 2018). Durante a postura bípede, o corpo oscila em múltiplas direções, refletindo os esforços do SNC para manter o equilíbrio (WINTER, 1995). Para que o controle postural seja eficaz, o CoP deve permanecer dentro dos limites de estabilidade, os quais são determinados pela base de suporte formada pela área de contato dos pés com o solo (WINTER, 1995; IVANENKO e GURFINKEL, 2018). Esses limites são definidos pela capacidade biomecânica, sensorial e motora do indivíduo de deslocar o CoP sem perder o equilíbrio, sendo influenciados por fatores como a posição dos pés, a largura da base de suporte e a capacidade neuromuscular de realizar ajustes rápidos para corrigir oscilações (HORAK, 2006; SHUMWAY-COOK; WOOLLACOTT, 2017). Quando o CoP se aproxima dos limites da base de suporte, a necessidade de correções posturais se intensifica para evitar quedas ou instabilidade excessiva.

Entretanto, esse processo de correção pode ser comprometido por fatores transitórios, como a fadiga muscular, que reduz a eficiência dos ajustes motores e prejudica a integração sensório-motora. Dessa forma, a fadiga muscular se apresenta como um estado temporário capaz de atrapalhar o funcionamento do sistema de controle postural.

2.2. Fadiga Muscular

A fadiga muscular é um fenômeno neurofisiológico complexo, caracterizado pela redução da capacidade de um músculo ou grupo muscular em gerar força ou potência ao longo do tempo, como resultado de uma atividade física intensa e prolongada (MILLET et al., 2011). Entretanto, sua manifestação não se limita à queda da força máxima, pois repercute em diversos níveis do desempenho motor, comprometendo a precisão, a coordenação e a manutenção do controle postural (NORDIN; DOYLE, 2010).

Trata-se de um processo reversível e de natureza multifatorial, influenciado tanto por mecanismos centrais, relacionados ao SNC, quanto por mecanismos periféricos, vinculados à capacidade contrátil dos músculos (GIBBONS *et al.*, 2011;

ENOKA; DUCHATEAU, 2017). Mais especificamente, a fadiga central refere-se a alterações que ocorrem no SNC e afetam a ativação voluntária dos músculos. Está associada à redução da excitabilidade cortical, modificações nos padrões de recrutamento motor e diminuição da motivação ou do drive neural necessário para manter a contração muscular (GOBERT; NOËL, 2021). Por outro lado, a fadiga periférica está relacionada a mecanismos locais da fibra muscular, como a depleção de ATP (Adenosina Trifosfato) e glicogênio, acúmulo de metabólitos (lactato, íons H^+ , fosfato inorgânico), e falhas na transmissão das unidades motoras (ALLEN; LANNERGREN; WESTERBLAD, 2008). Ambos os tipos de fadiga interagem entre si: a fadiga periférica gera sinais aferentes que modulam a atividade central, enquanto a fadiga central pode limitar o comando neural, restringindo a performance muscular mesmo quando as reservas periféricas ainda não estão totalmente esgotadas (ENOKA; DUCHATEAU, 2017).

A fadiga pode ser induzida por diferentes tipos de exercício, que variam em função da intensidade, da duração e do grupo muscular envolvido. Exercícios localizados, como contrações isométricas sustentadas de quadríceps ou flexores plantares, induzem fadiga em grupos musculares específicos, impactando diretamente a força e a resistência local (DEMURA; UCHIYAMA, 2009). Já os exercícios gerais, como corrida em esteira, ciclismo ou exercícios funcionais envolvendo grandes grupos musculares, produzem fadiga sistêmica, que afeta não apenas a musculatura alvo, mas também a coordenação global e a estabilidade postural (NORDIN; DOYLE, 2010; GUIDETTI *et al.*, 2011). Além disso, atividades de alta intensidade e curta duração, como *sprints* ou esforços máximos, tendem a gerar acúmulo rápido de metabólitos, resultando em fadiga predominantemente periférica. Já atividades de longa duração, como corridas prolongadas ou exercícios de *endurance*, estão mais associadas à fadiga central, pelo envolvimento de fatores metabólicos e neurais relacionados ao SNC (MILLET *et al.*, 2011).

Outro fator a ser considerado é a DOMS. A DOMS caracteriza-se por dor, rigidez e sensibilidade muscular, resultantes de microlesões estruturais nas fibras musculares e do processo inflamatório subsequente, envolvendo edema, infiltração de células inflamatórias e aumento da permeabilidade da membrana celular (CHEUNG; HEMMINGS; MAXWELL, 2003; TORRES *et al.*, 2012). O aparecimento e o pico dos sintomas relacionados à DOMS são frequentemente observados entre 24 a 72 horas após exercícios gerais de alta intensidade ou longa duração. Evidências

científicas indicam que a recuperação dos processos inflamatórios, da integridade das fibras e da função neuromuscular ocorre de maneira gradual e pode prolongar-se por vários dias, com alterações perceptuais e funcionais persistindo até aproximadamente 120 a 192 horas após um estímulo fatigante (BYRNE; TWIST; ESTON, 2004; HOWATSON; VAN SOMEREN, 2008). Trata-se, portanto, de um fenômeno fisiológico que, apesar de transitório, pode prolongar os efeitos da fadiga muscular além do período imediato do exercício, interferindo temporariamente na função contrátil e no desempenho motor global.

