




EFEITO DA FADIGA NA FORÇA EXPLOSIVA E ARQUITETURA MUSCULAR DO VASTO LATERAL

EFFECT OF FATIGUE ON EXPLOSIVE STRENGTH AND MUSCLE ARCHITECTURE OF THE VASTUS LATERALIS

EFFECTO DE LA FATIGA SOBRE LA FUERZA EXPLOSIVA Y LA ARQUITECTURA MUSCULAR DEL VASTO LATERAL

Matheus Martins de Sousa¹ 
(Fisioterapeuta)


Conrado Torres Laett^{1,2} 
(Profissional de Educação Física)

Ubiratã Faleiro Gavilão^{1,2} 
(Profissional de Educação Física)

Rodrigo Araújo Goes³ 
(Médico Ortopedista)

Carlos Gomes de Oliveira² 
(Engenheiro Eletrônico)

Lenifran de Matos Santos⁴ 
(Profissional de Educação Física)

Sidnei Cavalcante da Silva^{4,5} 
(Profissional de Educação Física)

Victor Rodrigues Amaral Cossich^{1,2,4} 
(Profissional de Educação Física)

1. Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO), Laboratório de Pesquisa Neuromuscular, Divisão de Pesquisa, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

2. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Escola de Educação Física e Desportos (EEFD), Laboratório de Biomecânica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

3. Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO), Centro de Trauma do Esporte, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

4. Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO), Laboratório de Pesquisa em Fisiologia do Exercício, Divisão de Pesquisa, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

5. Universidade Salgado de Oliveira (UNIVERSO), Programa de Pós-graduação em Ciências da Atividade, Niterói, RJ, Brasil.

Correspondência

Victor Cossich
PhD. Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO).
Av. Brasil, 500, Caju, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 20940-070.
victor.cossich@gmail.com

RESUMO

Introdução: Alterações na taxa de desenvolvimento de torque (TDT) e arquitetura muscular causadas pela fadiga são temas pouco investigados. Esta pesquisa avaliou o efeito da fadiga na TDT e arquitetura muscular do vasto lateral (VL). **Métodos:** Dezesete voluntários ($25,5 \pm 6,2$ anos; $177,2 \pm 12,9$ cm; $76,4 \pm 13,1$ kg) realizaram avaliação isocinética de extensão do joelho em $30^\circ/s$ para obtenção do pico de torque (PT-ISK) antes e após uma série de contrações voluntárias isométricas máximas (CVIM) intermitentes (15 reps - 3 s contração, 3 s intervalo) utilizadas para causar fadiga muscular, monitoradas pela frequência mediana (FMD) da eletromiografia do VL, reto femoral e vasto medial. Antes e após o protocolo de fadiga, imagens de ultrassonografia do VL foram obtidas para mensuração da espessura muscular, comprimento de fascículo e ângulo do fascículo. O pico de torque isométrico (PT-ISM) e TDTs em janelas de 50 ms foram calculados para cada CVIM. As TDTs foram calculadas em valores absolutos e normalizadas pelo PT-ISM. **Resultados:** A fadiga foi confirmada devido a reduções significativas da FMD dos três músculos. Após a fadiga, o PT-ISK foi reduzido de $239,0 \pm 47,91$ para $177,3 \pm 34,96$ Nm, e o PT-CVIM de $269,5 \pm 45,63$ para $220,49 \pm 46,94$ Nm. Todos os valores de TDT absolutos apresentaram-se significativamente diferentes após o protocolo de fadiga. Contudo, as TDTs normalizadas não demonstraram diferença significativa. Não foram observadas diferenças significativas na arquitetura muscular do VL. **Conclusões:** A redução da capacidade explosiva ocorreu de maneira concomitante com a redução da força máxima evidenciada pela falta de alterações na TDT normalizada. **Nível de Evidência III.**

Descritores: Força muscular; Dinamômetro Isocinético; Fadiga; Ultrassonografia; Músculo quadríceps; Joelho.

ABSTRACT

Introduction: There has been little research on changes in rate of torque development (RTD) and muscle architecture. This study evaluated the effect of fatigue on RTD and muscle architecture of the vastus lateralis (VL). **Methods:** Seventeen volunteers (25.5 ± 6.2 years; 177.2 ± 12.9 cm; 76.4 ± 13.1 kg) underwent isokinetic knee extension assessment at $30^\circ/s$ to obtain the peak torque (PT-ISK), before and after a set of intermittent maximal voluntary isometric contractions (MVIC) (15 reps - 3 s contraction, 3 s rest) used to promote muscle fatigue, monitored by the median frequency (MDF) of the electromyography from the VL, rectus femoris and vastus medialis muscles. Before and after the fatigue protocol, ultrasound images of the VL were obtained to measure muscle thickness (MT), fascicle length (FL), and fascicle angle (FA). The peak isometric torque (PT-ISM) and the RTDs in 50 ms windows were calculated for each MVIC. The RTDs were reported as absolute values and normalized by the PT-ISM. **Results:** Fatigue was confirmed due to significant reductions in MDF in all three muscles. After the fatigue protocol, the PT-ISK was reduced from 239.0 ± 47.91 to 177.3 ± 34.96 Nm, and the PT-MVIC was reduced from 269.5 ± 45.63 to 220.49 ± 46.94 Nm. All the RTD absolute values presented significant change after the fatigue protocol. However, the normalized RTD did not demonstrate any significant differences. No significant differences were found in the muscle architecture of the VL. **Conclusions:** The reduction in explosive strength occurred concomitantly with the reduction in maximum strength, as evidenced by the lack of changes in normalized TDT. **Level of Evidence III.**

Keywords: Muscle strength; Isokinetic Dynamometer; Fatigue; Ultrasonography; Quadriceps muscle; Knee.

