

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FISIOTERAPIA**

SANMY ROCHA NÓBREGA

**A FALHA MUSCULAR NÃO É NECESSÁRIA PARA MAXIMIZAR AS
ADAPTAÇÕES NEUROMUSCULARES AO TREINAMENTO DE FORÇA**

SÃO CARLOS - SP

2016

SANMY ROCHA NÓBREGA

**A FALHA MUSCULAR NÃO É NECESSÁRIA PARA MAXIMIZAR AS
ADAPTAÇÕES NEUROMUSCULARES AO TREINAMENTO DE FORÇA**

Dissertação apresentada ao PPGFT para avaliação do
candidato ao título de mestre.

Discente: Sanmy Rocha Nóbrega

Orientador: Prof. Dr. Cleiton Augusto Libardi

SÃO CARLOS - SP

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N754f Nóbrega, Sanmy Rocha
A falha muscular não é necessária para maximizar as adaptações neuromusculares ao treinamento de força / Sanmy Rocha Nóbrega. -- São Carlos : UFSCar, 2016. 46 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2016.

1. Fadiga muscular, . 2. Área de secção transversa. 3. Hipertrofia. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Fisioterapia

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Sanmy Rocha Nóbrega, realizada em 29/04/2016:

Prof. Dr. Cleiton Augusto Libardi
UFSCar

Prof. Dr. Hamilton Augusto Roschel da Silva
USP

Prof. Dr. José Marques Novo Junior
UFSCar

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Severino de Almeida Nóbrega e Francisca Vânia Rocha Nóbrega, fontes de inspiração, dedicação e superação.

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, família e amigos, pelos momentos de alegria, e também pelos de tristeza.

A Universidade Federal de São Carlos, seu corpo docente, direção e administração, pelo ambiente de ensino proporcionado e pela oportunidade de aqui estudar.

Ao Prof. Dr. Cleiton Augusto Libardi, por seu apoio e confiança ao me aceitar como orientando, por seu empenho e dedicação na elaboração deste trabalho, e pelas horas de sono gastas na correção e revisão deste e de outros trabalhos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo, apoio, compreensão e sacrifícios realizados para que eu pudesse me dedicar ao mestrado.

A minha irmã, pelo companheirismo, cumplicidade e desabafos. Por compartilhar comigo os momentos difíceis da pós-graduação, sempre torcendo pelo meu sucesso.

Aos amigos e companheiros de trabalho, que me ajudaram sempre que possível nessa jornada.

Aos voluntários da pesquisa, por assumirem o compromisso para com o projeto.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação, o meu obrigado.

SUMÁRIO

CONTEXTUALIZAÇÃO	11
ARTIGO 1	12
Resumo	12
Abstract	13
INTRODUÇÃO	14
<i>Falha muscular no treinamento de força de alta intensidade</i>	<i>15</i>
<i>Falha muscular no treinamento de força de baixa intensidade</i>	<i>16</i>
CONCLUSÃO	18
REFERÊNCIAS	19
ESTUDO 2	22
Resumo	22
Abstract	23
INTRODUÇÃO	24
MÉTODOS	25
<i>Participantes</i>	<i>25</i>
<i>Delineamento Experimental</i>	<i>26</i>
<i>Protocolos de treinamento de força</i>	<i>27</i>
<i>Teste de força máxima dinâmica</i>	<i>27</i>
<i>Área de secção transversa (AST) muscular</i>	<i>28</i>
<i>Ângulo de penação (AP)</i>	<i>29</i>
<i>Comprimento do fascículo (CF)</i>	<i>30</i>
<i>Análise dos dados</i>	<i>31</i>
RESULTADOS	31
<i>Participantes</i>	<i>31</i>
<i>Volume total e número de repetições</i>	<i>32</i>
<i>Força máxima dinâmica (1-RM)</i>	<i>33</i>
<i>Área de secção transversa (AST) muscular</i>	<i>34</i>

	10
<i>Ângulo de penação (AP)</i>	35
<i>Comprimento do fascículo (CF)</i>	35
DISCUSSÃO	36
REFERÊNCIAS	42

CONTEXTUALIZAÇÃO

Essa dissertação foi elaborada pelo discente Sanmy Rocha Nóbrega, sob orientação do Prof. Dr. Cleiton Augusto Libardi, como requisito para obtenção do título de Mestre em Fisioterapia, pelo Programa de Pós-Graduação em Fisioterapia (PPG-FT) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Tratasse de uma dissertação, cujo tema principal é a adaptação neuromuscular decorrente do treinamento de força de alta e baixa intensidade realizados até falha muscular ou interrupção voluntária. Em sua totalidade, serão apresentados dois artigos, sendo o primeiro deles um artigo de opinião previamente publicado, e o segundo um artigo original ainda não publicado.

ARTIGO 1

É NECESSÁRIO REALIZAR O TREINAMENTO DE FORÇA ATÉ A FALHA MUSCULAR?

Artigo de opinião publicado em janeiro de 2016 no *Frontiers in Physiology* (FI 3.534)

Resumo

O treinamento de força (TF) é o principal método de exercício utilizado para promover aumentos na força e massa muscular esquelética, onde cargas superiores a 60% de uma repetição máxima (1-RM) são comumente recomendadas. Outros estudos sugerem que, para maximizar os aumentos na força e hipertrofia muscular, sejam realizadas repetições até a falha muscular, definida como a incapacidade de mover uma carga específica além de um ângulo crítico ou como a incapacidade de completar uma repetição na amplitude de movimento completa devido à fadiga. Contudo, ainda não está claro se o TF até a falha é realmente necessário. Assim, o objetivo deste estudo foi discutir os efeitos do TF até a falha no recrutamento de unidades motoras (UMs) e respostas adaptativas, fornecendo argumentos do por que o TF até a falha afetar diferentemente as adaptações musculares em diferentes populações. Em conclusão, as evidências acerca dos indivíduos destreinados parecem sugerir que o TF de alta intensidade (TFAI) até a falha muscular não é necessário para ganhos máximos na força e hipertrofia. Em contrapartida, realizar repetições até a falha parece essencial para que o TF de baixa intensidade (TFBI) resulte em aumentos significativos na força e massa muscular. Já para indivíduos treinados, as evidências apontam maiores ganhos de força no TF de alta intensidade até a falha. Porém, a falha muscular parece uma estratégia interessante na otimização dos ganhos hipertróficos de indivíduos treinados.

Palavras-chave: Fadiga muscular, área de secção transversa, hipertrofia.

Abstract

Resistance training (RT) is the main method to promote increases in muscle strength and hypertrophy, in which loads higher than 60% of one repetition maximum (1-RM) are commonly recommended. Other studies suggest performing RT to the point of muscle failure, which can be defined as the inability to move a load beyond a critical angle or as the inability to complete a repetition in a full range of motion due to fatigue, in order to maximize strength gains and hypertrophy. However, it is still unclear if RT to muscle failure is really necessary. Thus, the aim of this study was to discuss the effects of RT to failure on motor units (MUs) recruitment and adaptive responses, providing arguments to how RT to failure might differently affect muscle adaptations on different populations. In conclusion, evidence regarding untrained individuals suggests that high-intensity RT (HIRT) to failure is not necessary for maximal increases in strength and mass. On the other hand, performing RT to failure might be necessary for optimal increases in strength and mass when training at low intensities (LIRT). Regarding trained individuals, evidence point greater strength gains when HIRT is performed to failure. Nonetheless, muscle failure seems to be an interesting strategy when it comes to optimizing hypertrophy gains for trained individuals.

Key words: Muscle fatigue, cross sectional area, hypertrophy.

INTRODUÇÃO

O treinamento de força (TF) é o principal método de exercício utilizado para promover aumentos na força e massa muscular esquelética (*i.e.*, hipertrofia muscular) (ACSM, 2009). Para promover tais adaptações, tem sido recomendado que o treinamento de força de alta intensidade (TF-AI) seja realizado com cargas superiores a 60% de uma repetição máxima (1-RM) (ACSM, 2009). Outros autores sugerem que, para maximizar os aumentos na força e hipertrofia muscular, sejam realizadas repetições até a falha muscular (JACOBSON, 1981; ROONEY et al., 1994; SCHOTT et al., 1995; DRINKWATER et al., 2005), que pode ser definida como a incapacidade de mover uma carga específica além de um ângulo crítico (*i.e.*, sticking point) (DRINKWATER et al., 2005) ou como a incapacidade de completar uma repetição na amplitude de movimento completa devido a fadiga (IZQUIERDO et al., 2006).

Alguns estudos sugerem que a realização do TF-AI até a falha muscular promove maior ativação das unidades motoras (UMs) quando comparada ao TF-AI não falha (WILLARDSON, 2007; AKIMA et al., 2013). Durante uma sessão de TF-AI, o padrão de recrutamento das UMs segue o princípio do tamanho, onde inicialmente são recrutadas as UMs de baixo limiar, seguidas das UMs de alto limiar (HENNEMAN, 1957). Tem-se especulado que ainda mais UMs de alto limiar de excitabilidade, compostas predominantemente de fibras musculares do tipo IIX, são recrutadas quando repetições são realizadas até a falha, possivelmente devido a fadiga das UMs (WILLARDSON, 2007). De fato, o TF até a falha pode promover maior amplitude do sinal eletromiográfico (EMG), mesmo quando o TF é realizado com baixas cargas (PINCIVERO et al., 2006), o que sugere maior recrutamento de UMs de alto limiar (AKIMA et al., 2013). Nesse aspecto, acredita-se que o recrutamento máximo de UMs resultará em ganhos máximos na hipertrofia e força muscular do músculo alvo (WERNBOM et al., 2007). Apesar dessa racional lógica, ainda não está claro se o TF até a falha é realmente necessário. Poucos estudos compararam diretamente os efeitos do TF em condições de falha e não falha na ativação e força muscular, e os que compararam encontraram resultados divergentes, com alguns estudos apontando superioridade no TF até a falha e outros não apontando diferenças entre eles (DRINKWATER et al., 2005; IZQUIERDO et al., 2006; LOONEY et al., 2015). Além disso, nenhum desses estudos verificou a hipertrofia muscular.

Considerando a literatura atual, ainda não está claro se a realização do TF até a falha é realmente necessária para maximizar os aumentos na força e hipertrofia quando comparado ao TF não falha. Assim, o objetivo deste estudo foi discutir os efeitos do TF até a

falha no recrutamento de UMs e respostas adaptativas (*i.e.*, aumentos na força e massa muscular), fornecendo argumentos do porquê o TF até a falha afetar diferentemente as adaptações musculares em diferentes populações.

Falha muscular no treinamento de força de alta intensidade

Poucos estudos compararam diretamente os efeitos do TF-AI até a falha ou não falha nas adaptações neuromusculares (*e.g.*, força e massa muscular). Izquierdo et al. (2006) randomizaram 42 jogadores de pelota basca em dois grupos: 1) repetições até a falha (3 séries de 10-RM); e 2) não falha (~6 séries de 3-5 repetições), com mesma intensidade (~75% 1-RM) e volume equalizado. Os resultados mostraram aumentos similares na força muscular entre os grupos de treinamento, independente da falha muscular. É importante salientar que o estudo não verificou os níveis de fadiga nem a ativação muscular, nos fazendo especular que o maior número de séries e menor número de repetições realizadas no grupo não falha resultaram em fadiga substancial. Tais achados sugerem que, uma vez que os sujeitos da pesquisa eram destreinados em força, a fadiga resultante promoveu recrutamento máximo das UMs previamente ao ponto de falha muscular, potencializando os ganhos de força. De maneira similar, Sundstrup et al. (2012) avaliaram a ativação muscular dos estabilizadores do ombro e pescoço por EMG durante a elevação lateral até a falha, com tubos elásticos de diferentes resistências, em mulheres destreinadas. As participantes realizaram uma série com alta carga (3-RM) e uma série de repetições até a falha com menor carga (~15-RM). Os resultados indicaram que a EMG normalizada durante a série até a falha foi significativamente menor durante as repetições iniciais, e significativamente maior nas repetições finais quando comparada a série de 3-RM, atingindo um platô de ativação de 3-5 repetições previamente ao ponto de falha. Assim, sugere-se que, para indivíduos destreinados em força, o TF-AI até a completa falha muscular não é necessário para recrutamento máximo das UMs.