A avaliação da fadiga é geralmente realizada pela mensuração da força durante uma contração voluntária máxima (CVM), em que a redução da força após o esforço representa um marcador objetivo do estado de fadiga (ENOKA; DUCHATEAU, 2017). A partir desses instrumentos de avaliação, é possível identificar não apenas a queda de desempenho muscular, mas também compreender como essa queda repercute em funções motoras mais complexas, como o controle postural. Assim, a investigação dos efeitos da fadiga sobre o controle postural torna-se fundamental, uma vez que o comprometimento temporário da função muscular pode afetar diretamente a capacidade do sistema nervoso central em realizar ajustes finos de estabilidade.

2.3. Efeito da Fadiga no Controle Postural

O estado de fadiga muscular compromete diretamente a eficácia do controle postural, uma vez que interfere em três níveis fundamentais: percepção sensorial, integração central e resposta motora (BARBIERI et al., 2019). Esses elementos, quando prejudicados, reduzem a precisão das informações proprioceptivas, retardam a resposta motora, diminuem a capacidade de realizar ajustes posturais rápidos e geram uma queda na eficiência dos músculos estabilizadores (BARBIERI et al., 2019).

No âmbito sensorial, a fadiga compromete principalmente a precisão das informações proprioceptivas. Alterações na sensibilidade dos fusos musculares e nos mecanorreceptores articulares reduzem a acurácia da informação transmitida ao SNC sobre a posição e o movimento corporal (GOBERT; NOËL, 2021). Esse déficit gera inconsistências no mapeamento postural interno, dificultando a execução de ajustes precisos para manter o equilíbrio.

No nível da integração central, a fadiga aumenta o tempo de processamento das informações sensoriais e reduz a eficiência das respostas do SNC. Estudos

demonstram que, sob fadiga, há atraso na geração de reflexos posturais automáticos e diminuição na capacidade de selecionar estratégias adequadas frente a perturbações, o que compromete a estabilidade global (BARBIERI *et al.*, 2019).

Por fim, no plano motor, a fadiga reduz a eficiência dos músculos estabilizadores, como os flexores plantares, quadríceps e musculatura do tronco, fundamentais para ajustes rápidos e sustentação do equilíbrio. Isso se reflete em menor força de resposta, maior rigidez articular compensatória e aumento da oscilação do CoP (PENEDO *et al.*, 2021a). Além disso, a fadiga pode induzir uma mudança na estratégia de controle, com transição do padrão tornozelo - quadril, refletindo a tentativa de recrutar músculos proximais para compensar a diminuição da eficiência dos músculos distais (HORAK; MACPHERSON, 1996). Esse conjunto de alterações gera um quadro caracterizado por aumento da oscilação corporal, instabilidade acentuada e maior risco de desequilíbrios. Tais efeitos, no entanto, não ocorrem de maneira uniforme, podem variar de acordo com o tipo de exercício realizado, sua intensidade e duração, bem como as características individuais, como idade, nível de treinamento e estado de fadiga prévio.

Diante disso, torna-se essencial compreender os efeitos da fadiga sobre o controle postural em diferentes momentos após o exercício. Entre eles, os efeitos imediatos, observados logo após a instalação da fadiga, que representam a manifestação mais aguda e intensa da instabilidade postural.

2.3.1 Efeitos Imediatos

Os efeitos imediatos da fadiga muscular sobre o controle postural têm sido amplamente documentados. Logo após a realização do exercício fatigante, observa-se um aumento expressivo nos parâmetros lineares do CoP, como a área, deslocamento e velocidade média. Esses achados indicam comprometimento tanto periférico quanto central (APRIGIO *et al.*, 2020; BARBIERI *et al.*, 2019; DEMURA; UCHIYAMA, 2009; DEGACHE *et al.*, 2020; PENEDO *et al.*, 2021). Além disso, essas alterações refletem uma diminuição da precisão proprioceptiva e um atraso na ativação muscular, o que leva o SNC a apresentar maior dificuldade em integrar e processar informações sensoriais de forma eficiente. Esse comprometimento resulta em instabilidade corporal e aumento da oscilação postural (NORDIN; DOYLE, 2010; GOBERT; NOËL, 2021).

Diante dessas evidências, torna-se relevante compreender como o sistema de controle postural se comporta após esse período inicial de instabilidade, especialmente durante as fases em que os processos de recuperação sensório-motora começam a ocorrer de forma gradual.

2.3.2 Efeitos de Curta Duração

Estudos sugerem que, embora algumas funções proprioceptivas comecem a se recuperar rapidamente, os ajustes posturais e a capacidade de realizar ajustes motores finos permanecem comprometidos (GOBERT e NOËL, 2021).

O exercício fatigante pode provocar alterações transitórias de curta duração, cuja duração varia entre cinco (DEMURA; UCHIYAMA, 2009; NARDONE *et al.*, 1997) e 21 minutos (PLINE; MADIGAN; NUSSBAUM, 2006) após a atividade. Esses efeitos se manifestam principalmente pelo aumento da área do CoP, que se mantém elevada entre cinco a oito minutos (DEMURA; UCHIYAMA, 2009; NARDONE *et al.*, 1998), e pelo aumento da velocidade média do CoP, com alterações observadas entre oito e 21 minutos (FOX *et al.*, 2008; PLINE; MADIGAN; NUSSBAUM, 2006), indicando maior instabilidade corporal nesse período.

Um estudo adicional (NODA; DEMURA, 2006) demonstrou um aumento imediato na velocidade média e no desvio padrão do CoP, mas um curto período de recuperação, de aproximadamente cinco minutos, foi suficiente para retorno aos valores de linha de base (i.e., antes da fadiga muscular). Esses achados reforçam que o efeito de curta duração da fadiga muscular no controle postural se expressa de forma temporária e variável conforme o parâmetro analisado, representando uma fase crítica de instabilidade em que a capacidade de manter o equilíbrio encontra-se transitoriamente comprometida.