RESUMEN

Introducción: Los cambios en la tasa de desarrollo del torque (TDT) y la arquitectura muscular causada por la fatiga son temas poco investigados. Esta investigación evaluó el efecto de la fatiga en la TDT y la arquitectura muscular del vasto lateral (VL). **Métodos:** 17 voluntarios (25.5 ± 6.2 años; 177.2 ± 12.9 cm; 76.4 ± 13.1 kg) se sometieron a una evaluación isocinética de la extensión de la rodilla a $30^\circ/s$ para obtener el pico de torque (PT-ISK), antes y después de una serie de contracciones voluntarias máximas intermitentes (CVIM) (15 repeticiones - contracción 3 s, intervalo 3 s) utilizadas para causar fatiga muscular, monitoreadas por la frecuencia media (FMD) de la electromiografía VL, recto femoral y vasta medial. Antes y después del protocolo de fatiga, se obtuvieron imágenes de ultrasonido VL para medir el grosor muscular, la longitud del fascículo y el ángulo del fascículo. Se calculó el par isométrico máximo (PT-ISM) y las TDT en ventanas de 50 ms para cada CVIM. Las DTT se calcularon en valores absolutos y se normalizaron mediante



PT-ISM. Resultados: la fatiga se confirmó por reducciones significativas en la fiebre aftosa de los tres músculos. Después de la fatiga, el PT-ISK se redujo de 239.0 ± 47.91 a 177.3 ± 34.96 Nm, y el PT-CVIM de 269.5 ± 45.63 a 220.49 ± 46.94 Nm. Todos los valores absolutos de TDT fueron significativamente diferentes después del protocolo de fatiga. Sin embargo, las TDT normalizadas no mostraron diferencias significativas. No se observaron diferencias significativas en la arquitectura muscular de la LV. Conclusiones: La reducción en la capacidad explosiva ocurrió simultáneamente con la reducción en la fuerza máxima, evidenciada por la falta de cambios en la TDT normalizada. **Nível de evidencia III.**

Descritores: Fuerza muscular; Dinamómetro Isocinético; Fatiga; Ultrasonografía; Músculo cuádriceps; Rodilla.

DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202127062020_0062

Artigo recebido em 29/07/2020 aprovado em 26/04/2021

INTRODUÇÃO

A capacidade de produção de força muscular é comumente mensurada através da força máxima.¹ Contudo, o tempo necessário para gerar força máxima é longo quando comparado às demandas em situações cotidianas e esportivas.²⁻⁴ Por exemplo, durante corrida e saltos, o tempo disponível para produzir força varia entre 80-220 ms,⁵⁻⁶ evidenciando a importância de avaliar a habilidade de produzir força em curtos períodos, a força explosiva.^{2,3} Esta pode ser avaliada através da taxa de desenvolvimento de torque (TDT),^{2,3,7} obtida pela razão entre o torque produzido, em uma contração voluntária isométrica máxima (CVIM), por um período de tempo estabelecido, geralmente entre 50 e 250 ms,^{2,8,9} assim como através do valor máximo (MTDT) obtido pelo cálculo da derivada do sinal de torque.^{10,11} A TDT pode ser subdividida como inicial, quando calculada em períodos ≤ 100 ms e tardia (≥ 200 ms). A TDT inicial é altamente influenciada pelo limiar de recrutamento e a taxa de disparo das unidades motoras,^{12,13} enquanto fatores estruturais da unidade musculotendínea e a força máxima possuem maior influência na tardia.¹⁴ Quando a TDT é expressa normalizada pela força máxima, é possível comparar diferentes indivíduos e/ou grupos musculares, sem que a influência da força máxima seja um viés de análise.²

A fadiga muscular é definida como a redução da capacidade do músculo de produzir determinado nível de força.¹⁵ O aumento da demanda energética, a diminuição da reserva de substratos e o aumento da acidez impedem a ressíntese de adenosina trifosfato (ATP).^{15,16} O ATP é necessário para a formação das pontes-cruzadas, explicando a queda na força sob fadiga.¹⁶ A frequência mediana (FMD) é uma análise espectral do sinal de eletromiografia (EMG) que tem sido utilizada como marcador fisiológico da fadiga muscular.^{15,17} A redução da FMD está associada com a diminuição da velocidade de condução elétrica das fibras musculares em decorrência do aumento da acidez local.¹⁷ De fato, estudos observaram que a fadiga provoca diminuição da FMD.¹⁸ Estudos têm sido conduzidos para entender os efeitos da fadiga na força explosiva, mas o tópico ainda é um debate em aberto.^{7,19} Tendo em vista que existem indícios que indivíduos com maiores TDTs podem estar menos suscetíveis a ocorrência de lesões,⁴ avaliar o efeito da fadiga na TDT é importante para profissionais do treinamento, fisioterapeutas e médicos do esporte que busquem estratégias para redução de risco de lesões.

