

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO MOVIMENTO HUMANO**

**ADAPTAÇÕES NEUROMUSCULARES DE EXTENSORES DE JOELHO AO
TREINAMENTO EXCÊNTRICO EM DINAMÔMETRO ISOCINÉTICO**

BRUNO MANFREDINI BARONI

PORTE ALEGRE - RS

2012

Bruno Manfredini Baroni

**ADAPTAÇÕES NEUROMUSCULARES DE EXTENSORES DE JOELHO AO
TREINAMENTO EXCÊNTRICO EM DINAMÔMETRO ISOCINÉTICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano da Escola de Educação Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Vaz

Porto Alegre - RS

2012

CIP - Catalogação na Publicação

Baroni, Bruno Manfredini

Adaptações neuromusculares de extensores de joelho
ao treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético
/ Bruno Manfredini Baroni. -- 2012.
112 f.

Orientador: Marco Aurélio Vaz.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Educação Física, Programa de
Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano, Porto
Alegre, BR-RS, 2012.

1. Treinamento de força. 2. Exercício excêntrico.
3. Quadríceps femoral. I. Vaz, Marco Aurélio, orient.
II. Título.

Bruno Manfredini Baroni

**ADAPTAÇÕES NEUROMUSCULARES DE EXTENSORES DE JOELHO AO
TREINAMENTO EXCÊNTRICO EM DINAMÔMETRO ISOCINÉTICO**

Comissão de Avaliação:

Profa. Dra. Tania de Fatima Salvini – UFSCAR

Profa. Dra. Claudia Silveira Lima – UFRGS

Prof. Dr. Ronei Silveira Pinto – UFRGS

AGRADECIMENTOS

- Aos professores, servidores e alunos da Escola de Educação Física da UFRGS, pela aprendizagem, apoio e convívio ao longo dessa trajetória.
- Aos membros da comissão de avaliação, pelas valiosas contribuições nas etapas de qualificação do projeto e defesa pública da tese.
- Aos colegas do Laboratório de Pesquisa do Exercício, em especial aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Biomecânica e Cinesiologia, pelas parcerias estabelecidas dentro e fora do ambiente do laboratório.
- Ao Prof. Dilson Rassier e sua equipe, pela inestimável experiência junto à *McGill University*, em Montreal, Canadá.
- Aos voluntários que participaram dos estudos clínicos, pelo engajamento e empenho nas sessões de treinamento.
- Aos amigos e familiares de Caxias do Sul, Porto Alegre e Bom Jesus, entre outras localidades, pelo apoio e torcida em favor do meu sucesso.
- Aos colaboradores e, acima de tudo, amigos de verdade, Jeam Geremia, Rodrigo Franke e Rodrigo Rodrigues, pelo comprometimento, competência e “garra” na execução desse trabalho.
- Ao meu orientador, Prof. Marco Aurélio Vaz, pela oportunidade de aprender com um grande professor, colaborar com um grande cientista, conviver com um grande líder e me tornar amigo de um grande homem.
- Aos meus pais, Zulmir e Henriette, meu irmão, Marco, e minha namorada, Fran. A energia que me transmitem em cada abraço é convertida em força para buscar todos os meus objetivos. Mesmo sem ler uma linha dessa tese, eles foram as pessoas mais importantes para a conquista desse grau acadêmico e a concretização desse sonho.
- Ao “pessoal lá de cima”, que deve gostar muito de mim para colocar pessoas e momentos tão especiais na minha vida.