Assim, embora a recuperação inicial ocorra em poucos minutos, parte das adaptações neuromusculares e sensoriais provocadas pela fadiga pode perdurar além desse período, afetando de maneira mais sutil e prolongada a estabilidade corporal. Essa continuidade de alterações sugere que os mecanismos de controle postural permanecem em processo de reorganização mesmo após o restabelecimento aparente do equilíbrio, o que destaca a importância de investigar os efeitos de longa duração da fadiga sobre o controle postural e compreender como se dá a recuperação completa da estabilidade ao longo de horas ou dias após o exercício.

2.3.3 Efeitos de Longa Duração

Embora grande parte das pesquisas tenha se concentrado nos efeitos imediatos da fadiga muscular, observa-se um crescente interesse em compreender os efeitos de longa duração, caracterizados pela persistência de alterações no controle postural por mais de 24 horas após o exercício. A literatura aponta que esses efeitos residuais são mais frequentemente observados após exercícios localizados, principalmente aqueles que induzem fadiga em grupos musculares específicos, como flexores plantares e extensores de joelho. Nesses casos, verificam-se aumentos no deslocamento total e nas velocidades médias do CoP, que podem permanecer alterados por períodos entre 24 e 48 horas, sugerindo uma recuperação mais lenta da estabilidade corporal e da função neuromuscular (PENEDO *et al.*, 2022).

Em contrapartida, ainda são limitadas as evidências sobre efeitos prolongados decorrentes de exercícios gerais, como a corrida em esteira, que envolvem múltiplos grupos musculares e geram fadiga de caráter central. Estudos com esse tipo de protocolo geralmente relatam efeitos imediatos e de curta duração, com recuperação dos parâmetros posturais em poucos minutos após o término da atividade (DEGACHE *et al.*, 2014;2019). Essa diferença pode estar relacionada à distribuição mais ampla da fadiga em exercícios gerais, que reduz a sobrecarga localizada e permite uma recuperação neuromuscular mais eficiente.

Considerando esse cenário, a adoção de avaliações de curto a longo prazo no presente estudo permite contemplar tanto os efeitos imediatos da fadiga quanto a progressão de curto e longo prazo da recuperação, alinhando-se ao período típico de manifestação e dissipação da DOMS descrito na literatura. Essa abordagem temporal abrangente possibilita, ainda, investigar de forma mais robusta a dinâmica da recuperação postural e identificar eventuais efeitos residuais que possam se estender para além das primeiras horas, oferecendo uma compreensão mais completa da persistência ou resolução dos ajustes posturais induzidos pelo exercício geral.

3. MÉTODOS

3.1. Participantes

Participaram do estudo 19 jovens adultos saudáveis, com idade entre 20 e 35 anos. Foram adotados os seguintes critérios de inclusão: não utilizar medicamentos

que pudessem influenciar o controle postural; não apresentar problemas musculoesqueléticos, neuromusculares, doenças cardiorrespiratórias, ou distúrbios de equilíbrio e visão que pudessem impactar os procedimentos experimentais do estudo. Para não serem excluídos do estudo, os participantes deveriam participar de todas as avaliações. Todos os participantes receberam explicações detalhadas sobre os objetivos e as etapas do estudo e confirmaram sua participação assinando o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido. Este estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista (UNESP - Bauru) (CAAE: 33587520.0.0000.5398).

3.2. Desenho experimental

Os participantes do estudo realizaram quatro visitas ao laboratório para a realização dos procedimentos experimentais, a fim de verificar o efeito imediato (T0), o efeito de curto prazo de cinco (T5m) e 20 minutos (T20m), e os efeitos prolongados de 48 (T48h), 120 (T120h) e 192 (T192h) horas após o protocolo de exercício fatigante. Esse intervalo de dias foi definido considerando o momento típico de aparecimento da DOMS, que costuma ocorrer entre 24 e 48 horas após o exercício, atingir seu pico entre 72 e 120 horas e apresentar redução dos sintomas entre 120 e 192 horas posteriores ao exercício fatigante (EBBELING; CLARKSON, 1989; LEWIS; RUBY; BUSH-JOSEPH, 2012; THOMAS *et al.*, 2017). As visitas foram realizadas no mesmo período do dia, de modo a evitar interferências ambientais (por exemplo, temperatura e umidade), e individuais (por exemplo, rotina diária).

Durante a primeira visita, os participantes preencheram uma anamnese e o Questionário Internacional de Atividade Física (IPAQ) (MATSUDO *et al.*, 2001) para identificar o nível de atividade física. Além disso, realizaram a familiarização com o equipamento utilizado para realizar a CVM, cujo ajuste foi feito de acordo com o relato verbal de conforto de cada participante. Em todas as primeiras visitas, os participantes realizaram as tarefas na seguinte ordem: 1) protocolo de avaliação postural; 2) protocolo de CVM; 3) protocolo de exercício fatigante geral; 4) os itens 1 e 2 foram repetidos imediatamente após o exercício fatigante, após 5 minutos (T5m), e após 20 minutos (T20min). Nas três visitas subsequentes (i.e. 48, 120 e 192 horas após, T48h, T120h e T192h respectivamente, foram executados exclusivamente os itens 1 e 2, respectivamente (Figura1).