A arquitetura muscular, definida pelo número e posicionamento dos fascículos no músculo, é um dos principais determinantes da

capacidade de produzir força.²⁰ Estudos relataram alterações agudas no comprimento e inclinação dos fascículos do vasto lateral (VL) após uma série de *legpress* realizado de forma explosiva até a fadiga²¹ e após teste máximo em cicloergômetro.²² Em ambos os casos houve um aumento da espessura muscular (EM) e do ângulo dos fascículos (AF). Além disso, Csapo *et al.*²¹ observaram redução de 1% no comprimento do fascículo (CF). Mitsukawa *et al.*²³ avaliaram o efeito de 60 CVIMs intermitentes de flexão plantar no sóleo e do gastrocnêmio medial, que sofreram um aumento do CF de 13% e 22%, respectivamente. Em conjunto, os resultados sugerem que alterações estruturais agudas podem ocorrer em decorrência da fadiga muscular, mas os efeitos dessas alterações na força, em especial na força explosiva, ainda não são claros.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi investigar o efeito agudo da fadiga muscular provocada por uma série de CVIMs intermitentes nas TDTs de extensão do joelho e na arquitetura muscular do VL. Foi tomado como hipótese que a fadiga produzida irá gerar reduções significativas na força máxima e na TDT absoluta de maneira concomitante, contudo, o mesmo não deverá ser observado para a TDT normalizada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Participantes

Participaram do estudo 17 sujeitos (13 homens – idade (média \pm DP): 25 ± 6 anos, estatura: $177 \pm 12,9$ cm e massa corporal: $76 \pm 13,1$ kg). Apenas sujeitos “ativo” e “muito ativo” foram incluídos na amostra.²⁴ Foram excluídos os sujeitos que relataram lesões ortopédicas ou histórico de cirurgia nos membros inferiores. O estudo foi previamente aprovado pelo Comitê de Ética (CAAE:93764818.6.0000.5273) e todos os participantes foram informados dos objetos e procedimentos e forneceram o consentimento. (Figura 1)

Força máxima

Foi usado um dinamômetro isocinético (*Humac Norm II, CSMI, EUA* – frequência de amostragem = 100Hz), o participante foi posicionado sentado, com os quadris em 90° e o joelho alinhado com o eixo de rotação do equipamento. Após aquecimento com cinco repetições de intensidade progressiva, o teste foi realizado em modo concêntrico de extensão do joelho com cinco repetições a 30°/s. O pico de torque isocinético (PT-ISK) foi definido como o maior valor observado de torque. O ângulo de pico

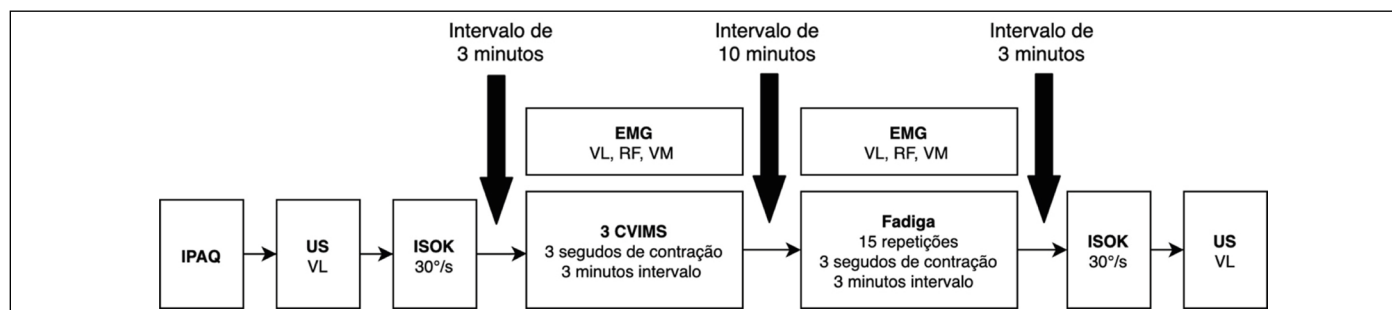


Figura 1. Representação esquemática do fluxo de avaliações de coleta de dados. Questionário Internacional de Atividade Física (IPAQ), imagem de ultrassom em repouso em posição anatômica (US-ANAT), teste isocinético (ISOK), eletromiografia (EMG), vasto lateral (VL), reto femoral (RF), vasto medial (VM), contração voluntária máxima isométrica (CVIM).

de torque (APT) foi definido como o ângulo onde PT-ISK foi registrado. Em seguida, após 3 min de intervalo foram realizadas CVIMs para extensão do joelho. Os sujeitos foram instruídos a estender o joelho "o mais rápido e forte possível" ao comando do avaliador e manter a contração até a instrução verbal. Foram realizadas duas repetições submáximas como familiarização e aquecimento. A avaliação foi composta por três CVIMs com duração de três segundos realizadas na posição articular do APT e descanso de três minutos entre cada teste. Durante o procedimento os voluntários utilizaram uma caneleira para evitar incômodos e diminuir a complacência do estofamento do dinamômetro. Apenas a repetição com o máximo valor de torque isométrico (PT-CVIM) foi utilizada para análise. A avaliação isocinética e isométrica foram realizadas antes (PRÉ) e após (PÓS) o protocolo de fadiga.