Em contrapartida, Drinkwater et al., (2005) investigaram os efeitos do TF até a falha na força dos membros superiores de 26 jogadores profissionais de basquete da liga júnior, todos experientes com TF. A força muscular foi avaliada após dois protocolos diferentes com volume equalizado: repetições até a falha (4 séries de 6 repetições) e não falha (8 séries de 3 repetições), com intensidade similares (~85-105% 1-RM). O intervalo de descanso diferiu entre os protocolos, com 260 segundos entre as séries no grupo falha, e 113 segundos para o não falha. Os níveis de fadiga foram verificados antes e após o TF, enquanto a ativação muscular não foi verificada. Os resultados demonstraram maior fadiga e aumento na força

(quase que o dobro) para o grupo falha. Esses resultados sugerem que a fadiga causada pela falha muscular pode estar relacionada à maior ativação muscular, o que explicaria os ganhos de força mais significativos quando o TF é realizado até a falha, ao menos para indivíduos treinados em força. De fato, um estudo recente do Looney et al. (2015) parece corroborar tal hipótese. Utilizando um modelo randomizado intra sujeito com 10 homens treinados, os autores investigaram a ativação muscular em diferentes intensidades de exercício realizadas até repetições submáximas e máximas (i.e., falha), comparando protocolos de série única e drop set.

Apesar dos níveis de fadiga não terem sido avaliados, os resultados demonstraram amplitudes de EMG maiores sempre que as repetições foram realizadas até a falha muscular quando comparada às repetições submáximas de mesma intensidade. Os achados indicam que, para indivíduos treinados, o TF-AI até a falha muscular é necessário para promover ativação muscular máxima, a qual pode estar relacionada a maiores ganhos de força muscular.

A falta de medidas tanto dos níveis de fadiga quanto da ativação muscular nos estudos que compararam o TF-AI até a falha e não falha limita a compreensão de como tais mecanismos contribuem para as adaptações ao TF crônico. Além disso, nenhum estudo comparou diretamente as respostas hipertróficas após treinos até a falha e não falha. As diferenças nos níveis de treinos dos sujeitos representa outro problema, dificultando nossa capacidade em realizar comparações relevantes entre os estudos. Como os estudos previamente citados apontam, a influência da fadiga na ativação e adaptação muscular pode diferir significativamente de acordo com o nível de treino do sujeito. Aparentemente, para indivíduos destreinados em força, o TF até a falha é desnecessário para maximizar os aumentos na força e massa muscular. Por outro lado, para indivíduos treinados, a falha muscular pode resultar em maior ativação muscular, o que explicaria os maiores aumentos na força após protocolos realizados até a falha muscular. Contudo, ainda não se sabe ao certo se esta maior ativação muscular induzida pela fadiga realmente reflete os aumentos crônicos na força e hipertrofia muscular, e como ela afeta indivíduos treinados e destreinados.

Falha muscular no treinamento de força de baixa intensidade

Estudos recentes tem apontado a falha muscular como um fator importante na maximização das adaptações quando o TF é realizado em baixas intensidades (TF-BI). Entretanto, nenhum estudo tentou comparar diretamente os efeitos do treino até a falha e não falha nas adaptações neuromusculares. Conseqüentemente, os pesquisadores comparam o TF-

BI ao TF-AI, assumindo este último como a situação ideal na promoção dos aumentos de massa muscular e força.

Em se tratando de indivíduos destreinados, Mitchell et al. (2012) investigaram se diferentes intensidades resultariam em adaptações crônicas diferentes. Em seu estudo, 18 homens recreacionalmente ativos, a pelo menos 1 ano sem realizar treinamento de força, realizaram treinamento de força até a falha no aparelho de extensão de joelho por um período de 10 semanas. Cada perna foi alocada de maneira aleatória e contrabalanceada a uma das três condições de treinamento: TFBI (3 séries a 30% 1-RM), TFAI (3 séries a 80% 1-RM) e TFAI de série única. Os resultados demonstraram aumentos similares na força isométrica e hipertrofia muscular em todos os protocolos após 10 semanas. Apesar de não terem sido realizadas avaliações da ativação muscular, é possível que tais adaptações estejam relacionadas a um recrutamento similar de UMs entre os protocolos de alta e baixa intensidade quando estes são realizados até a falha muscular, sem vantagem aparente quando o TFAI é realizado até a falha, ao menos para indivíduos destreinados.

Em contrapartida, Holm et al. (2008) investigaram os efeitos do TFBI e TFAI em 11 homens jovens e sedentários. Os participantes realizaram 5 séries de extensão unilateral do joelho durante 12 semanas, treinando uma perna a 70% 1-RM (8 repetições) e a perna contralateral a 15,5% 1-RM (1 repetição a cada 5 segundos para um total de 36 repetições), num modelo randomizado e balanceado. Os resultados demonstraram aumentos significativos na área de secção transversa (três vezes maior) no grupo TFAI quando comparado ao grupo TFBI. Os níveis de fadiga e ativação muscular não foram verificados, mas se considerarmos o período de descanso permitido entre as contrações de baixa intensidade, é possível especular que o recrutamento de UMs foi muito baixo comparado ao TFAI devido o menor nível de fadiga resultante deste protocolo.

Com relação aos indivíduos treinados, os resultados são mais consistentes. No intuito de avaliar a influência da intensidade de treino na ativação muscular, Schoenfeld et al. (2014) utilizaram um modelo intrassujeito onde homens jovens treinados em força realizaram dois protocolos distintos: alta carga (75% 1-RM até a falha muscular); e baixa carga (30% 1-RM até a falha muscular). Os participantes realizaram os protocolos de maneira contrabalanceada. Os resultados apontaram maior pico e média na EMG durante a alta carga, indicando que o treinamento até a falha com baixa carga não resulta em ativação máxima das UMs em indivíduos treinados. De maneira similar, outro estudo realizado pelo mesmo grupo de pesquisadores verificou a força e massa muscular em 24 homens, todos experientes no TF,

após 8 semanas (24 sessões de treino) de TF (SCHOENFELD et al., 2015). Os voluntários foram alocados randomicamente em uma das duas possíveis condições de treinamento, ambas realizadas até a falha muscular: baixa carga (25-35 repetições com ~30-50% 1-RM) e alta carga (8-12 repetições com ~70-80% 1-RM). Os resultados demonstraram aumentos similares na massa muscular entre os dois regimes de treinamento. Contudo, os aumentos na força foram significativamente maiores para o grupo alta carga, indicando que, apesar do TFBI até a falha ser capaz de atingir níveis hipertróficos similares ao TFAI, treinar em alta intensidade é necessário para maximizar as adaptações na força.

Considerando as evidências disponíveis até o momento, é plausível assumir que a fadiga afeta de maneira diferente as adaptações musculares ao TFBI até a falha realizado por diferentes populações (treinados e destreinados). Para indivíduos destreinados, é possível que protocolos que resultam em baixa fadiga, como o utilizado por Holm et al. (2008), sejam incapazes de recrutar de maneira ótima as UMs de alto limiar. Os resultados poderiam ser diferentes se as repetições em baixa intensidade tivessem sido realizadas a um ponto próximo da falha, como no estudo de Sundstrup et al. (2012). Com relação aos indivíduos treinados, é possível que, devido às adaptações neurais relacionadas ao TF, a fadiga resultante de protocolos de TFBI seja insuficiente para recrutar de maneira máxima as UMs de alto limiar nessa população. Assim, a hipertrofia similar entre TFAI e TFBI resultaria do maior tempo sob tensão de protocolos de TFBI até a falha muscular, que por sua vez estimularia de maneira máxima as fibras musculares tipo I, promovendo maior resposta hipertrófica.

Por fim, alguns estudos sugerem que o TF realizado até a falha por período prolongado pode resultar em overtraining; maior risco de lesão musculoesquelética por esforço repetitivo; e maiores respostas hemodinâmicas, com picos pressóricos próximos a falha muscular (MACDOUGALL et al., 1985; STONE et al., 1996). Dessa forma, algumas diretrizes recomendam que o TF seja realizado a um ponto de fadiga substancial (i.e., esforço submáximo), garantindo aumentos na força e massa muscular, ao mesmo tempo em que evita a falha muscular (POLLOCK et al., 2000; MAZZEO et al., 2001; HASKELL et al., 2007). Tais achados podem ser especialmente importantes para populações sujeitas a efeitos adversos durante o TFAI (e.g., idosos e hipertensos), onde a realização do TFBI ao nível de fadiga substancial seria uma alternativa viável para maximizar os ganhos de força e massa muscular.

CONCLUSÃO

Considerando as evidências acerca dos indivíduos destreinados, parece plausível sugerir que o TFAI até a falha muscular não é necessário para se obter ganhos máximos na força e hipertrofia. Em contrapartida, realizar repetições até a falha parece essencial para que o TFBI resulte em aumentos na força e massa muscular similares aos obtidos durante o TFAI. Já para indivíduos treinados, as evidências apontam maiores ganhos de força no TFAI até a falha quando comparado ao TFAI interrompido antes da falha. De maneira similar aos indivíduos destreinados, a falha muscular parece um estratégia interessante na otimização dos ganhos hipertróficos. Entretanto, os aumentos na força não são máximos quando este protocolo é realizado por indivíduos treinados.

Mais estudos são necessários para determinar como o nível de fadiga influencia o recrutamento de UMs e as adaptações musculares decorrentes do TF, tanto em indivíduos treinados quanto destreinados.

REFERÊNCIAS

ACSM. **American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults.** Med Sci Sports Exerc, v. 41, n. 7, p. 1510-30, Jul 2009.

AKIMA, H.; SAITO, A. **Activation of quadriceps femoris including vastus intermedius during fatiguing dynamic knee extensions.** Eur J Appl Physiol, v. 113, n. 11, p. 2829-40, Nov 2013.

DRINKWATER, E. J.; LAWTON, T. W.; LINDSELL, R. P.; PYNE, D. B.; HUNT, P. H.; MCKENNA, M. J. **Training leading to repetition failure enhances bench press strength gains in elite junior athletes.** J Strength Cond Res, v. 19, n. 2, p. 382-8, May 2005.

HASKELL, W. L.; LEE, I. M.; PATE, R. R.; POWELL, K. E.; BLAIR, S. N.; FRANKLIN, B. A.; MACERA, C. A.; HEATH, G. W.; THOMPSON, P. D.; BAUMAN, A. **Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association.** Med Sci Sports Exerc, v. 39, n. 8, p. 1423-34, Aug 2007.

HENNEMAN, E. **Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge.** Science, v. 126, n. 1345–1347, 1957.

HOLM, L.; REITELSEDER, S.; PEDERSEN, T. G.; DOESSING, S.; PETERSEN, S. G.; FLYVBJERG, A.; ANDERSEN, J. L.; AAGAARD, P.; KJAER, M. **Changes in muscle size**

and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity. *J Appl Physiol*, v. 105, n. 5, p. 1454-61, Nov 2008.

IZQUIERDO, M.; IBANEZ, J.; GONZALEZ-BADILLO, J. J.; HAKKINEN, K.; RATAMESS, N. A.; KRAEMER, W. J.; FRENCH, D. N.; ESLAVA, J.; ALTADILL, A.; ASIAIN, X.; GOROSTIAGA, E. M. **Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains.** *J Appl Physiol* (1985), v. 100, n. 5, p. 1647-56, May 2006.

JACOBSON, B. **Reach failure to gain success.** *Natl Strength Coaches Assoc J*, v. 3, n. 2, p. 24-25, 1981.