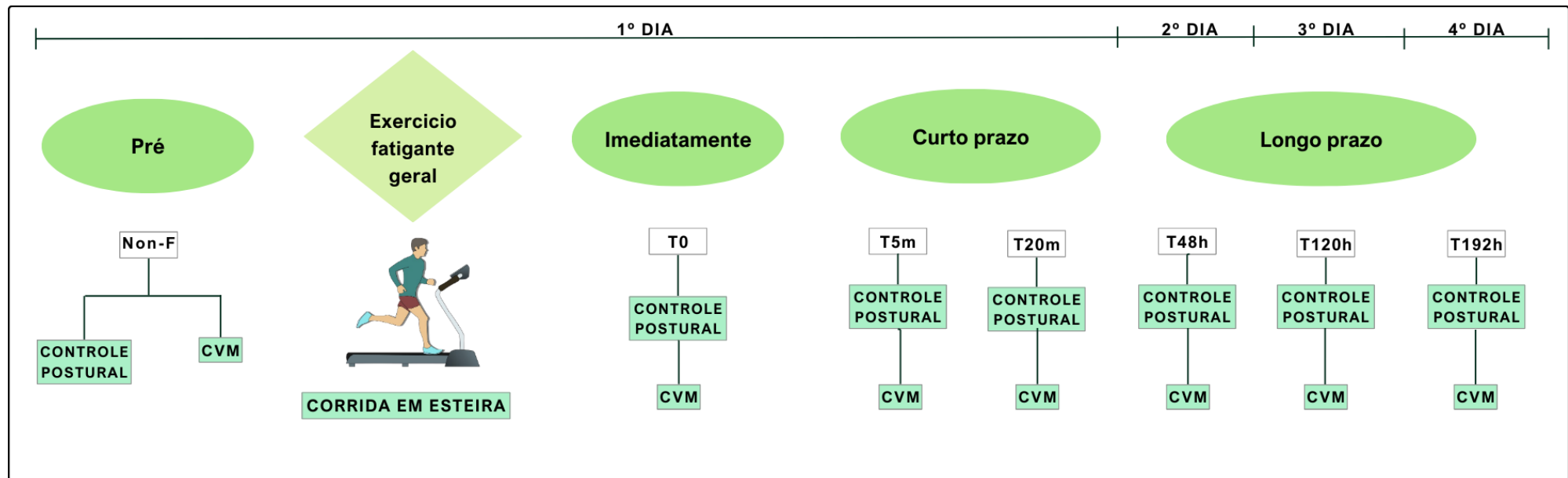


Figura1. Delineamento experimental do estudo. **Non-F** – antes do exercício fatigante; **CVM** – contração voluntária máxima; **T0** – imediatamente após o exercício fatigante. **T5m** – cinco min após o exercício fatigante; **T20m** – 20 min após o exercício fatigante; **T48h** – 48 h após o exercício fatigante; **T120h** – 120 h após o exercício fatigante; **T192h** – 192 h após o exercício fatigante.

3.3. Protocolo de controle postural

O controle postural foi avaliado por uma plataforma de força de 50 cm x 50 cm (AccuGait, Advanced Mechanical Technologies Inc. - AMTI, Boston, MA), com frequência de aquisição em 200 Hz. Os participantes foram avaliados em posição bipodal com os pés descalços e afastados paralelamente à largura do quadril. Eles foram instruídos a permanecer “o mais parado possível” em posição ereta, com os braços estendidos e relaxados ao longo do corpo, e fixar o olhar em um alvo localizado a um metro de distância, na altura dos olhos. Para assegurar a reprodutibilidade da posição dos pés em todas as tentativas e dias de avaliação, o contorno dos pés foi registrado em uma folha de papel. Foi realizada uma tentativa de 120 segundos nos momentos Non-F, T0, T5m, T20m, T48h, T120h e T192h.

Para os dados do controle postural foram coletados os três componentes de força e momentos de força nas direções vertical, anteroposterior e médio-lateral, utilizando o software Netforce (AccuGait, AMTI, Boston, MA). O sinal médio de interesse foi determinado e removido da análise. Os dados foram processados por um filtro digital Butterworth passa-baixa de 4ª ordem, com uma frequência de corte de 5 Hz. O CoP foi calculado, conforme descrito por Marchetti e Corso (2009). As seguintes variáveis do CoP foram analisadas nas direções anteroposterior (AP) e médio-lateral (ML): deslocamento (comprimento do trajeto percorrido pelo CoP na base de suporte); velocidade média (razão entre o deslocamento total e a duração da tentativa); e raiz quadrada média (RMS – variabilidade do CoP ao longo do deslocamento). Além disso, foi calculada a área do CoP (ellipse em 95% dos dados).

3.4. Protocolo de CVM

As CVMs foram realizadas por um exercício de flexão plantar bilateral do tornozelo, realizado em um *Leg Press* adaptado. Os participantes foram posicionados sentados, com os joelhos completamente estendidos (180°) e o quadril flexionado a 90°, mantendo os pés em posição neutra. A angulação articular foi verificada por meio de um goniômetro mecânico, assegurando o posicionamento adequado durante os testes. Durante a execução do protocolo, somente a porção anterior (metade superior) dos pés permaneceu em contato com o *Leg Press*. Para garantir estabilidade e evitar deslocamentos corporais, o tronco dos participantes foi fixado por tiras de velcro ao encosto do equipamento. Em todas as sessões experimentais, os indivíduos foram familiarizados com o equipamento. Os participantes foram instruídos a realizar a CVM

aplicando a maior força e o mais rápido possível, e manter a força máxima por cinco segundos. Foram realizadas duas tentativas em cada momento (Non-F, T0, T5m, T20m, T48h, T120h e T192h), com intervalo de 120 segundos entre cada tentativa.