Protocolo de fadiga muscular

Após 10 minutos de intervalo do teste isométrico, os participantes realizaram um protocolo de fadiga constituído de 15 CVIMs. Cada CVIM teve duração de três segundos, com três segundos de repouso entre cada CVIM. Os testes pilotos demonstraram que esse protocolo foi suficiente para gerar fadiga aguda com reduções de até 50% na PT-ISK.

Arquitetura muscular

Para mensurar arquitetura muscular foi utilizado aparelho de ultrassom (ALOKA®, SSD-900, Japão) em modo brilho, com transdutor linear de cinco centímetros de 7,5 MHz. Foram realizadas imagens em repouso do VL com o participante deitado em decúbito dorsal com o joelho e o quadril completamente estendidos.²⁵ O transdutor foi posicionado em 50% da distância entre o trocânter maior e o epicôndilo lateral do fêmur. As imagens foram obtidas nos momentos PRÉ e PÓS. As imagens foram analisadas com o *software Image-J*.²⁶ Foram realizadas medidas de espessura muscular (EM) e ângulo do fascículo (AF). O comprimento do fascículo (CF) foi estimado por trigonometria.²⁷ (Figura 2)

Eletromiografia de superfície do quadríceps

O EMG foi mensurado (EMG 830c, EMG System do Brazil), utilizando eletrodos descartáveis de Ag/AgCl (*RedDot, 3M Corp.* EUA) nos músculos VL, reto femoral (RF) e vasto medial (VM) durante os testes isométricos. O eletrodo referência foi posicionado no epicôndilo lateral do úmero. A instrumentação e o preparo dos locais de posicionamento dos eletrodos seguiram as recomendações da SENIAM.²⁸ Os sinais foram adquiridos com frequência de amostragem de 1KHz e filtro passa-banda de 20-500 Hz.

Cálculo da TDT e FMD

Todos os cálculos foram efetuados no *Matlab 2014 (Mathworks Inc., EUA)*. A TDT foi determinada a partir das CVIMs para as faixas temporais

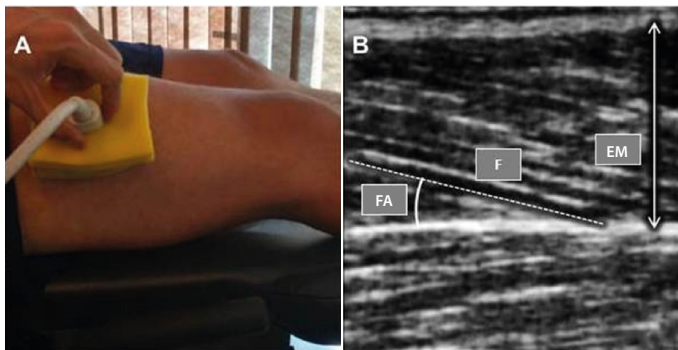


Figura 2. Imagem de ultrassom do músculo vasto lateral. A imagem à esquerda mostra o local de aquisição das imagens de ultrassonografia. A imagem à direita mostra um exemplo de imagem obtida. A linha tracejada representa um fascículo (F), a linha com setas (EM) representa a espessura muscular, e o ângulo representa o ângulo do fascículo (AF).

fixas de 0-50, 0-100, 0-150, 0-200 e 0-250 ms (TDT50, TDT100, TDT150, TDT200, TDT250) (Figura 3A) calculada por meio da Equação 1.

Equação 1

$$RTD = \frac{\Delta \text{torque}}{\Delta \text{time}}$$

O início do sinal foi determinado em 1 Nm e confirmado visualmente pelo mesmo avaliador experiente. A TDT instantânea foi obtida pela primeira derivada do torque, para determinação da MTDT. (Figura 3B) As TDTs foram calculadas em termos absolutos e normalizados pelo PT-CVIM das repetições correspondentes e, posteriormente, foram expressas em relação ao valor da PT-CVIM obtido anteriormente ao protocolo de fadiga. Os EMG e torque isométrico foram sincronizados *off-line* após as avaliações. O EMG foi analisado em uma janela com período de dois segundos durante o platô da curva de torque. O EMG foi filtrado para redução de ruído de rede²⁹ e então analisado no domínio da frequência. A FMD foi calculada e utilizada como marcador de fadiga muscular.