LOONEY, D. P.; KRAEMER, W. J.; JOSEPH, M. F.; COMSTOCK, B. A.; DENEGAR, C. R.; FLANAGAN, S. D.; NEWTON, R. U.; SZIVAK, T. K.; DUPONT, W. H.; HOOPER, D. R.; HAKKINEN, K.; MARESH, C. M. **Electromyographical and Perceptual Responses to Different Resistance Intensities in a Squat Protocol: Does Performing Sets to Failure With Light Loads Recruit More Motor Units?** *J Strength Cond Res*, Aug 10 2015.

MACDOUGALL, J. D.; TUXEN, D.; SALE, D. G.; MOROZ, J. R.; SUTTON, J. R. **Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise.** *J Appl Physiol*, v. 58, n. 3, p. 785-90, Mar 1985.

MAZZEO, R. S.; TANAKA, H. **Exercise prescription for the elderly: current recommendations.** *Sports Med*, v. 31, n. 11, p. 809-18, 2001.

MITCHELL, C. J.; CHURCHWARD-VENNE, T. A.; WEST, D. W.; BURD, N. A.; BREEN, L.; BAKER, S. K.; PHILLIPS, S. M. **Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men.** *J Appl Physiol* (1985), v. 113, n. 1, p. 71-7, Jul 2012.

PINCIVERO, D. M.; GANDHI, V.; TIMMONS, M. K.; COELHO, A. J. **Quadriceps femoris electromyogram during concentric, isometric and eccentric phases of fatiguing dynamic knee extensions.** *J Biomech*, v. 39, n. 2, p. 246-54, 2006.

POLLOCK, M. L.; FRANKLIN, B. A.; BALADY, G. J.; CHAITMAN, B. L.; FLEG, J. L.; FLETCHER, B.; LIMACHER, M.; PINA, I. L.; STEIN, R. A.; WILLIAMS, M.; BAZZARRE, T. **AHA Science Advisory. Resistance exercise in individuals with and without cardiovascular disease: benefits, rationale, safety, and prescription: An advisory from the Committee on Exercise, Rehabilitation, and Prevention, Council on Clinical Cardiology, American Heart Association.** *Circulation*, v. 101, n. 7, p. 828-33, Feb 22 2000.

ROONEY, K. J.; HERBERT, R. D.; BELNAVE, R. J. **Fatigue contributes to the strength training stimulus.** *Med Sci Sports Exerc*, v. 26, p. 1160-1164, 1994.

SCHOENFELD, B. J.; CONTRERAS, B.; WILLARDSON, J. M.; FONTANA, F.; TIRYAKI-SONMEZ, G. **Muscle activation during low- versus high-load resistance training in well-trained men.** *Eur J Appl Physiol*, v. 114, n. 12, p. 2491-7, Dec 2014.

SCHOENFELD, B. J.; PETERSON, M. D.; OGBORN, D.; CONTRERAS, B.; SONMEZ, G. T. **Effects of Low- vs. High-Load Resistance Training on Muscle Strength and Hypertrophy in Well-Trained Men.** *J Strength Cond Res*, v. 29, n. 10, p. 2954-63, Oct 2015.

SCHOTT, J.; MCCULLY, K.; RUTHERFORD, O. M. **The role of metabolites in strength training. II. Short versus long isometric contractions.** *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, v. 71, n. 4, p. 337-41, 1995.

STONE, M. H.; CHANDLER, T. J.; CONLEY, M. S.; KRAMER, J. B.; STONE, M. E. **Training to Muscular Failure: Is it Necessary?** *Strength Cond J*, v. 18, n. 3, p. 44-48, 1996.

SUNDSTRUP, E.; JAKOBSEN, M. D.; ANDERSEN, C. H.; ZEBIS, M. K.; MORTENSEN, O. S.; ANDERSEN, L. L. **Muscle activation strategies during strength training with heavy loading vs. repetitions to failure.** *J Strength Cond Res*, v. 26, n. 7, p. 1897-903, Jul 2012.

WERNBOM, M.; AUGUSTSSON, J.; THOME, R. **The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans.** *Sports Med*, v. 37, n. 3, p. 225-64, 2007.

WILLARDSON, J. M. **The application of training to failure in periodized multiple-set resistance exercise programs.** *J Strength Cond Res*, v. 21, n. 2, p. 628-31, May 2007.

ESTUDO 2

A FALHA MUSCULAR DURANTE O TREINAMENTO DE FORÇA DE ALTA E BAIXA INTENSIDADE NÃO É NECESSÁRIA PARA MAXIMIZAR O AUMENTO DA FORÇA, HIPERTROFIA E ÂNGULO DE PENAÇÃO MUSCULAR

Resumo

O treinamento de força (TF) é o principal método utilizado para aumentar a força e a massa muscular esquelética, onde independente da intensidade, a realização de repetições até a falha muscular são recomendadas para maximizar o aumento de força e massa muscular. Entretanto, estudos recentes sugerem que pode não haver diferenças no recrutamento de unidades motoras entre ponto de falha muscular e o recrutamento nas repetições realizadas previamente a falha muscular. Portanto, o objetivo do presente estudo foi verificar do efeito do TF realizado em alta (TFAI) e baixa (TFBI) intensidade até a falha muscular e interrupção voluntária na força muscular, área de secção transversa muscular, ângulo de penação e comprimento do fascículo do músculo vasto lateral. Participaram do estudo 32 homens jovens, não treinados. Cada uma das pernas dos sujeitos foram consideradas uma unidade experimental e alocadas de maneira aleatória e contrabalanceada a uma das quatro condições de TF unilateral: TF realizado até a falha muscular em alta (TFAI-Fal) e baixa (TFBI-Fal) intensidade, ou TF realizado até a interrupção voluntária em alta (TFAI-Vol) e baixa (TFBI-Vol) intensidade. A força muscular foi mensurada por meio do teste de uma repetição máxima (1-RM), e a área de secção transversa (AST) e arquitetura muscular por meio de ultrassonografia antes (Pré), e após 6 (6S) e 12 (12S) semanas. Os resultados demonstraram aumentos significativos no 1-RM e AST após 6 ($19,04 \pm 1,5\%$ e $2,79 \pm 1,57\%$, respectivamente) e 12 semanas ($30,44 \pm 0,9\%$ e $7,8 \pm 1,58\%$, respectivamente) em todos os grupos experimentais, sem diferença entre eles. Adicionalmente, o ângulo de penação aumentou significativamente após 12 semanas ($10,94 \pm 4,6\%$), sem diferenças entre grupos. Em contrapartida, não foram verificadas mudanças significativas no comprimento do fascículo ($P > 0,05$). Em conclusão, nossos resultados indicam que o treinamento de força de alta (80% 1-RM) ou baixa (30% 1-RM) intensidade realizado até a interrupção voluntária é igualmente efetivo ao realizado até a falha muscular para aumentar a força, arquitetura e massa muscular.

Palavras-chave: Fadiga voluntária, área de secção transversa, comprimento do fascículo.

Abstract

Resistance training (RT) is the main method to promote increases in muscle strength and hypertrophy, in which repetitions to failure are commonly recommended to maximize gains in strength and muscle mass, independently of training intensity. However, recent studies have shown that training to failure might not result in maximal motor units' recruitment when compared to RT interrupted before failure. Thus, the aim of this study was to verify the effects of RT at high (HIRT) and low (LIRT) intensities performed to muscle failure or volitional interruption on vastus lateralis' (VL) muscle strength, cross-sectional area, pennation angle and fascicle length. Thirty-two untrained young men participated in the study. Each leg was considered an experimental unit, thus been allocated in one of the four possible unilateral RT conditions: RT to muscle failure at high (HIRT-Fai) and low (LIRT-Fai) intensities, and RT performed to volitional interruption at high (HIRT-Vol) and low (LIRT-Vol) intensities. Muscle strength was assessed through a one repetition maximum test (1-RM). Muscle cross sectional area (CSA) and muscle architecture were assessed using an ultrasound. Assessments were performed before (pre), and after 6 (6W) and 12 (12W) weeks. Results showed significant increases in 1-RM and CSA after 6 ($19.04 \pm 1.5\%$ and $2.79 \pm 1.57\%$, respectively) and 12 weeks ($30.44 \pm 0.9\%$ and $7.8 \pm 1.58\%$, respectively), with no apparent differences among training groups. Additionally, pennation angle showed marked increases after 12 weeks ($10.94 \pm 4.6\%$), with no differences among groups. On the other hand, fascicle length showed no increases whatsoever ($P > 0.05$). In conclusion, our results indicate that both high (80% 1-RM) and low (30% 1-RM) intensity resistance training performed to volitional interruption are equally effective in increasing muscle mass, strength and architecture when compared to RT performed to muscle failure.

Key words: volitional fatigue, cross sectional area, fascicle length.

INTRODUÇÃO

O treinamento de força (TF) é o principal método utilizado para aumentar a força e a área de secção transversa muscular (*i.e.*, hipertrofia muscular) (ACSM, 2009). A hipertrofia muscular, por sua vez, é comumente acompanhada de alterações na arquitetura muscular (*i.e.*, ângulo de penação das fibras musculares e comprimento do fascículo) (AAGAARD et al., 2001; ACSM, 2009). Diretrizes recomendam que intensidades superiores à 60% de uma repetição máxima (1-RM) sejam utilizadas para aumentar a força e massa muscular, as quais estão associadas a alterações na arquitetura muscular (KAWAKAMI et al., 1993; ACSM, 2009). Entretanto tem-se postulado que intensidades superiores (*e.g.*, 80-95% 1-RM) podem resultar em aumentos ainda maiores na força e hipertrofia muscular (FRY, 2004; WERNBOM et al., 2007). Outro fator apontado como capaz de maximizar essas adaptações é a realização do TF de alta intensidade (TFAI) realizado até a falha muscular (JACOBSON, 1981; ROONEY et al., 1994; SCHOTT et al., 1995; DRINKWATER et al., 2005). Contudo, recentemente, uma meta-análise demonstrou que o TF realizado até a falha muscular não promove maiores ganhos de força muscular quando comparado ao TFAI realizado até antes da falha muscular (*i.e.*, não falha muscular) (DAVIES et al., 2016). Entretanto, os efeitos do TFAI realizado até a falha muscular na arquitetura e massa muscular ainda permanecem desconhecidos.

Embora seja recomendada a realização do TFAI até a falha muscular para maximizar os ganhos de força e massa muscular (ANDERSON et al., 1982; CAMPOS et al., 2002; FRY, 2004; WERNBOM et al., 2007; ACSM, 2009), estudos recentes demonstraram que o treinamento de força realizado em baixa intensidade (TFBI), mas até a falha muscular, pode apresentar ganhos de força e massa muscular similares aos obtidos no TFAI até a falha muscular (BURD et al., 2010; MITCHELL et al., 2012; OGASAWARA et al., 2013; SCHOENFELD et al., 2015). Por outro lado, quando não é realizado até a falha muscular, os ganhos de força e massa muscular são menores quando comparados ao TFAI (WERNBOM et al., 2007; HOLM et al., 2008; SCHUENKE et al., 2013). Dessa forma, esses resultados sugerem que a falha muscular pode ser importante para maximizar as adaptações decorrentes do TFBI. Entretanto, nenhum estudo comparou diretamente os efeitos do TFBI realizado ou não até a falha muscular na força, arquitetura e massa muscular.