A mensuração da força gerada nas CVMs foi feita por uma célula de carga de alta precisão (0,98 N), modelo CSA / ZL-500 (MK Controle e Instrumentação Ltda., São Paulo, SP, Brasil), acoplada ao Leg Press. A aquisição do sinal foi realizada por um amplificador analógico conectado a uma placa de aquisição de dados (National Instruments®), e gravada pelo software LabVIEW 2015 (National Instruments Inc., Austin, TX). Os dados de força obtidos foram processados por um filtro digital Butterworth passa-baixa de 4ª ordem, com frequência de corte em 6 Hz. A força (em N) foi determinada pela média dos picos máximos de cada tentativa. A redução observada na produção de força após o exercício foi utilizada como critério para confirmação do estado de fadiga muscular (ENOKA; DUCHATEAU, 2017).

3.5. Protocolo de exercício fatigante geral

Para a realização do protocolo de exercício fatigante geral os participantes realizaram uma corrida incremental em uma esteira motorizada (ATL, Inbrasport, Porto Alegre, Brasil). Após um aquecimento de cinco minutos a 6,0 km/h, o exercício fatigante geral iniciou na velocidade de 6,5 km/h. A velocidade da esteira foi aumentada em 1,6 km/h a cada minuto (por exemplo, 6,5 para 8,1 km/h, 8,1 para 9,7 km/h) até a exaustão voluntária de cada participante. Durante todo o protocolo, os participantes foram verbalmente encorajados a realizarem o máximo esforço, e a cada um minuto de exercício relataram o esforço percebido usando a escala numérica de 6 a 20, sendo 20 a exaustão (BORG, 1982). O tempo limite (Tlim) até a exaustão foi registrado.

3.6 Análise estatística

O nível de significância adotado foi de 0,05 para todas as análises, utilizando-se o software SPSS 22.0 (SPSS, Inc.) para o processamento estatístico. Para avaliar, respectivamente, a normalidade, a esfericidade e a homogeneidade de variâncias, aplicaram-se os testes de Shapiro-Wilk, Mauchly e Levene. Para os parâmetros de interesse relacionados à CVM (força – em N) e ao controle postural (CoP) foram

conduzidas ANOVAs *one-way* com medidas repetidas, considerando como fator o momento de avaliação (Non-F x T0 x T5m x T20m x T48h x T120h x T192h).

4. RESULTADOS

4.1. Características dos participantes

Os 19 participantes do estudo (idade: 27 ± 4 anos [20 – 35]; estatura: $1,76 \pm 0,08$ m [1,63 – 1,96]; massa corporal: $82,96 \pm 16,12$ kg [47,60 – 120,65]; IMC: $26,68 \pm 3,99$ kg/m² [17,92 – 35,25]) concluíram o protocolo de exercício fatigante geral. De acordo com o IPAQ, dez foram fisicamente classificados como “muito ativos” e nove como “ativos” (Tabela1).

Tabela1. Características antropométricas e nível de atividade física dos participantes.

Participante	Idade (anos)	Estatura (m)	Massa corporal (kg)	Índice de massa corporal (kg/m ²)	Nível de atividade física
1	35	1,84	106,3	31,4	Ativo
2	27	1,88	99,1	28,0	Muito ativo
3	20	1,63	47,6	17,9	Muito ativo
4	33	1,74	79,2	26,1	Muito ativo
5	23	1,74	76,7	25,3	Muito ativo
6	30	1,85	120,6	35,2	Ativo
7	29	1,64	77,4	28,8	Muito ativo
8	27	1,70	96,3	26,4	Muito ativo
9	26	1,77	94,0	30,0	Muito ativo
10	26	1,70	81,7	28,2	Muito ativo
11	26	1,83	83,7	25,0	Muito ativo
12	31	1,68	87,6	31,0	Ativo
13	22	1,72	70,7	23,9	Ativo
14	30	1,74	72,6	24,0	Ativo
15	29	1,96	105,2	24,1	Ativo
16	25	1,75	85,7	26,3	Ativo
17	23	1,73	82,6	27,6	Muito ativo
18	20	1,73	58,85	19,7	Ativo
19	30	1,8	96,4	29,8	Ativo

4.2. Fadiga muscular e recuperação

Os participantes permaneceram no exercício fatigante geral por 434 ± 56 s [297 – 525 s] e reportaram níveis de percepção de esforço de $6,0 \pm 0,4$ pts [6 – 7 pts] no momento Non-F e 20 ± 1 pts [17 – 20 pts] no momento T0.

Após o protocolo de fadiga, observou-se uma redução na força (N) (Figura 2). A ANOVA revelou um efeito principal expressivo do momento para a CVM ($F_{(6,13)} = 5,225$; $p < 0,006$), sendo que o teste post hoc indicou valores de força menores em T0 em comparação ao momento Non-F ($p < 0,001$). A partir de T5m, nota-se uma recuperação gradual da força, evidenciando a retomada da capacidade contrátil ao longo do tempo após o declínio imediato observado em T0.