Análise estatística

Todas as variáveis apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk; $p > 0,05$). Para verificar os efeitos da fadiga no PT-ISK, APT e as variáveis de arquitetura muscular obtidas no PRÉ e PÓS, foram usados separados teste t pareados. Para analisar o PT-CVIM, TDTs, FMD, EM, CF e AF mensurados durante o protocolo de fadiga, foram utilizadas a média das três primeiras (INÍCIO, repetições 1-3) e das três últimas repetições (FINAL,

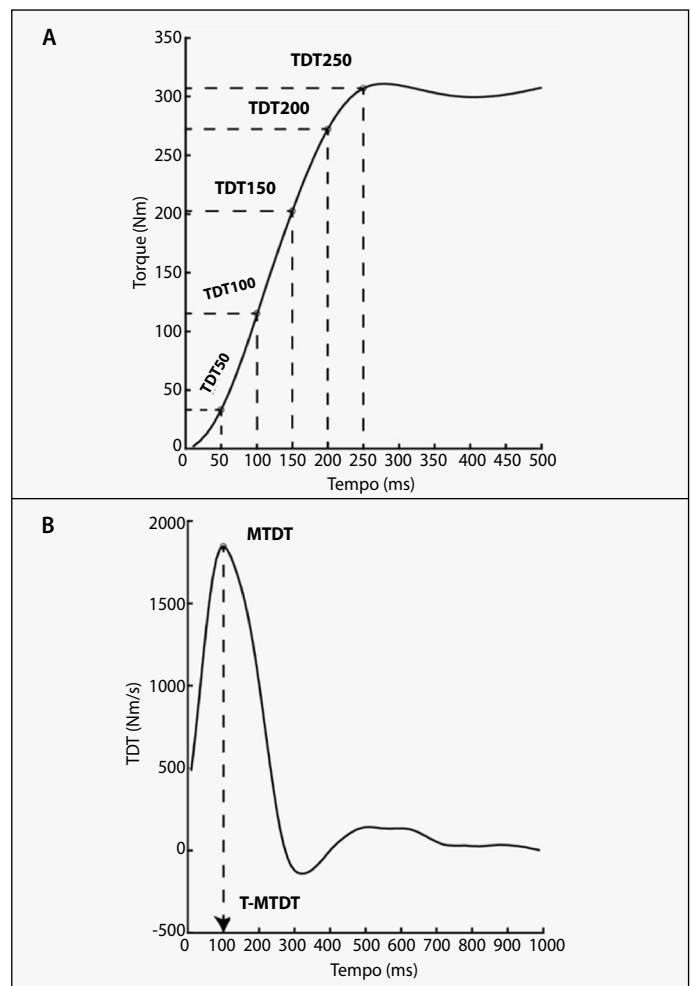


Figura 3. Curva torque vs. tempo obtida durante avaliação isométrica. (A) Curva de torque obtida durante avaliação isométrica. Cada teste teve duração de três segundos, mas apenas os 500 ms iniciais estão representados. Foram representadas na imagem as taxas de desenvolvimento de torque (TDT) utilizadas neste estudo. (B) Curva de TDT instantânea obtida pelo cálculo da primeira derivada da curva de torque. O valor de máxima TDT (MTDT) e o tempo associado (T-MTDT) estão representadas na imagem.

repetições 13-15). Os valores do INÍCIO e FINAL foram comparados utilizando teste t pareados. Para o tamanho do efeito foi realizada a estatística *d* e classificados como: efeito trivial ($\leq 0,2$), efeito pequeno (0,2-0,5), efeito moderado (0,51-0,8) e efeito grande ($> 0,8$).³⁰ Todos os cálculos estatísticos foram realizados com o software SPSS® (IBM SPSS Inc., Chicago, IL, EUA) e os gráficos produzidos com Graphpad Prism® (GraphPad Software Inc, La Jola, CA, EUA). O valor padrão estabelecido para a significância foi de $p < 0,05$.

RESULTADOS

Os valores de PT-ISK, APT, EM, CF e AF mensurados antes e após o protocolo de fadiga estão apresentados na Tabela 1. Apenas o PT-ISK ($p < 0,001$, $d = 1,47$) demonstrou diferença significativa entre os momentos PRÉ e PÓS protocolo de fadiga. Durante o protocolo de fadiga foram observadas reduções significativas da PT-CVIM de $269,5 \pm 45,63$ Nm para $220,49 \pm 46,94$ Nm (-18%; $p < 0,002$; $d = 1,05$). O mesmo comportamento foi observado para todas as TDTs absolutas. (Tabela 2) Contudo, não foram observadas diferenças significativas para as TDTs normalizadas. (Tabela 3)

Tabela 1. Valores de pico de torque isocinético e ângulo de pico de torque de extensores do joelho e arquitetura muscular antes e após fadiga muscular.

	Pré	Pós	Valor-p	Cohen <i>d</i>
PT-ISK (Nm)	239,0 ± 47,91	177,3 ± 34,96	< 0,001	1,47
APT (°)	77,7 ± 9,20	81,1 ± 10,78	0,15	0,33
EM (mm)	24,7 ± 3,42	25,7 ± 3,61	0,12	0,30
CF (mm)	85,1 ± 14,98	96,0 ± 25,57	0,05	0,52
AF (°)	17,4 ± 2,48	16,3 ± 3,61	0,16	0,33

Pico de torque isocinético (PT-ISK). Ângulo de pico de torque (APT). Espessura muscular (EM). Comprimento do fascículo (CF). Ângulo do fascículo (AF).

Tabela 2. Valores de TDT absolutos do início e final do protocolo de fadiga expressos em percentual da PT-CVIM realizada antes do protocolo de fadiga.