Apesar das recomendações da realização da falha muscular durante o TF, (JACOBSON, 1981; ROONEY et al., 1994; SCHOTT et al., 1995; DRINKWATER et al., 2005; MITCHELL et al., 2012; OGASAWARA et al., 2013; SCHOENFELD et al., 2015),

tem sido sugerido que a realização do TF até a falha muscular por períodos prolongados de treinamento pode apresentar efeitos adversos *e.g.*, *overtraining* (STONE et al., 1996), maior risco de lesão musculoesquelética por esforço repetitivo (STONE et al., 1996) e maiores respostas hemodinâmicas, com picos pressóricos próximos ao ponto de falha muscular (MACDOUGALL et al., 1985). Nesse sentido, algumas diretrizes recomendam que o TF não seja realizado até a falha muscular, mas que apresente um nível de fadiga substancial, e que seja realizado até a falha, interrupção ou exaustão voluntária (*i.e.*, quando o indivíduo decide parar o exercício voluntariamente) (PITCHER et al., 1997; POLLOCK et al., 2000; MAZZEO et al., 2001; HASKELL et al., 2007). Entretanto, até o presente momento, não se tem conhecimento se o aumento da força e hipertrofia muscular, bem como as alterações na arquitetura muscular decorrentes do TFAI e TFBI realizados até a interrupção voluntária são similares aos observados após o TFAI e TFBI realizados até a falha muscular. Assim o objetivo do presente estudo foi verificar do efeito do TFAI e TFBI realizados até a falha muscular e interrupção voluntária na força muscular, área de secção transversa muscular, ângulo de penação e comprimento do fascículo do músculo vasto lateral. Nossa hipótese é que os aumentos na força muscular, área de secção transversa muscular, ângulo de penação e comprimento do fascículo decorrentes do TFAI realizado até a interrupção voluntária seja similar às obtidas por meio do TFAI realizado até a falha muscular. Porém, nos protocolos TFBI, espera-se que essas adaptações sejam maiores quando o treinamento for realizado até a falha muscular.

MÉTODOS

Participantes

Participaram do estudo 32 homens jovens (Idade: $23,0 \pm 3,6$ anos; Estatura: $176,0 \pm 0,6$ cm; IMC: $24,3 \pm 3,9$ kg/m²), aparentemente saudáveis segundo Questionário de Prontidão para Atividade Física (*Physical Activity Readiness Questionnaire* – PAR-Q), não obesos, que não realizavam TF há pelo menos 6 meses. Foram incluídos no estudo somente indivíduos sem comprometimentos ósseos, neuromusculares, ou quaisquer outras afecções que contraindicassem o uso dos procedimentos propostos, nos quadris e membros inferiores. Antes de iniciar a pesquisa, os indivíduos foram instruídos sobre o estudo e assinaram um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, conforme Resolução Nº 466/12 do Conselho Nacional de Saúde.

Delineamento Experimental

Inicialmente os participantes do estudo realizaram uma visita ao laboratório para ajuste individual e padronização dos movimentos no equipamento utilizado durante os testes e treinamentos. As informações foram registradas e utilizadas nas demais visitas. Antes do início dos treinamentos (T1), os participantes foram familiarizados com o teste de 1-RM e com os protocolos de treinamento. 72h após a familiarização, realizaram novamente o teste de 1-RM, com reteste subsequente após 72h nos casos onde a variação na carga foi superior a 5% entre os testes (LEVINGER et al., 2009). Decorridas 72h do teste de 1-RM, foram mensuradas a área de secção transversa (AST) e arquitetura muscular (ângulo de penação [AP] e comprimento do fascículo [CF]) do músculo vasto lateral (VL). Cada perna dos participantes foi considerada como uma unidade experimental, sendo distribuídas em quartís, de acordo com os valores de 1-RM e AST muscular. Em seguida foram alocadas de maneira aleatória e contrabalanceada a uma das quatro condições de TF unilateral: TFAI realizado até a interrupção voluntária (TFAI-Vol); TFAI realizado até a falha muscular (TFAI-Fal); TFBI realizado até a interrupção voluntária (TFBI-Vol); e TFBI realizado até a falha muscular (TFBI-Fal); onde cada grupo foi composto por 16 pernas ($n = 16$). Assim, cada participante treinou ambas as pernas, sendo distribuído entre duas das quatro condições de TF. O período de 12 semanas (12S) de treinamento de força foi iniciado ao menos 24h após a aquisição da AST e arquitetura muscular. Após a sexta semana de treinamento (6S), um novo teste de 1-RM e uma nova avaliação da AST e arquitetura muscular foram realizadas. Os voluntários seguiram treinando por mais 6 semanas, com carga ajustada ao novo valor de 1-RM. Após intervalo mínimo de 72h da última sessão de treinamento, foi realizada novamente a mensuração da AST, arquitetura muscular e 1-RM (12S) (Figura 1).

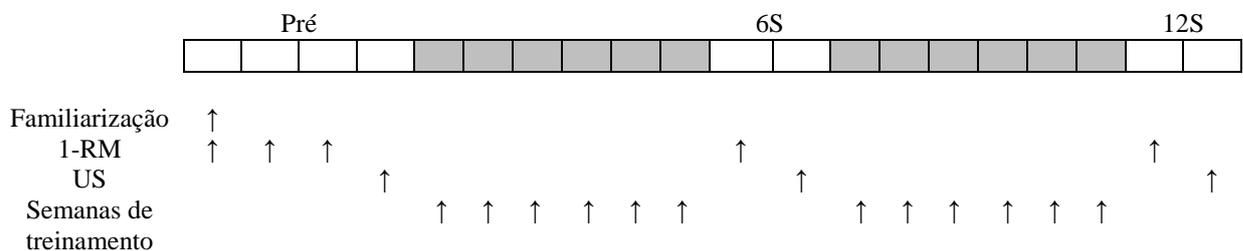


Figura 1. Delineamento experimental do estudo: 12 semanas de treinamento de força, com dois treinos semanais (72h entre treinos), com avaliações de força máxima dinâmica (1-RM), área de secção transversa (AST), ângulo de penação (AP) e comprimento do fascículo (CF) antes (Pré), após 6 semanas (6S) e 12 semanas (12S) de treinamento.

Protocolos de treinamento de força

Foram realizadas duas sessões semanais de treinamento de extensão unilateral do joelho no equipamento cadeira extensora por um período de 12 semanas, totalizando 24 sessões. Para os grupos TFAI-Vol e TFAI-Fal, os participantes realizaram 3 séries à 80% 1-RM, com intervalo de 2 minutos entre as séries. Já os grupos TFBI-Vol e TFBI-Fal realizaram o mesmo número de séries e o mesmo tempo nas pausas que os grupos de alta intensidade, porém a 30% de 1-RM). Nos protocolos até a falha muscular, as repetições de cada série foram realizadas até a incapacidade de executar a repetição em amplitude previamente estipulada (IZQUIERDO et al., 2006; BURD et al., 2010; SCHOENFELD et al., 2014), avaliada pelos pesquisadores familiarizados com o protocolo. Para os protocolos de TF realizados até interrupção voluntária, o término de cada série foi determinado pelo próprio indivíduo, quando este decidiu interromper o exercício (PITCHER et al., 1997) previamente a falha muscular. Dessa forma, todos foram orientados previamente sobre os critérios para estabelecimento da falha muscular.

Teste de força máxima dinâmica

Os testes de 1-RM foram realizados em cadeira extensora, de maneira unilateral (membro direito e esquerdo testados individualmente), seguindo as recomendações descritas por Brown e Weir (2001), exceto em relação ao aquecimento, onde não se realizou alongamento previamente ao teste. Inicialmente, os participantes realizaram aquecimento geral em bicicleta ergométrica a $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ por 5 minutos, seguido por duas séries de aquecimento específico para extensores do joelho na cadeira extensora. Na primeira série, os participantes realizaram oito repetições com 50% da 1-RM estimada, obtida durante as sessões de familiarização. Para a segunda série, três repetições com carga de 70% da 1-RM estimada foram realizadas. Um intervalo de dois minutos foi permitido entre as séries de aquecimento. Após o aquecimento, os participantes realizaram o teste de 1-RM. Para tal, foram posicionados no aparelho devidamente ajustado de acordo com os dados coletados na visita inicial. Os participantes iniciaram o teste com o joelho estendido na sua amplitude máxima individual ($\sim 180^\circ$ verificado por goniômetro manual), em seguida realizando a fase excêntrica do movimento até 90° de flexão de joelho, para então retornar a posição inicial. Foram permitidas até cinco tentativas para atingir a 1-RM de extensão do joelho, com intervalos de 3 minutos entre as tentativas. Após 72h, um reteste foi realizado. Os casos que apresentaram variação superior a 5% no valor da 1-RM realizaram um novo reteste após 72h.

Área de secção transversa (AST) muscular

A AST do músculo vasto lateral foi mensurada por meio de ultrassonografia. Para aquisição das imagens, procedimentos semelhantes aos de Lixandrão et al. (2014) foram adotados. Os participantes foram orientados a não realizar atividade física vigorosa por pelo menos 72h previamente ao teste. Ao chegar ao laboratório os voluntários foram posicionados em decúbito dorsal por 15 minutos para que mudanças hídricas teciduais ocorressem previamente à obtenção das imagens. As imagens foram coletadas utilizando o modo-B do ultrassom (US), com um cabeçote linear de 7.5 MHz (Samsung, MySono U6, indústria e comércio Ltda. São Paulo, Brasil). Gel de transmissão foi aplicado no local da coleta em quantidade suficiente para prover acoplamento acústico sem depressão da derme. A aquisição da AST_{VL} foi obtida a 50% do comprimento da coxa, determinada como o ponto médio entre o trocanter maior e o epicôndilo lateral do fêmur, identificado por palpação manual. Os participantes foram posicionados em supino e as imagens foram obtidas no plano sagital paralelamente ao eixo longo do fêmur. A pele foi marcada transversalmente em intervalos de 2 cm a partir do ponto de referência seguindo nas direções medial e lateral da coxa para orientar o deslocamento do cabeçote. Imagens sequenciais do US foram obtidas alinhando a borda superior do cabeçote com as demarcações na pele seguindo da direção medial para lateral. Após a coleta dos dados, a AST_{VL} foi reconstruído seguindo os procedimentos descritos por Reeves et al. (2004), onde as imagens foram abertas sequencialmente em *Power point* (Microsoft, USA) e rotacionadas manualmente até que toda a área do VL fosse reconstruída. Três imagens consecutivas foram analisadas para determinação da AST_{VL} e a média foi obtida utilizando a ferramenta poligonal no software *ImajeJ*. A fáscia muscular e tecido ósseo subjacente foram evitados ao máximo para que apenas o tecido muscular fosse analisado (Figura 2). O coeficiente de variação e o erro típico foram de 1,38% e 0,33 cm, respectivamente.

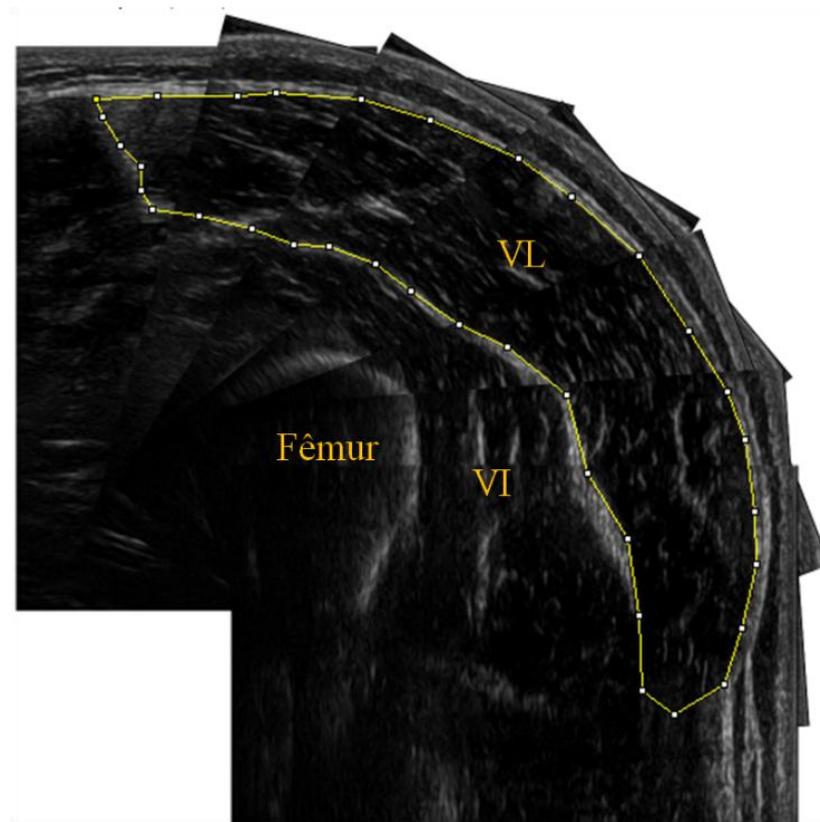


Figura 2. Imagem representativa da área de secção transversa do vasto lateral (VL) mensurada por ultrassonografia e quantificada no software *ImageJ*. VI, vasto intermédio.