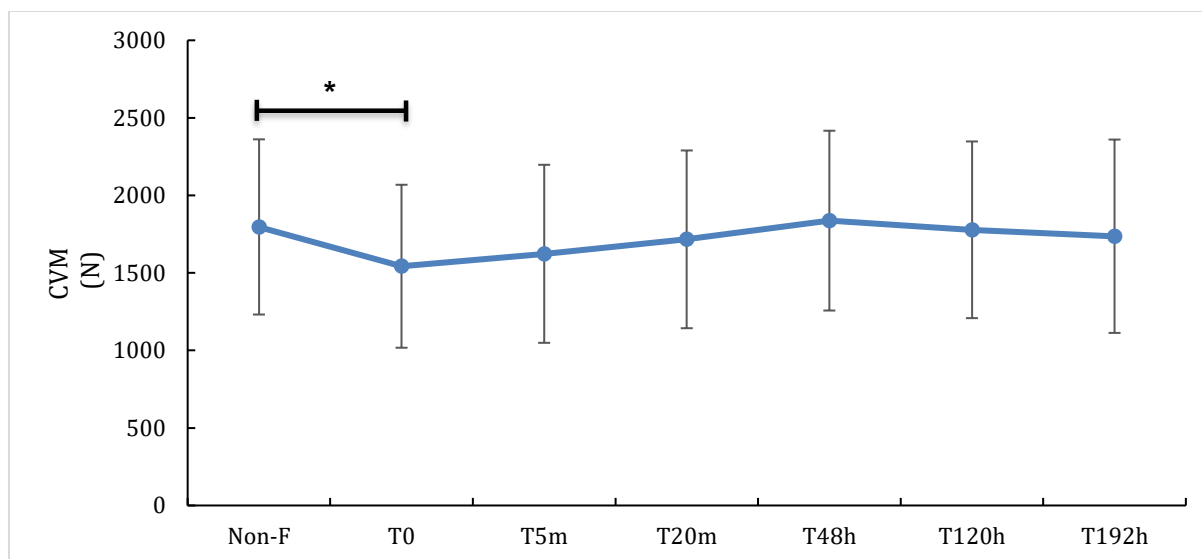


Figura 2. Força (N) produzida durante contrações voluntárias máximas antes (Non-F), imediatamente após (T0), cinco minutos (T5m), vinte minutos (T20m), quarenta e oito horas (T48h), cento e vinte horas (T120h) e cento e noventa e duas horas (T192h) após o protocolo. * - diferença significativa entre os momentos.

4.3. Efeitos da fadiga sobre os parâmetros do CoP

O exercício fatigante geral promoveu aumento da oscilação postural em jovens adultos saudáveis, tanto imediatamente após quanto em momentos posteriores (Figura 2). A análise estatística indicou efeito principal de momento para o desloca-

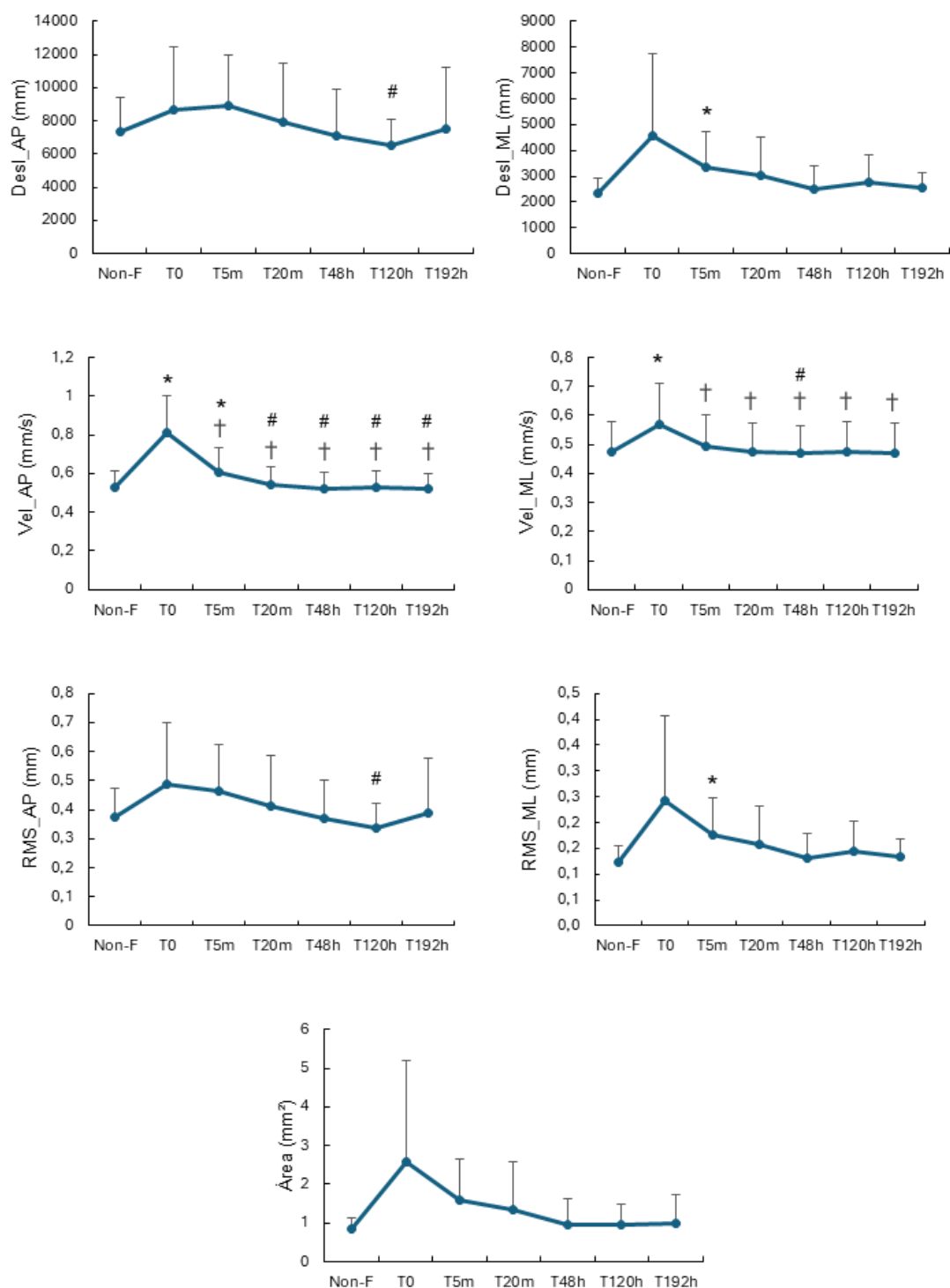


Figura 3. Média e desvio padrão dos parâmetros do centro de pressão antes (Non-F), imediatamente após (T0), cinco minutos (T5m), 20 minutos (T20m), 48 horas (T48h), 120 horas (T120h) e 192 horas (T192h) após o protocolo de fadiga muscular.