	Início	Final	Valor-p	Cohen <i>d</i>
TDT50 (%)	0,66 ± 0,24	0,55 ± 0,24	0,004	0,45
TDT100 (%)	0,71 ± 0,20	0,57 ± 0,22	< 0,001	0,66
TDT150 (%)	0,73 ± 0,18	0,58 ± 0,20	< 0,001	0,81
TDT200 (%)	0,75 ± 0,16	0,59 ± 0,17	< 0,001	0,96
TDT250 (%)	0,77 ± 0,16	0,61 ± 0,16	< 0,001	1,00
MTDT (%)	0,80 ± 0,11	0,61 ± 0,16	< 0,001	1,38

Início: valor obtido pela média das três primeiras repetições no protocolo de fadiga. Final: valor obtido pela média das três últimas repetições no protocolo de fadiga.

Tabela 3. Valores de TDT normalizados do início e final do protocolo de fadiga expressos em percentual da PT-CVIM da própria repetição em que a TDT foi calculada.

	Início	Final	Valor-p	Cohen <i>d</i>
TDT50 (%)	1,11 ± 0,36	1,13 ± 0,49	0,75	0,05
TDT100 (%)	2,09 ± 0,70	2,05 ± 0,91	0,77	0,05
TDT150 (%)	2,60 ± 0,82	2,50 ± 1,02	0,47	0,11
TDT200 (%)	2,71 ± 0,80	2,58 ± 0,92	0,40	0,15
TDT250 (%)	2,60 ± 0,67	2,51 ± 0,76	0,46	0,13
MTDT (%)	3,89 ± 0,95	3,66 ± 1,30	0,27	0,20

Início: valor obtido pela média das três primeiras repetições no protocolo de fadiga. Final: valor obtido pela média das três últimas repetições no protocolo de fadiga.

Os músculos VL ($p = 0,022$; $d = 0,41$), RF ($p < 0,001$; $d = 1,32$) e VM ($p < 0,001$; $d = 0,58$) reduziram significativamente dos valores de FMD durante o protocolo de fadiga. (Figura 4)

DISCUSSÃO

O objetivo do presente estudo foi investigar o efeito da fadiga muscular na TDT e na arquitetura muscular do VL. Conforme esperado, houve redução significativa da força máxima e da FMD dos músculos do quadríceps, evidenciando a presença da fadiga.¹⁸ De maneira semelhante ocorreu diminuição das TDTs absolutas, mas não da capacidade explosiva quando normalizada. Poucos estudos verificaram o efeito da fadiga ao longo de uma série de CVIMs intermitentes de extensão do joelho.^{7,19} Boccia *et al.*⁷ estudaram o efeito de 15 CVIMs intermitentes para extensão do joelho com duração de três segundos com cinco segundos de intervalo. Foram observadas reduções significativas de 19% e 20% no PT-CVIM e MTDT, respectivamente. Entre as demais TDTs estudadas, apenas a TDT50 não demonstrou diferença significativa. Contudo, quando valores foram normalizados pelo PT-CVIM, nenhuma diferença significativa foi observada nas TDTs. Estes achados⁷ corroboram a redução na PT-CVIM (18%) e na MTDT (23%), encontradas no presente estudo, assim como a manutenção dos valores das TDTs normalizadas.

Já Buchtörpe *et al.*¹⁹ acompanharam o efeito da fadiga nas características contráteis dos extensores de joelho ao longo de 10 séries de cinco CVIMs, com três segundos de duração e dois segundos de intervalo, entremeados por cinco segundos de intervalo entre as séries. Além da TDT, a ativação muscular foi mensurada através de EMG nos momentos iniciais da contração, em janelas até 150 ms. No intervalo entre as séries, uma contração provocada por estimulação elétrica do nervo femoral foi realizada para acompanhar as características contráteis intrínsecas do quadríceps, dissociadas do controle neural. Ao final do protocolo, tanto a PT-CVIM quanto as TDTs apresentaram redução significativa. Sendo a proporção de redução maior para as TDTs (47-56%) do que para a PT-CVIM (42%). A TDT normalizada nas contrações eletricamente estimuladas não sofreram alterações, indicando que as características intrínsecas de força máxima e força explosiva dos extensores do joelho se mantiveram proporcionais.

As diferenças observadas entre os estudos de Boccia *et al.*⁷ e Buchtörpe *et al.*¹⁹ podem ser atribuídas ao volume de repetições empregadas. Enquanto Boccia *et al.*⁷ utilizaram 15 CVIMs intermitentes, Buchtörpe *et al.*¹⁹ utilizaram 50 CVIMs entremeadas com as contrações evocadas eletricamente. É possível que a fadiga provocada por um volume maior de CVIMs produza efeitos além da redução concomitante na força máxima e na TDT, conforme os resultados de Buchtörpe *et al.*¹⁹ sugerem. Assim como em Boccia *et al.*⁷ na presente investigação foram utilizadas 15 CVIMs intermitentes. Este protocolo foi utilizado por ser considerado que este volume estaria mais próximo do tempo de exposição de situações