Ângulo de penetração (AP)

Procedimentos similares aos de Blazeovich et al. (2007). O ângulo de penetração do vasto lateral foi mensurado utilizando o modo B do ultrassom, no ponto correspondente a 50% do comprimento da coxa. O transdutor foi posicionado longitudinalmente à interface de tecido muscular e inclinado lateralmente de maneira a otimizar a visualização dos fascículos. O ângulo de penetração foi determinado como o ângulo formado pela interseção dos fascículos na aponeurose profunda, cuja média foi calculada a partir de três imagens consecutivas por meio da ferramenta angular no software *ImageJ* (Figura 3). O coeficiente de variação e o erro típico foram de 1,87% e 0,35 °, respectivamente.

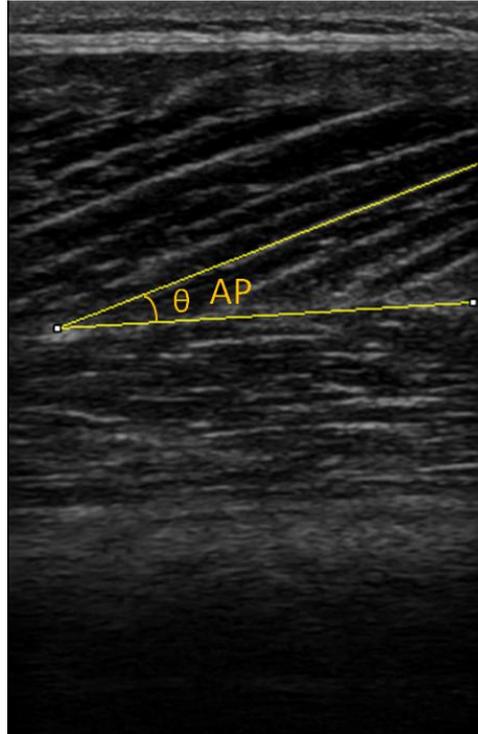


Figura 3. Imagem representativa do ângulo de penação do vasto lateral (VL) mensurada por ultrassonografia e quantificada no software *ImageJ*. VI, vasto intermédio.

Comprimento do fascículo (CF)

O comprimento do fascículo foi calculado a partir da mesma imagem utilizada para o cálculo do AP (BLAZEVIICH et al. (2007)). O CF foi definido como o comprimento fascicular entre as aponeuroses superficial e profunda. Quando o fascículo se estendeu além da imagem, a porção faltosa foi estimada por extrapolação linear no software *ImageJ*. A distância linear foi medida traçando uma reta a partir do fim visível do fascículo até sua interseção com uma reta traçada a partir da aponeurose superficial (Figura 4). Três imagens consecutivas foram analisadas e a média obtida foi considerada o valor real. O coeficiente de variação e o erro típico foram de 1,89% e 0,12cm, respectivamente.

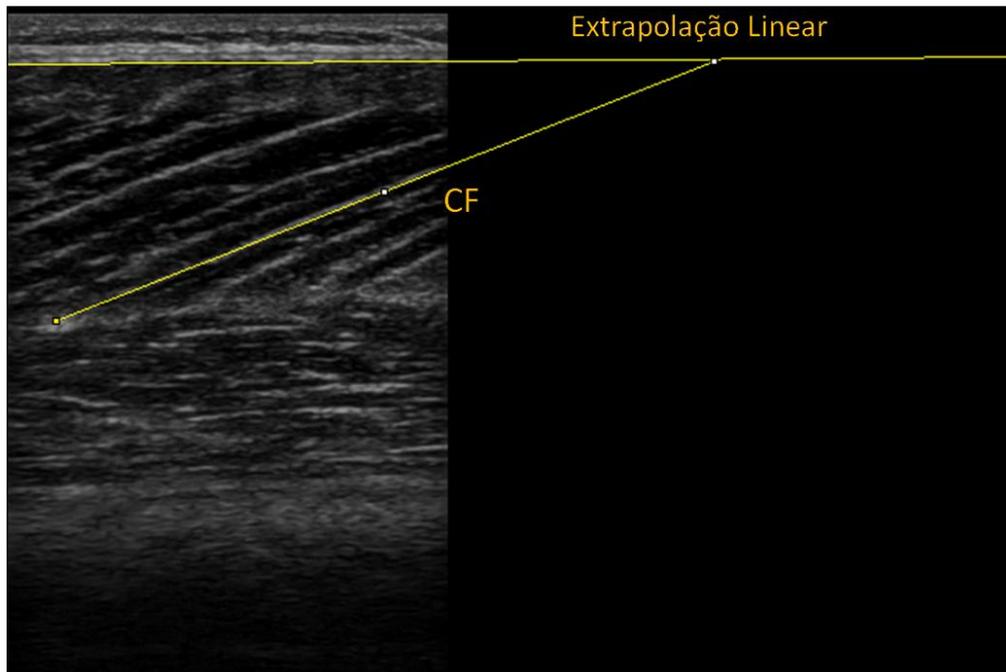


Figura 4. Imagem representativa do comprimento do fascículo do vasto lateral (VL) mensurada por ultrassonografia e quantificada no software *ImageJ*. VI, vasto intermédio.

Análise dos dados

Após a inspeção visual dos dados, aplicou-se o teste de *Shapiro-Wilk* a fim de verificar a normalidade dos dados. Em seguida uma análise de modelo misto foi aplicada, assumindo intensidade (30% vs. 80% 1-RM), condição (Falha muscular ou interrupção voluntária), e tempos (Pré, 6S e 12S) como fatores fixos e os participantes como fator randômico para as variáveis dependentes do estudo (VT, 1-RM, AST, AP e CF). Em casos onde o valor de F foi significativo, ajustes de *Tukey* foram aplicados para comparações múltiplas.

RESULTADOS

Participantes

Vinte e sete participantes completaram o estudo, totalizando unidades experimentais $n = 54$ pernas (TFAI-Falha = 14; TFAI-Vol = 14; TFBI-Falha = 13; TFBI-Vol = 13). Dois participantes abandonaram o estudo por motivos não relacionados ao treino (1 por problemas de saúde e 1 por problemas pessoais), e três não completaram as 24 sessões de treinamento por baixa adesão.

Volume total e número de repetições

O volume total (VT) e número de repetições (Rep) podem ser encontrados na Tabela 1. Adicionalmente, o VT semanal dos quatro grupos experimentais se encontra na figura 5. Não foram encontradas diferenças significativas no VT entre os grupos TFAI-Fal, TFAI-Vol, TFBI-Fal e TFBI-Vol ($P > 0,05$). Entretanto, os protocolos de baixa intensidade (TFBI-Fal e TFBI-Vol) resultaram em um número significativamente maior de repetições (~104 %; $P < 0,0001$) que os protocolos de alta intensidade (TFAI-Fal e TFAI-Vol), sem diferenças significantes entre os protocolos de mesma intensidade ($P > 0,05$).

Tabela 1. Volume total do treinamento de força de alta intensidade até a falha muscular (TFAI-Fal), treinamento de força de alta intensidade até a interrupção voluntária (TFAI-Vol), treinamento de força de baixa intensidade até a falha muscular (TFBI-Fal) e treinamento de força de baixa intensidade até a interrupção voluntária (TFBI-Vol).

Variável	TFAI-Fal	TFAI-Vol	TFBI-Fal	TFBI-Vol
VT (kg)	26695,00 ± 6785,00	26043,20 ± 5748,04	21115,04 ± 6403,60	20315,45 ± 5234,54

VT, volume total. Valores apresentados como média ± desvio-padrão.

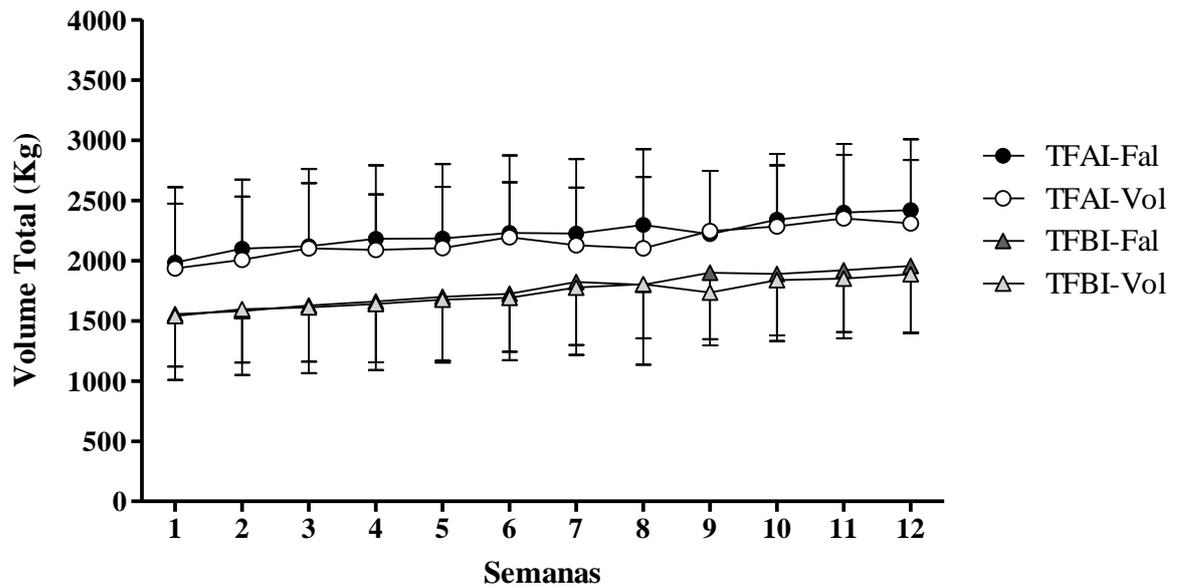


Figura 5. Volume total (kg) semanal (S) realizado nos treinamentos de alta (80% 1-RM) e baixa intensidade (30% 1-RM) nas condições de falha muscular e interrupção voluntária. TFAI-Fal – treinamento de força de alta intensidade até a falha muscular; TFAI-Vol – Treinamento de alta intensidade até a interrupção voluntária; TFBI-Fal – treinamento de força de baixa intensidade realizado até a falha muscular; TFBI-Vol – treinamento de força de baixa intensidade até a interrupção voluntária.

Força máxima dinâmica (1-RM)

Os grupos TFAI-Fal, TFAI-Vol, TFBI-Fal e TFBI-Vol apresentaram aumentos significantes nos valores de 1-RM após 6S (todos $P < 0,0001$) e 12S (todos $P < 0,0001$) quando comparado ao Pré. Houve aumento significativo também nos valores de 1-RM para todos os grupos após 6S e 12S (todos $P < 0,0001$). Entretanto, não houve diferença significativa entre os protocolos de TF ($P > 0,05$) (Figura 5).