* - diferença significativa para o momento Non-F; † - diferença significativa para o momento T0; # - diferença significativa para o momento T5m.

mento AP ($F_{(6,108)} = 3,060$; $p < 0,002$) e ML ($F_{(6,108)} = 6,734$; $p < 0,003$) do CoP, velocidade média AP ($F_{(6,108)} = 49,643$; $p < 0,001$) e ML ($F_{(6,108)} = 33,183$; $p < 0,001$) do CoP, para o RMS AP ($F_{(6,108)} = 4,218$; $p < 0,006$) e ML ($F_{(6,108)} = 7,125$; $p < 0,002$), e para a área ($F_{(6,108)} = 5,992$; $p < 0,007$)

A análise post hoc revelou que o deslocamento AP foi significativamente maior em T5m quando comparado a T120h ($p < 0,005$). O deslocamento ML aumentou em T5m em relação a Non-F ($p < 0,04$). Foi observado também incremento da velocidade média AP em T0 e T5m em relação a Non-F ($p < 0,001$ e $p < 0,01$, respectivamente), uma diminuição em T5, T20m, T48h, T120h e T192h em relação a T0 ($p < 0,001$ para todos), e redução em T20m, T48h, T120h e T192h comparado a T5m ($p < 0,02$; $p < 0,01$; $p < 0,01$; $p < 0,04$, respectivamente). Para a velocidade média ML, foi observado incremento em T0 comparado a Non-F ($p < 0,001$), uma redução em T5m, T20m, T48h, T120h e T192h em relação a T0 ($p < 0,001$ para todos), e diminuição em T48h comparado a T5m ($p < 0,04$). O RMS AP apresentou elevação em T192h em comparação a T5m ($p < 0,004$) e o RMS ML foi mais elevado em T5 comparado à Non-F ($p < 0,004$). A análise post hoc da área não apresentou diferença.

5. DISCUSSÃO

O presente estudo investigou os efeitos de curta e longa duração de um exercício fatigante geral sobre o controle postural de adultos jovens. Conforme hipotetizado, a corrida incremental foi capaz de gerar um impacto imediato na estabilidade corporal, evidenciado pelo aumento de variáveis do CoP e pela redução da força máxima logo após a tarefa. Esses achados confirmam que a intensidade do protocolo foi suficiente para provocar uma perturbação aguda no sistema de controle postural, semelhante ao que tem sido relatado por pesquisas que descrevem déficits imediatos após exercícios intensos (Barbieri et al., 2019; Demura & Uchiyama, 2009).

Em contrapartida, a análise temporal revelou que essa perturbação teve uma curta duração. Entre 5 e 20 minutos após o exercício, observou-se uma normalização progressiva dos parâmetros posturais, indicando que o sistema foi capaz de reorganizar rapidamente suas estratégias de controle. A recuperação paralela da

força máxima sugere que os efeitos observados foram predominantemente decorrentes de fadiga muscular periférica (ALLEN; LAMB; WESTERBLAD, 2008), sem envolvimento substancial de mecanismos centrais. Dessa forma, ao contrário do esperado nas hipóteses de déficits persistentes, o exercício não gerou desequilíbrios prolongados, reforçando a ideia de que a corrida desencadeou uma fadiga de baixa duração e baixo potencial de dano estrutural (FOX *et al.*, 2008).

Essa rápida restauração do equilíbrio pode ser explicada por três fatores principais: (i) a natureza metabólica do exercício, que produz menos danos musculares e, portanto, menor comprometimento aferente de longo prazo (EBBELING; CLARKSON, 1989); (ii) a eficiência do SNC em recrutar unidades motoras adicionais para manter a postura diante do declínio inicial da força (ENOKA; DUCHATEAU, 2017); e (iii) a integridade dos sistemas visual e vestibular, que continuaram a fornecer informações sensoriais estáveis e auxiliaram na compensação de déficits proprioceptivos transitórios (HORAK, 2006; IVANENKO & GURFINKEL, 2018). Em conjunto, esses mecanismos parecem ter contribuído para uma “plasticidade aguda” eficaz, capaz de restaurar o controle postural em poucos minutos.

Os resultados de longo prazo reforçam essa interpretação: não foram observadas alterações significativas no CoP entre 48 e 192 horas quando comparadas ao baseline (antes do exercício fatigante geral). Isso indica que o exercício fatigante geral, diferentemente de protocolos localizados que promovem microlesões musculares (PENEDO *et al.*, 2022), não levou a adaptações compensatórias tardias ou alterações sensório-motoras prolongadas, rejeitando assim as hipóteses relacionadas a efeitos residuais de longa duração.