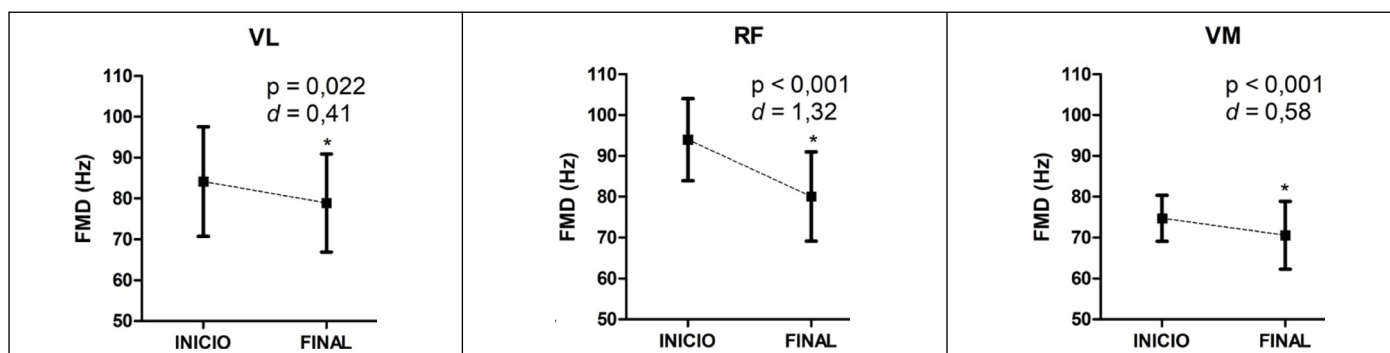


Figura 4. Valores da FMD do início e final do protocolo de fadiga. Valores de frequência mediana (FMD) obtida da eletromiografia de superfície do vasto lateral (VL), reto femoral (RF) e vasto medial (VM) nas três primeiras (INÍCIO) e nas três últimas repetições (FINAL).

comumente realizadas na prática esportiva e os estudos piloto terem demonstrado que o mesmo era capaz de reduzir até 50% da PT-CVIM.

As características arquitetônicas dos músculos são consideradas fatores determinantes da produção de força.²⁰ Alterações agudas na arquitetura do VL decorrentes da fadiga já foram relatadas anteriormente.^{21,22} Contudo, no presente estudo não foram observadas alterações significativas em nenhuma das variáveis estudadas da arquitetura muscular. Csapo *et al.*²¹ relataram alterações significativas de 1% de diminuição do CF, 10% de aumento no AF e 4% de aumento na EM do VL após a realização do máximo de repetições possíveis em um *legpress* unilateral. Brancaccio *et al.*²² observaram um aumento da EM e do AF após um teste incremental máximo em cicloergômetro com duração média de ~18 min, mas o CF não foi avaliado. Ambos os estudos sugeriram que o influxo sanguíneo e o início de um processo inflamatório causaram o aumento no EM do VL, acarretando as alterações morfológicas observadas.^{21,22} Mitsukawa *et al.*²³ encontraram um aumento do CF e diminuição do AF no gastrocnêmio lateral e no músculo solear após 60 CVIMs de flexão plantar. Embora a EM não tenha sido medida, a diminuição do AP pode ser um indício que as alterações não foram acompanhadas de um edema.²⁰ Em conjunto, os resultados sugerem para que as alterações arquitetônicas agudas ocorram seja necessário volumes maiores de exercício.

Uma limitação importante do presente estudo foi o fato do CF ter sido calculado trigonometricamente através do AF e da EM. Dessa forma, aumentos da EM e diminuições do AF, mesmo que não significativos, podem acarretar alterações no CF. O CF apresentou valores limítrofes,

quando comparado os momentos antes e após a fadiga, com tamanho do efeito moderado. Estudos futuros poderão utilizar *probes* de ultrassom maiores ou imagens panorâmicas para mensurações mais fidedignas do CF. Durante a coleta de dados, o sistema de sincronização do EMG com o dinamômetro isocinético apresentou falhas, não permitindo análises mais profundas nas alterações do padrão de recrutamento muscular e alterações na capacidade de força explosiva.

CONCLUSÃO

Uma série de 15 CVIMs intermitentes foi capaz de acarretar fadiga significativa dos músculos extensores do joelho. A redução da capacidade explosiva ocorreu de maneira concomitante com a redução da força máxima. Fato reforçado quando a fadiga não gerou alterações na TDT normalizada. Estudos futuros deverão estudar diferentes volumes e intensidades para a produção de fadiga, com foco nas alterações neurais.

AGRADECIMENTOS

Parte do presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES: Cada autor contribuiu individual e significativamente para o desenvolvimento deste artigo. MMS: projeto, redação e coleta de dados; CTL: projeto, redação, coleta de dados e revisão; UFG: projeto, coleta de dados e revisão; RG: projeto, redação e revisão; CGO: projeto, redação e revisão; LMS: coleta de dados e revisão; SCS: projeto, redação, conceito intelectual, coleta de dados e revisão; VC: projeto, redação, conceito intelectual, coleta de dados e revisão.