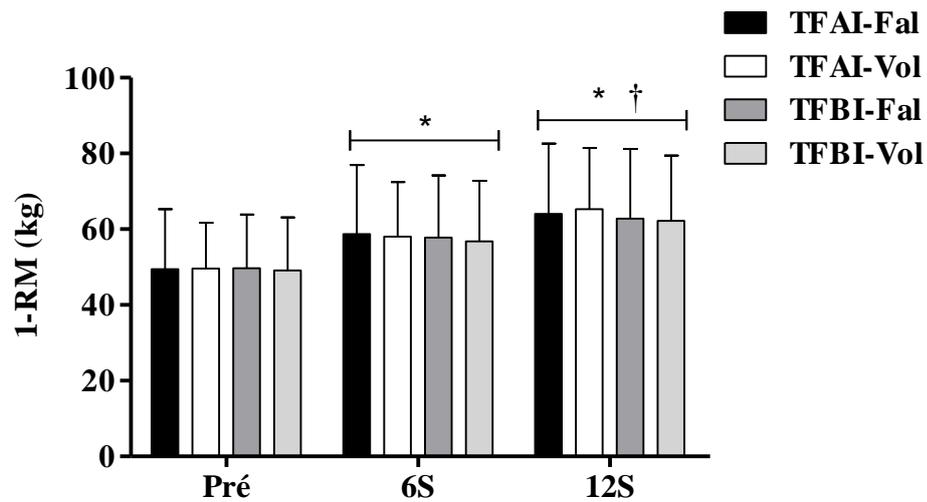


Figura 5. Força máxima dinâmica (1-RM) antes (Pré), após 6 (6S) e 12 semanas (12S) do treinamento de força de alta intensidade até a falha muscular (TFAI-Fal), treinamento de força de alta intensidade até a interrupção voluntária (TFAI-Vol), treinamento de força de baixa intensidade até a falha muscular (TFBI-Fal) e treinamento de força de baixa intensidade até a interrupção voluntária (TFBI-Vol). Valores apresentados em média \pm DP. *Diferença significativa comparado com Pré; †Diferença significativa comparado com 6S.

Área de secção transversa (AST) muscular

Os grupos TFAI-Fal, TFAI-Vol, TFBI-Fal e TFBI-Vol apresentaram aumentos significantes após 6S (todos $P < 0,0001$) e 12S (todos $P < 0,0001$) quando comparado ao Pré. Houve aumento significativo também nos valores de AST de 6S para 12S (todos $P < 0,0001$) para todos os grupos. Porém, não houve diferença significativa entre os grupos ($P > 0,05$) (Figura 6).

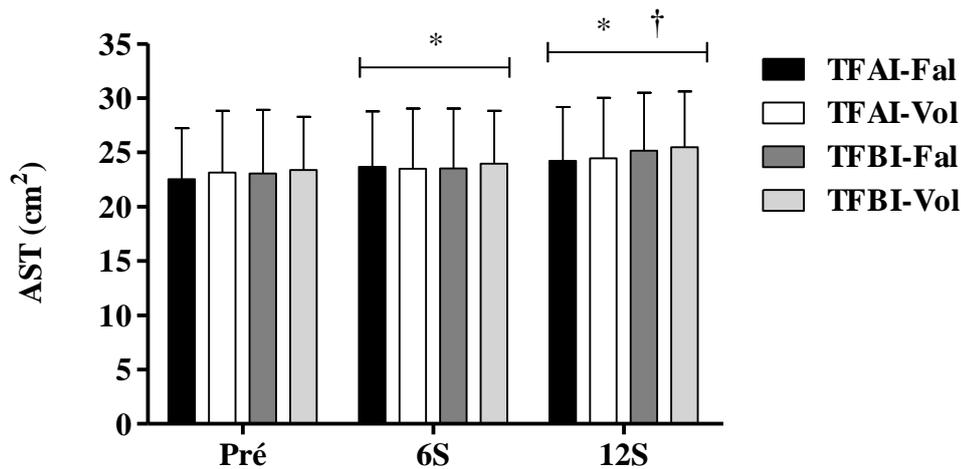


Figura 6. Área de secção transversa (AST) muscular antes (T1), após 6 (6S) e 12 semanas (12S) do treinamento de força de alta intensidade até a falha muscular (TFAI-Fal), treinamento de força de alta intensidade até a interrupção voluntária (TFAI-Vol), treinamento de força de baixa intensidade até a falha muscular (TFBI-Fal) e treinamento de força de baixa intensidade até a interrupção voluntária (TFBI-Vol), nas quatro condições experimentais (média \pm DP). Valores apresentados em média \pm DP. *Diferença significativa comparado ao Pré; †Diferença significativa comparado à 6S.

Ângulo de penação (AP)

Todos os grupos apresentaram aumento significativo no AP após 12S (todos $P < 0,0001$) quando comparado ao Pré. Houve aumento significativo também nos valores de AP de 6S para 12S (todos $P < 0,0001$) para todos os grupos. Não houve diferença significativa entre os grupos ($P > 0,05$) (Tabela 2).

Comprimento do fascículo (CF)

O CF não apresentou mudanças significantes para nenhum dos grupos de treinamento ($P > 0,05$). Também não foram encontradas diferenças significantes entre os grupos (Tabela 2).

Tabela 2. Ângulo de penação (AP) e comprimento do fascículo (CF) antes (T1), após 6 (T2) e 12 (T3) semanas de treinamento de força de alta intensidade até a falha muscular (TFAI-Fal), treinamento de força de alta intensidade até a interrupção voluntária (TFAI-Vol), treinamento de força de baixa intensidade até a falha muscular (TFBI-Fal) e treinamento de força de baixa intensidade até a interrupção voluntária (TFBI-Vol).

Treinamentos	Tempo	AP (°)	CF (cm)
TFAI-Fal	Pré	19,60 ± 2,02	6,20 ± 0,92
	6S	20,41 ± 2,14	5,88 ± 0,52
	12S	22,05 ± 1,74*†	5,90 ± 0,48
TFAI-Vol	Pré	19,98 ± 2,47	5,83 ± 0,81
	6S	20,31 ± 2,71	5,90 ± 0,59
	12S	21,44 ± 2,64*†	5,75 ± 0,72
TFBI-Fal	Pré	19,63 ± 3,94	6,14 ± 0,81
	6S	20,95 ± 3,42	6,25 ± 0,82
	12S	22,11 ± 3,45*†	6,02 ± 0,49
TFBI-Vol	Pré	20,68 ± 2,97	6,00 ± 0,87
	6S	21,25 ± 2,54	6,19 ± 0,86
	12S	22,14 ± 3,72*†	6,05 ± 0,70

*Diferença significativa comparado ao Pré ($P < 0.05$); †Diferença significativa comparado à 6S ($P < 0.05$). Valores apresentados em média ± DP.

DISCUSSÃO

Nossos resultados indicam que a força muscular (1-RM), área de secção transversa muscular (AST) e ângulo de penação (AP) das fibras musculares aumentaram na mesma magnitude, independente da intensidade (30% vs. 80% 1-RM) e da realização ou não da falha muscular durante o treinamento de força (TF). Esses aumentos ocorreram não somente após 12 semanas, mas também em um curto período de treinamento (*i.e.*, 6 semanas), exceto para o ângulo de penação (AP). Nossos dados fornecem evidências sobre as adaptações ao treinamento de força de alta e baixa intensidade, nos quais a sua realização até a interrupção voluntária é suficiente para maximizar os ganhos de força e massa muscular.

Nesse sentido, quando comparados os grupos com diferentes intensidades (80% vs. 30% 1-RM), nossos resultados demonstraram que o TFBI-Fal apresentou aumentos nos valores de 1-RM e AST similares ao TFAI-Fal após 6S (20,13% e 18,76% no 1-RM, e 1,99% e 5,08% na AST, respectivamente) e 12S (30,04% e 29,45% no 1-RM, e 9,01% e 7,56%, respectivamente). Esses resultados corroboram, em partes, com estudos que compararam esses mesmos protocolos de treinamento. Por exemplo, em relação à força muscular, estudos

recentes têm demonstrado maiores aumentos nos valores de 1-RM para o TFAI-Fal comparado ao TFBI-Fal (MITCHELL et al., 2012; OGASAWARA et al., 2013; SCHOENFELD et al., 2015). Schoenfeld et al. (2015) verificaram que indivíduos treinados apresentaram maiores aumentos nos valores de 1-RM dos exercícios agachamento e supino reto com o TFAI-Fal em relação ao TFBI-Fal. Nesse sentido, Ogasawara et al. (2013) encontraram diferença significativa entre os valores de 1-RM do exercício supino reto após o TFBI-Fal (8,6%) com os obtidos após 6 semanas de TFAI-Fal (21%). É possível que a diferença entre esses e os nossos resultados estejam relacionadas ao nível de treinamento dos indivíduos e o tipo de exercício realizado (*i.e.*, multiarticulares vs. uniarticulares). Assim, futuros estudos devem investigar o efeito de diferentes intensidades de TF na força muscular comparando indivíduos treinados e não treinados e exercícios uni e multiarticulares. Por outro lado, em relação à AST muscular, sugere-se que a falha muscular pode ser importante para maximizar a hipertrofia muscular em protocolos TF de baixa intensidade (MITCHELL et al., 2012; OGASAWARA et al., 2013). Por exemplo, Mitchell et al. (2012) compararam os protocolos de TFAI-Fal e TFBI-Fal com intensidade iguais as do presente estudo (80% vs. 30% de 1-RM). Os resultados demonstraram aumentos similares na AST do quadríceps (7,2% e 6,8%, respectivamente) após 10 semanas de treinamento. Nesse sentido, Ogasawara et al. (2013) encontraram aumentos similares na AST do bíceps braquial e peitoral maior após TFAI-Fal (11,9% e 17,6%, respectivamente) e TFBI-Fal (9,8% e 21,1%, respectivamente). Uma possível explicação para as adaptações similares pode estar está relacionada a um recrutamento de unidades motoras (UM) similar entre protocolos de TFAI-Fal e TFBI-Fal quando ambos são realizados até a falha muscular. Segundo o princípio do tamanho, as UMs de baixo limiar, compostas predominantemente por fibras tipo I, são recrutadas primeiramente, seguidas das UMs de alto limiar, as IIa e IIx, a medida que mais força é requerida (HENNEMAN, 1957). No entanto, quando uma contração em baixa intensidade é realizada por um período prolongado, à medida que as UMs recrutadas inicialmente se fatigam, um recrutamento adicional será necessário para sustentar a geração de força (FALLENTIN et al., 1993). Desta forma, quando as repetições com cargas mais leves são realizadas até a falha muscular, é possível que um recrutamento de UMs próximo da máxima seja requisitado para manter a tensão muscular (FALLENTIN et al., 1993; FUGLEVAND et al., 1993).

Apesar de a falha muscular ser considerada fundamental para que o TFBI apresente adaptações neuromusculares similares ao TFAI (MITCHELL et al., 2012; OGASAWARA et

al., 2013; SCHOENFELD et al., 2015), em nosso estudo isso ocorreu mesmo quando o exercício foi realizado até a interrupção voluntária. Nossos resultados demonstraram aumentos similares entre TFAI-Vol e TFBI-Vol nos valores de 1-RM após 6S (17,02% vs. 20,25%, respectivamente) e 12S (31,55% vs. 30,74%, respectivamente) e também na AST após 6S (1,56% vs. 2,54%) e 12S (5,66% vs. 8,98%, respectivamente). Entretanto, esses achados são contrários aos de vários estudos que demonstraram que, quando o treinamento de força não é realizado até a falha muscular, altas cargas promovem adaptações superiores a baixas cargas (FRY, 2004; WERNBOM et al., 2007; HOLM et al., 2008; ACSM, 2009; KUMAR et al., 2009). Por exemplo, Kumar et al., (2009) demonstraram um maior aumento da síntese proteica miofibrilar com intensidades acima de 60% de 1-RM comparado a intensidades entre 20-40% 1-RM e volume entre 14-27 repetições por série. Nesse sentido, Holm et al., (2008) verificaram que os ganhos de força e AST muscular foram maiores para o treinamento de força de alta intensidade (8 repetições à 70% de 1-RM) comparado ao treinamento de força de baixa intensidade (36 repetições à 15% de 1-RM) após 12 semanas. Apesar de resultados divergentes, assim como no presente estudo, os protocolos de alta e baixa intensidade apresentaram VT equalizado e não foram realizados até a falha muscular. É possível especular que, nos estudos supracitados, o recrutamento de UM decorrente dos protocolos de TFBI foi inferior ao recrutamento do TFAI devido ao menor grau de fadiga proporcionado pelo protocolo de TFBI utilizado. Por outro lado, no presente estudo, é possível que a interrupção voluntária tenha resultado em um grau de fadiga substancial, que possibilitou recrutamento de UM similar ao obtido com a utilização de altas cargas, mesmo em baixa intensidade (FALLENTIN et al., 1993; FUGLEVAND et al., 1993).