Algumas limitações do estudo devem ser consideradas. O tipo de exercício aplicado, corrida incremental, pode não ser o mais adequado para induzir déficits persistentes, sobretudo por sua baixa capacidade de gerar dano estrutural comparado ao exercício localizado. Além disso, a ausência de medidas eletromiográficas e de atividade cortical restringe a interpretação mais precisa dos mecanismos neuromusculares envolvidos na rápida recuperação observada. Futuras pesquisas podem explorar diferentes modalidades de exercício, bem como integrar medidas neurofisiológicas, a fim de aprofundar a compreensão sobre as respostas adaptativas do sistema de controle postural à fadiga.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a corrida incremental em esteira provocou uma perturbação imediata no controle postural de adultos jovens, evidenciada por aumento transitório da oscilação corporal e redução da força máxima logo após o esforço. No entanto, esses efeitos mostraram-se de curta duração, com recuperação significativa dos parâmetros posturais em cerca de cinco minutos, sem alterações relevantes entre 48 e 192 horas. Os resultados indicam que, embora o esforço intenso comprometa temporariamente a estabilidade, o sistema de controle postural apresenta rápida capacidade adaptativa, possivelmente sustentada pela preservação dos sistemas sensoriais e pela recomposição neuromuscular pós-exercício. Do ponto de vista prático, recomenda-se atenção aos minutos iniciais após atividades extenuantes, especialmente em contextos esportivos que demandam equilíbrio imediato.

7. REFERÊNCIAS

- ALLEN, D. G.; LAMB, G. D.; WESTERBLAD, H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. **Physiological Reviews**, v. 88, n. 1, p. 287-332, 2008.
- APRIGIO, P. S. C. et al. Lower limb muscle fatigability is not associated with changes in movement strategies for balance control in the upright stance. **Human Movement Science**, v. 70, p. 102588, 2020.
- BARBIERI, F. A. et al. Effects of ankle muscle fatigue and visual behavior on postural control in young adults. **Frontiers in Physiology**, v. 10, p. 643, 2019.
- DEGACHE, F. et al. Alterations in postural control during the world's most challenging mountain ultra-marathon. **PLOS ONE**, v. 9, n. 1, e84554, 2014.
- DEMURA, S.; UCHIYAMA, M. Influence of anaerobic and aerobic exercises on the center of pressure during an upright posture. **JOURNAL OF EXERCISE SCIENCE & FITNESS**, v. 7, n. 1, p. 39-47, 2009.
- DUARTE, M.; FREITAS, S. M. S. F. Revisão sobre posturografia baseada em plataforma de força para avaliação do equilíbrio. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 14, n. June, p. 183-192, 2010.
- EBBELING, C. B.; CLARKSON, P. M. Exercise-Induced Muscle Damage and Adaptation. **Sports Medicine**, 1989.
- ENOKA, R. M.; DUCHATEAU, J. Translating fatigue to human performance. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 48, n. 11, p. 2228-2238, 2017.

- FOX, Z. G. et al. Return of postural control to baseline after anaerobic and aerobic exercise protocols. **Journal of Athletic Training**, v. 43, n. 5, p. 456–463, 2008.
- GIBBONS, C. J. et al. Development of a patient reported outcome measure for fatigue in motor neurone disease: the Neurological Fatigue Index (NFI-MND). **Health and Quality of Life Outcomes**, v. 9, p. 101, 2011.
- GUIDETTI, Laura; BONAVALONTÀ, Vittorio; TESSITORE, Antonio; D'OTTAVIO, Stefano. Effect of different treadmill running speeds on postural stability and physiological parameters. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 25, n. 1, p. 245-251, 2011.
- HORAK, F. B. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? **Age and Ageing**, v. 35, suppl. 2, p. ii7–ii11, 2006.
- HORAK, F. B.; MACPHERSON, J. M. Postural orientation and equilibrium. **Handbook of Physiology**, v. 1, p. 255–292, 1996.
- IVANENKO, Y.; GURFINKEL, V. S. Human postural control. *Frontiers in Neuroscience*, v. 12, p. 171, 2018.
- LIN, D. et al. Acute effects of localized muscle fatigue on postural control and patterns of recovery during upright stance: influence of fatigue location and age. **European Journal of Applied Physiology**, v. 106, n. 3, p. 425–434, 2009.
- MATSUDO, S. et al. Questionário Internacional de Atividade Física (IPAQ): estudo de validade e reprodutibilidade no Brasil. **Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde**, v. 6, n. 2, p. 5-18, 2001.
- MILLET, G. Y. et al. Electrical stimulation for testing neuromuscular function: from sport to pathology. **European Journal of Applied Physiology**, v. 111, p. 2489–2500, 2011.
- NARDONE, A. et al. Time course of stabilometric changes after a strenuous treadmill exercise. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, v. 79, n. 8, p. 920–924, 1998.
- NODA, M.; DEMURA, S.-I. Comparison of quantitative analysis and fractal analysis of center of pressure based on muscle fatigue. **Perceptual and Motor Skills**, v. 102, n. 2, p. 529–542, 2006.
- PENEDO, T. et al. Motor strategy during postural control is not muscle fatigue joint-dependent, but muscle fatigue increases postural asymmetry. **PLOS ONE**, v. 16, n. 2, p. e0247395, 2021.
- PENEDO, T. et al. Ankle muscle fatigability impairs body sway for more than 24 hours. **Journal of Biomechanics**, v. 133, p. 110890, 2022.
- PLINE, K. M.; MADIGAN, M. L.; NUSSBAUM, M. A. Influence of fatigue time and level on increases in postural sway. **Ergonomics**, v. 49, n. 15, p. 1639–1648, 2006.
- WINTER, D. A. Human balance and posture control during standing and walking. **Gait & Posture**, v. 3, n. 4, p. 193–214, 1995.