REFERÊNCIAS

- Francis P, Lyons M, Piasecki M, Mc Phee J, Hind K, Jakeman P. Measurement of muscle health in aging. *Biogerontology*. 2017;18(6):901–11.
- Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, Duchateau J. Rate of force development: physiological and methodological considerations. *European journal of applied physiology*. 2016;116(6):1091–116.
- Rodríguez-Rosell D, Pareja-Blanco F, Aagaard P, González-Badillo JJ. Physiological and methodological aspects of rate of force development assessment in human skeletal muscle. *Clinical physiology and functional imaging*. 2018;38(5):743–62.
- Buckthorpe M, Roi GS. The time has come to incorporate a greater focus on rate of force development training in the sports injury rehabilitation process. *Muscles, ligaments and tendons journal*. 2017;7(3):435.
- Dapena J, Chung C. Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jumping. *Medicine and science in sports and exercise*. 1988;20(3):290.
- Kuitunen S, Komi PV, Kyröläinen H. Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Medicine and science in sports and exercise*. 2002;34(1):166.
- Boccia G, Dardanello D, Tarperi C, Festa L, La Torre A, Pellegrini B, et al. Fatigue-induced dissociation between rate of force development and maximal force across repeated rapid contractions. *Human Movement Science*. 2017;54:267–75.
- Haff GG, Ruben RP, Lider J, Twine C, Cormie P. A comparison of methods for determining the rate of force development during isometric midhigh clean pulls. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2015;29(2):386–95.
- Thompson BJ, Ryan ED, Sobolewski EJ, Smith DB, Akehi K, Conchola EC, et al. Relationships between rapid isometric torque characteristics and vertical jump performance in Division I collegiate American football players: Influence of body mass normalization. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2013;27(10):2737–42.
- Djordjevic D, Uygur M. Methodological considerations in the calculation of the rate of force development scaling factor. *Physiological measurement*. 2017;39(1):015001.
- Jenkins ND, Buckner SL, Bergstrom HC, Cochrane KC, Goldsmith JA, Housh TJ, et al. Reliability and relationships among handgrip strength, leg extensor strength and power, and balance in older men. *Experimental gerontology*. 2014;58:47–50.
- Diderksen JL, Del Vecchio A, Farina D. Neural and muscular determinants of maximal rate of force development. *Journal of Neurophysiology*. 2020;123(1):149–57.
- Folland J, Buckthorpe M, Hannah R. Human capacity for explosive force production: neural and contractile determinants. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2014;24(6):894–906.
- Andersen LL, Andersen JL, Zebis MK, Aagaard P. Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2010;20(1):e162–9.
- Ertl P, Kruse A, Tilp M. Detecting fatigue thresholds from electromyographic signals: A systematic review on approaches and methodologies. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2016;30:216–30.
- Cheng AJ, Place N, Westerblad H. Molecular basis for exercise-induced fatigue: the importance of strictly controlled cellular Ca²⁺ handling. *Cold Spring Harbor perspectives in medicine*. 2018;8(2):a029710.
- Bandpei MAM, Rahmani N, Majdoleislam B, Abdollahi I, Ali SS, Ahmad A. Reliability of surface electromyography in the assessment of paraspinal muscle fatigue: an updated systematic review. *Journal of manipulative and physiological therapeutics*. 2014;37(7):510–21.
- Merletti R, Parker PJ. *Electromyography: physiology, engineering, and non-invasive applications*. Vol. 11. John Wiley & Sons; 2004.
- Buckthorpe M, Pain MT, Folland JP. Central fatigue contributes to the greater reductions in explosive than maximal strength with high-intensity fatigue. *Experimental Physiology*. 2014;99(7):964–73.
- Blazevich AJ, Gill ND, Zhou S. Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo. *Journal of anatomy*. 2006;209(3):289–310.
- Csapo R, Alegre LM, Baron R. Time kinetics of acute changes in muscle architecture in response to resistance exercise. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2011;14(3):270–4.
- Brancaccio P, Limongelli FM, D'Aponte A, Narici M, Maffulli N. Changes in skeletal muscle architecture following a cycleergometer test to exhaustion in athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2008;11(6):538–41.
- Mitsukawa N, Sugisaki N, Kanehisa H, Fukunaga T, Kawakami Y. Fatigue-related changes in fascicle-tendon geometry over repeated contractions: Difference between synergist muscles. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*. 2009;40(3):395–401.
- Matsudo S, Araujo T, Matsudo T, Andrade D, Andrade E, Oliveira LC, et al. Questionário internacional de atividade física (IPAQ): estudo de validade e reprodutibilidade no Brasil. *Rev Bras Ativ Saude*. 2001;6(2):5–18.
- Blazevich AJ, Cannavan D, Horne S, Coleman DR, Aagaard P. Changes in muscle force-length properties affect the early rise of force in vivo. *Muscle & nerve*. 2009;39(4):512–20.
- Schindelin J, Rueden CT, Hiner MC, Eliceiri KW. The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular reproduction and development*. 2015;82(7–8):518–29.
- Brennan SF, Cresswell AG, Farris DJ, Lichtwark GA. In vivo fascicle length measurements via B-mode ultrasound imaging with single vs dual transducer arrangements. *Journal of biomechanics*. 2017;64:240–4.
- Hermes HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, Rau G. Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of Electromyography Kinesiology*. 2000;10:361–74.
- Mello RG, Oliveira LF, Nadal J. Digital Butterworth filter for subtracting noise from low magnitude surface electromyogram. *Computer methods and programs in biomedicine*. 2007;87(1):28–35.
- Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: Academic press; 2013.