No que diz respeito à realização da falha muscular durante o TF, embora seja sugerida (JACOBSON, 1981; ROONEY et al., 1994; SCHOTT et al., 1995; DRINKWATER et al., 2005), nossos dados não suportam a hipótese de que a falha muscular é necessária para maximizar os ganhos de força e massa muscular. Nossos resultados demonstraram aumento similar dos valores de 1-RM e AST muscular entre TFAI-Fal (29,45% e 7,56%, respectivamente) e TFAI-Vol (31,55% e 5,66%, respectivamente), e entre TFBI-Fal (30,04% e 9,01%, respectivamente) e TFBI-Vol (30,74% e 8,98%, respectivamente). Em relação ao TF de alta intensidade, vários estudos demonstraram que a falha muscular não é necessária para maximizar os ganhos de força muscular de indivíduos não treinados. Por exemplo, Folland et al. (2002) demonstraram que indivíduos que realizaram o TF com intensidades de ~75% até a falha muscular, ou não, apresentaram aumentos similares nos valores de 1-RM.

Adicionalmente, Izquierdo et al. (2006) demonstraram aumentos similares nos valores de 1-RM entre protocolos de TF realizados até a falha muscular (3 séries de 10-RM à 70-80% 1-RM) ou não (~6 séries de 3-5 repetições à 70-80% 1-RM). Adicionalmente, uma recente meta-análise demonstrou não haver benefícios adicionais nos ganhos de força muscular quando o TFAI é realizado até a falha muscular (DAVIES et al., 2016). Entretanto, pouco é conhecido sobre a contribuição do TFAI-Fal na hipertrofia muscular. Em estudo recente, Sampson e Groeller (2015) investigaram o efeito do treinamento de força de alta intensidade (85% de 1-RM), realizado ou não até a falha muscular, na AST muscular dos flexores do cotovelo. Os indivíduos foram randomizados em três diferentes protocolos: 1) controle: 4 séries até a falha (6-RM), onde cada repetição foi realizada em velocidade de 2s para fase concêntrica e 2s para a excêntrica; 2) encurtamento rápido: 4 séries de 4 repetições, onde não ocorria falha muscular e a fase concêntrica foi realizada na maior velocidade possível e 2s de fase excêntrica; e 3) alongamento-encurtamento: 4 séries de 4 repetições, onde ambas as fases do exercício foram realizadas na maior velocidade possível, sem que ocorresse falha muscular. Os resultados demonstraram que, após 12 semanas, todos os grupos apresentaram aumentos significantes na AST (~11,4%), sem diferença entre eles. Porém, é necessário considerar que a velocidade de execução dos exercícios pode ter influenciado os resultados, uma vez que foram diferentes entre os protocolos. Embora seja sugerido que TFAI-Fal pode recrutar um maior número de UM e com isso maximizar os ganhos de força e hipertrofia muscular (WILLARDSON, 2007), os nossos e outros achados não suportam essa afirmação. Considerando que não houve diferença significativa no VT entre TFAI-Fal vs. TFAI-Vol, é possível que os protocolos de treinamento tenham promovido um recrutamento de UM e aumento da síntese proteica semelhante, o que explicaria os ganhos similares de força e massa muscular. Nesse sentido, demonstramos pela primeira vez que, assim como no TF realizado em alta intensidade, também no TF de baixa intensidade a falha muscular não apresenta vantagens em relação à interrupção voluntária para o aumento de força e hipertrofia muscular. Esses resultados contrariam a nossa hipótese inicial, visto que esperávamos diferenças entre TFBI-Fal e TFBI-Vol. Nossa hipótese foi baseada no fato da síntese proteica miofibrilar, aumento da força e hipertrofia serem menores no TFBI quando não realizado até a falha muscular comparado ao TFBI-Fal. Por exemplo, Burd et al., (2010) demonstraram que a taxa de síntese proteica miofibrilar pode aumentar mesmo com TFBI-Fal (30% 1-RM), o que não ocorre quando o treinamento é realizado na intensidade, sem a realização da falha muscular. Entretanto, o volume total (série x repetições x carga [kg]) entre os grupos não foi equalizado,

o que sugere que ao invés da falha muscular, o maior VT do TFBI-Fal pode ter contribuído para o maior aumento da síntese proteica miofibrilar. Isso pode ser confirmado pelos nossos resultados, uma vez que o aumento similar para força e AST muscular entre TFBI-Fal e TFBI-Vol foram obtidos com VT equalizado.

Diante dos ganhos de força e massa muscular similares entre TFAI-Fal, TFAI-Vol, TFBI-Fal e TFBI-Vol, é plausível sugerir que o recrutamento de UM no momento de interrupção voluntária seja similar à da falha muscular, o que explicaria os aumentos similares na força muscular independente da intensidade do TF. Nesse sentido, Sundstrup et al. (2012) verificaram que a amplitude da EMG atingiu os níveis máximos previamente ao ponto de falha muscular, onde mais repetições não resultaram em maior amplitude da EMG. Coletivamente, esses achados sugerem que a falha muscular não é necessária para maximizar os ganhos de força e massa muscular. Nossos dados suportam a hipótese de que o TF realizado até a interrupção voluntária oferece estímulo suficiente para maximizar os ganhos de força muscular em protocolos de TF de alta e baixa intensidade.

Outra possível explicação para que, independente da intensidade (80% vs. 30% 1-RM) e da forma de realização do TF (*i.e.*, falha muscular ou interrupção voluntária), todos os grupos tenham apresentado aumentos similares na força e massa muscular aumento similar do AP (aumento variando entre 7-16%) entre os grupos. Tanto o AP quanto o CF são considerados importantes parâmetros da arquitetura muscular. O primeiro por determinar a direção do componente de força durante a contração (KAWAKAMI et al., 1995), e o segundo por estar relacionado à curva comprimento-tensão, onde os sarcômeros de fascículos de maior comprimento trabalhariam no ponto ótimo da curva (ALEGRE et al., 2006), estando assim diretamente associados à capacidade de produção de força muscular. Nossos resultados corroboram com os achados de Kawakami et al. (1995), que verificaram aumento significativo no AP (~31%) do tríceps braquial de 5 homens jovens, previamente destreinados em força, após 16 semanas de TF (5 x 8 repetições à 80% 1-RM). Nesse sentido, Aagard et al. (2001) realizaram os exercício de agachamento, *leg press* e cadeira extensora com repetições entre 3-10 RM durante 14 semanas e verificaram aumento 35,5% no AP do vasto lateral. É possível que as diferenças entre os aumentos no AP desses estudos com o nosso (~31% e 35% vs. ~10%) esteja relacionada ao número de semanas que os sujeitos treinaram e ao tipo e quantidade de exercícios realizados. Na pesquisa de Kawakami et al. (1995), os voluntários treinaram 3 vezes por semana durante 16 semanas, totalizando 48 treinos, o dobro do número de treinos realizado em nosso estudo. Por sua vez, no estudo de Aagard et al. (2001), além do

maior número de sessões que em nosso estudo (38 vs. 24, respectivamente), foram empregados 3 exercícios diferentes para a musculatura do quadríceps (agachamento, leg press e extensão de joelho), provavelmente resultando em um VT muito superior ao de nosso estudo. Dessa forma, nossos dados permitem afirmar que o TF realizado até a interrupção voluntária é capaz de promover aumentos no AP semelhantes àqueles realizados até o ponto de falha muscular, independente da intensidade.

Em contrapartida, não foram encontradas alterações significativas no CF após 12 semanas de treinamento, divergindo de estudos que demonstraram aumento significativo no CF após o TF (REEVES et al., 2004; ALEGRE et al., 2006; BLAZEVIK et al., 2007; FRANCHI et al., 2014). É possível que a falta de diferenças no CF em nosso estudo esteja relacionada ao método utilizado para mensuração do CF. Como postulado por Wakahara et al (2004), apesar da forma naturalmente curvilínea do fascículo, o CF é comumente mensurado utilizando uma linha reta. Tal forma de mensuração pode subestimar o real comprimento do fascículo. Além disso, Kawakami (1993) verificou que, em indivíduos treinados, o fascículo apresenta uma curvatura ainda maior. Portanto, seria necessária uma metodologia capaz de considerar a curvatura do fascículo para obter medidas fidedignas de seu comprimento. Ainda assim, nossos resultados nos permite afirmar que todos os protocolos de TF resultaram em hipertrofia fisiológica do músculo VL. Diferentemente do aumento na AST anatômica (*i.e.*, hipertrofia muscular anatômica), o aumento da AST fisiológica (*i.e.*, hipertrofia muscular fisiológica) é definida como a magnitude da área das fibras musculares perpendicular ao eixo longitudinal das fibras musculares, multiplicado pelo cosseno do ângulo de penação (WICKIEWICZ et al., 1983), o que significa que um aumento no ângulo de penação resultará em maior área de secção transversa fisiológica (FUKUNAGA et al., 1997; BLAZEVIK et al., 2005). Portanto, a hipertrofia fisiológica representa o número de pontes cruzadas que podem ser ativadas em paralelo durante a contração (AAGAARD et al., 2001). Assim, os aumentos na AST (~7,5%) e AP (~10,7%) observados em nosso estudo, deixam claros que todos os protocolos empregados foram igualmente eficazes na indução de uma hipertrofia fisiológica.

Finalmente, é necessário salientar que alguns estudos sugerem que a realização do TF realizado até a falha por um período prolongado pode resultar em *overtraining*, maior risco de lesão musculoesquelética por esforço repetitivo e respostas hemodinâmicas aumentadas, com picos pressóricos próximos ao ponto de falha (MACDOUGALL et al., 1985; STONE et al., 1996). Nesse sentido, nossos resultados fortalecem as recomendações de que o exercício seja

realizado até a interrupção voluntária (PITCHER et al., 1997; POLLOCK et al., 2000; MAZZEO et al., 2001; HASKELL et al., 2007), tendo em vista as semelhantes adaptações encontradas entre os protocolos realizados até a falha muscular e aqueles interrompidos voluntariamente. Estes achados podem ser especialmente importantes para populações incapazes de realizar o TFAI ou TFBI até a falha muscular (e.g., idosos e cardiopatas), onde a realização do TF independente da intensidade, mas até um nível substancial de fadiga (e.g., interrupção voluntária) resultaria em ganhos máximos de força e hipertrofia muscular.

Em conclusão, nossos resultados indicam que o treinamento de força de alta (80% 1-RM) ou baixa (30% 1-RM) intensidade realizado até a interrupção voluntária é igualmente efetivo ao realizado até a falha muscular para aumentar a força, arquitetura e massa muscular.

REFERÊNCIAS

AAGAARD, P.; ANDERSEN, J. L.; DYHRE-POULSEN, P.; LEFFERS, A. M.; WAGNER, A.; MAGNUSSON, S. P.; HALKJAER-KRISTENSEN, J.; SIMONSEN, E. B. **A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture.** *J Physiol*, v. 534, n. Pt. 2, p. 613-23., 2001.

ACSM. **American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults.** *Med Sci Sports Exerc*, v. 41, n. 3, p. 687-708, Mar 2009.

AKIMA, H.; SAITO, A. **Activation of quadriceps femoris including vastus intermedius during fatiguing dynamic knee extensions.** *Eur J Appl Physiol*, v. 113, n. 11, p. 2829-40, Nov 2013.

ALEGRE, L. M.; JIMENEZ, F.; GONZALO-ORDEN, J. M.; MARTIN-ACERO, R.; AGUADO, X. **Effects of dynamic resistance training on fascicle length and isometric strength.** *J Sports Sci*, v. 24, n. 5, p. 501-8, May 2006.

ANDERSON, T.; KEARNEY, J. T. **Effects of three resistance training programs on muscular strength and absolute and relative endurance.** *Res Q Exerc Sport*, v. 53, n. 1, p. 1-7, Mar 1982.

BLAZEVOICH, A. J.; CANNANAN, D.; COLEMAN, D. R.; HORNE, S. **Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles.** *J Appl Physiol* (1985), v. 103, n. 5, p. 1565-75, Nov 2007.

BLAZEVOICH, A. J.; SHARP, N. C. **Understanding muscle architectural adaptation: macro- and micro-level research.** *Cells Tissues Organs*, v. 181, n. 1, p. 1-10, 2005.

BROWN, L. E.; WEIR, J. P. **ASEP procedures recommendation I: accurate assessment of muscular strength and power.** *J Exerc Physiol Online*, v. 4, n. 3, p. 1-21, 2001.

BURD, N. A.; WEST, D. W.; STAPLES, A. W.; ATHERTON, P. J.; BAKER, J. M.; MOORE, D. R.; HOLWERDA, A. M.; PARISE, G.; RENNIE, M. J.; BAKER, S. K.; PHILLIPS, S. M. **Low-load high volume resistance exercise stimulates muscle protein synthesis more than high-load low volume resistance exercise in young men.** PLoS One, v. 5, n. 8, p. e12033, 2010.

CAMPOS, G. E.; LUECKE, T. J.; WENDELN, H. K.; TOMA, K.; HAGERMAN, F. C.; MURRAY, T. F.; RAGG, K. E.; RATAMESS, N. A.; KRAEMER, W. J.; STARON, R. S. **Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones.** Eur J Appl Physiol, v. 88, n. 1-2, p. 50-60, Nov 2002.

DAVIES, T.; ORR, R.; HALAKI, M.; HACKETT, D. **Effect of Training Leading to Repetition Failure on Muscular Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis.** Sports Med, v. 46, n. 4, p. 487-502, Apr 2016.

DRINKWATER, E. J.; LAWTON, T. W.; LINDSELL, R. P.; PYNE, D. B.; HUNT, P. H.; MCKENNA, M. J. **Training leading to repetition failure enhances bench press strength gains in elite junior athletes.** J Strength Cond Res, v. 19, n. 2, p. 382-8, May 2005.

FALLENTEIN, N.; JORGENSEN, K.; SIMONSEN, E. B. **Motor unit recruitment during prolonged isometric contractions.** Eur J Appl Physiol Occup Physiol, v. 67, n. 4, p. 335-41, 1993.

FOLLAND, J. P.; IRISH, C. S.; ROBERTS, J. C.; TARR, J. E.; JONES, D. A. **Fatigue is not a necessary stimulus for strength gains during resistance training.** Br J Sports Med, v. 36, n. 5, p. 370-3; discussion 374, Oct 2002.

FRANCHI, M. V.; ATHERTON, P. J.; REEVES, N. D.; FLUCK, M.; WILLIAMS, J.; MITCHELL, W. K.; SELBY, A.; BELTRAN VALLS, R. M.; NARICI, M. V. **Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle.** Acta Physiol (Oxf), v. 210, n. 3, p. 642-54, Mar 2014.

FRY, A. C. **The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations.** Sports Med, v. 34, n. 10, p. 663-79, 2004.

FUGLEVAND, A. J.; ZACKOWSKI, K. M.; HUEY, K. A.; ENOKA, R. M. **Impairment of neuromuscular propagation during human fatiguing contractions at submaximal forces.** J Physiol, v. 460, p. 549-72, Jan 1993.

FUKUNAGA, T.; KAWAKAMI, Y.; KUNO, S.; FUNATO, K.; FUKASHIRO, S. **Muscle architecture and function in humans.** J Biomech, v. 30, n. 5, p. 457-63, May 1997.

HASKELL, W. L.; LEE, I. M.; PATE, R. R.; POWELL, K. E.; BLAIR, S. N.; FRANKLIN, B. A.; MACERA, C. A.; HEATH, G. W.; THOMPSON, P. D.; BAUMAN, A. **Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association.** Med Sci Sports Exerc, v. 39, n. 8, p. 1423-34, Aug 2007.

HENNEMAN, E. **Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge.** Science, v. 126, n. 1345–1347, 1957.

HOLM, L.; REITELSEDER, S.; PEDERSEN, T. G.; DOESSING, S.; PETERSEN, S. G.; FLYVBJERG, A.; ANDERSEN, J. L.; AAGAARD, P.; KJAER, M. **Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity.** J Appl Physiol, v. 105, n. 5, p. 1454-61, Nov 2008.

IZQUIERDO, M.; IBANEZ, J.; GONZALEZ-BADILLO, J. J.; HAKKINEN, K.; RATAMESS, N. A.; KRAEMER, W. J.; FRENCH, D. N.; ESLAVA, J.; ALTADILL, A.; ASIAIN, X.; GOROSTIAGA, E. M. **Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains.** J Appl Physiol (1985), v. 100, n. 5, p. 1647-56, May 2006.

JACOBSON, B. **Reach failure to gain success.** Natl Strength Coaches Assoc J, v. 3, n. 2, p. 24-25, 1981.

KAWAKAMI, Y.; ABE, T.; FUKUNAGA, T. **Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles.** J Appl Physiol (1985), v. 74, n. 6, p. 2740-4, Jun 1993.

KAWAKAMI, Y.; ABE, T.; KUNO, S. Y.; FUKUNAGA, T. **Training-induced changes in muscle architecture and specific tension.** European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology, v. 72, n. 1-2, p. 37-43, 1995.

KUMAR, V.; SELBY, A.; RANKIN, D.; PATEL, R.; ATHERTON, P.; HILDEBRANDT, W.; WILLIAMS, J.; SMITH, K.; SEYNNES, O.; HISCOCK, N.; RENNIE, M. J. **Age-related differences in the dose-response relationship of muscle protein synthesis to resistance exercise in young and old men.** J Physiol, v. 587, n. Pt 1, p. 211-7, Jan 15 2009.

LEVINGER, I.; GOODMAN, C.; HARE, D. L.; JERUMS, G.; TOIA, D.; SELIG, S. **The reliability of the 1RM strength test for untrained middle-aged individuals.** J Sci Med Sport, v. 12, n. 2, p. 310-6, Mar 2009.

LIXANDRÃO, M. E.; UGRINOWITSCH, C.; BOTTARO, M.; CHACON-MIKAHIL, M. P.; CAVAGLIERI, C. R.; MIN, L. L.; OLIVEIRA DE SOUZA, E.; LAURENTINO, G. C.; LIBARDI, C. A. **Vastus lateralis muscle cross sectional area ultrasonography validity for image-fitting in humans.** J Strength Cond Res, May 19 2014.

MACDOUGALL, J. D.; TUXEN, D.; SALE, D. G.; MOROZ, J. R.; SUTTON, J. R. **Arterial blood pressure response to heavy resistance exercise.** J Appl Physiol, v. 58, n. 3, p. 785-90, Mar 1985.

MAZZEO, R. S.; TANAKA, H. **Exercise prescription for the elderly: current recommendations.** Sports Med, v. 31, n. 11, p. 809-18, 2001.

MITCHELL, C. J.; CHURCHWARD-VENNE, T. A.; WEST, D. W.; BURD, N. A.; BREEN, L.; BAKER, S. K.; PHILLIPS, S. M. **Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men.** J Appl Physiol (1985), v. 113, n. 1, p. 71-7, Jul 2012.

OGASAWARA, R.; LOENNEKE, J.; THIEBAUD, R.; ABE, T. **Low-Load Bench Press Training to Fatigue Results in Muscle Hypertrophy Similar to High-Load Bench Press Training.** *International Journal of Clinical Medicine*, v. 4, p. 114-121, Feb 2013.

PITCHER, J. B.; MILES, T. S. **Influence of muscle blood flow on fatigue during intermittent human hand-grip exercise and recovery.** *Clin Exp Pharmacol Physiol*, v. 24, n. 7, p. 471-6, Jul 1997.

POLLOCK, M. L.; FRANKLIN, B. A.; BALADY, G. J.; CHAITMAN, B. L.; FLEG, J. L.; FLETCHER, B.; LIMACHER, M.; PINA, I. L.; STEIN, R. A.; WILLIAMS, M.; BAZZARRE, T. **AHA Science Advisory. Resistance exercise in individuals with and without cardiovascular disease: benefits, rationale, safety, and prescription: An advisory from the Committee on Exercise, Rehabilitation, and Prevention, Council on Clinical Cardiology, American Heart Association.** *Circulation*, v. 101, n. 7, p. 828-33, Feb 22 2000.

REEVES, N. D.; NARICI, M. V.; MAGANARIS, C. N. **Effect of resistance training on skeletal muscle-specific force in elderly humans.** *J Appl Physiol*, v. 96, n. 3, p. 885-92, Mar 2004.

ROONEY, K. J.; HERBERT, R. D.; BELNAVE, R. J. **Fatigue contributes to the strength training stimulus.** *Med Sci Sports Exerc*, v. 26, p. 1160-1164, 1994.

SAMPSON, J. A.; GROELLER, H. **Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength?** *Scand J Med Sci Sports*, Mar 24 2015.

SCHOENFELD, B. J.; CONTRERAS, B.; WILLARDSON, J. M.; FONTANA, F.; TIRYAKI-SONMEZ, G. **Muscle activation during low- versus high-load resistance training in well-trained men.** *Eur J Appl Physiol*, v. 114, n. 12, p. 2491-7, Dec 2014.

SCHOENFELD, B. J.; PETERSON, M. D.; OGBORN, D.; CONTRERAS, B.; SONMEZ, G. T. **Effects of Low- vs. High-Load Resistance Training on Muscle Strength and Hypertrophy in Well-Trained Men.** *J Strength Cond Res*, v. 29, n. 10, p. 2954-63, Oct 2015.

SCHOTT, J.; MCCULLY, K.; RUTHERFORD, O. M. **The role of metabolites in strength training. II. Short versus long isometric contractions.** *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, v. 71, n. 4, p. 337-41, 1995.

SCHUENKE, M. D.; HERMAN, J.; STARON, R. S. **Preponderance of evidence proves "big" weights optimize hypertrophic and strength adaptations.** *Eur J Appl Physiol*, v. 113, n. 1, p. 269-71, Jan 2013.

STONE, M. H.; CHANDLER, T. J.; CONLEY, M. S.; KRAMER, J. B.; STONE, M. E. **Training to Muscular Failure: Is it Necessary?** *Strength Cond J*, v. 18, n. 3, p. 44-48, 1996.

STRAND, S. L.; HJELM, J.; SHOEPE, T. C.; FAJARDO, M. A. **Norms for an isometric muscle endurance test.** *J Hum Kinet*, v. 40, p. 93-102, Mar 27 2014.

SUNDSTRUP, E.; JAKOBSEN, M. D.; ANDERSEN, C. H.; ZEBIS, M. K.; MORTENSEN, O. S.; ANDERSEN, L. L. **Muscle activation strategies during strength training with heavy loading vs. repetitions to failure.** J Strength Cond Res, v. 26, n. 7, p. 1897-903, Jul 2012.

WERNBOM, M.; AUGUSTSSON, J.; THOME, R. **The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans.** Sports Med, v. 37, n. 3, p. 225-64, 2007.

WICKIEWICZ, T. L.; ROY, R. R.; POWELL, P. L.; EDGERTON, V. R. **Muscle architecture of the human lower limb.** Clin Orthop, n. 179, p. 275-83., 1983.

WILLARDSON, J. M. **The application of training to failure in periodized multiple-set resistance exercise programs.** J Strength Cond Res, v. 21, n. 2, p. 628-31, May 2007.