**Dedicada aos meus pais;
o estudo fez a diferença,
vocês estavam certos.**

RESUMO

O exercício excêntrico é utilizado como uma estratégia de treinamento de força em atletas e sujeitos saudáveis de diferentes faixas etárias. Esse tipo de exercício também é largamente difundido na área da reabilitação musculoesquelética, sendo o quadríceps femoral o músculo mais frequentemente investigado devido à sua relevância clínica. O tema dessa tese de Doutorado é a adaptação do sistema neuromuscular ao treinamento excêntrico de extensores de joelho. No Capítulo I, um estudo de revisão procurou descrever os diferentes métodos empregados pelos cientistas para o treinamento excêntrico de extensores de joelho, assim como avaliar as adaptações neurais, morfológicas e na produção de força muscular de sujeitos saudáveis. Após busca sistematizada nas bases de dados, 26 estudos foram incorporados ao nosso estudo de revisão. Os programas de treinamento excêntrico realizados em dinamômetro isocinético e em equipamentos isotônicos (*leg-press* e cadeira extensora de joelho) foram descritos e discutidos. Os resultados desses estudos indicam um efeito positivo do treinamento excêntrico sobre a força e a ativação muscular, especialmente em testes excêntricos, assim como uma significativa resposta hipertrófica. Porém, resultados conflitantes e lacunas identificadas na literatura incentivaram a realização de dois estudos originais para verificar: (1) o comportamento temporal das adaptações neurais e morfológicas ao treinamento excêntrico de extensores de joelho e suas contribuições para os ganhos de força (Capítulo II); e (2) as adaptações específicas de músculos sinergistas da extensão de joelho: reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) (Capítulo III). Vinte homens saudáveis realizaram um período controle de quatro semanas sem treinamento, seguido por um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético. Avaliações de torque, eletromiografia e ultrassonografia de extensores de joelho foram realizadas a cada quatro semanas. Um maior ganho de força foi verificado nos testes excêntricos, seguido pelos testes isométricos e concêntricos. A ativação muscular nos testes excêntricos e isométricos aumentou após quatro e oito semanas de treinamento, respectivamente, ao passo que os testes concêntricos não apresentaram alteração da atividade eletromiográfica. Os valores de espessura muscular, área de secção transversa anatômica e comprimento de fascículo aumentaram após quatro e oito semanas de treinamento, mas não modificaram entre a oitava e a 12ª semana de intervenção. As adaptações na geometria fascicular dos músculos RF e VL foram semelhantes ao longo do programa de treinamento. Nossos achados sugerem que: (1) existe um forte efeito da especificidade do exercício excêntrico sobre os aumentos de força e ativação muscular; (2) os ganhos de força excêntrica e isométrica até a oitava semana de treinamento estão relacionados a adaptações neurais e morfológicas mensuráveis, enquanto outros mecanismos podem estar relacionados aos ganhos nas quatro últimas semanas de intervenção; (3) o ganho de força concêntrica não é afetado por adaptações neurais; (4) o treinamento excêntrico aumenta o comprimento, mas não o ângulo de penetração fascicular; (5) as adaptações na arquitetura muscular podem ocorrer nas primeiras semanas de treinamento; e (6) apesar das diferenças estruturais e funcionais, RF e VL apresentam índices semelhantes de adaptação.

Palavras-Chave: Treinamento de força, Exercício excêntrico, Quadríceps femoral.

ABSTRACT

Eccentric exercise is used as a strategy for strength training in athletes and healthy subjects with different ages. This type of exercise is also frequently used in musculoskeletal rehabilitation, and the quadriceps femoris is the most frequently investigated muscle due its clinical relevance. The theme of this PhD thesis is the adaptation of the neuromuscular system to knee extensor eccentric training. In Chapter I, a review study aimed at describing the different methods employed by scientists for knee extensor eccentric training, as well as for evaluating the neural, morphological and muscular strength adaptations in healthy subjects. After a systematized search in related data bases, 26 studies were incorporated to our review study. Eccentric training programs performed in isokinetic dynamometers and isotonic devices (leg-press and knee extension chair) were described and discussed. Results from these studies indicate a positive effect of eccentric training on muscle strength and activation, especially in eccentric tests, as well as a significant hypertrophic response. However, conflicting results and gaps observed in the literature encouraged us to perform two original studies to verify: (1) the time course of neural and morphological adaptations to knee extensor eccentric training and their contribution to strength gains (Chapter II); and (2) the specific adaptive responses from synergistic knee extensor muscles: rectus femoris (RF) and vastus lateralis (VL) (Chapter III). Twenty healthy men performed a four-week control period without training, followed by a 12-week eccentric training on an isokinetic dynamometer. Knee extensor evaluations of torque, electromyography and ultrasonography were made every four weeks. A higher strength increase was observed in eccentric tests, followed by isometric and concentric tests. Muscle activation in eccentric and isometric tests increased after four and eight weeks of training, respectively, while the concentric tests presented no change in the electromyographic activity. Muscle thickness, anatomical cross-sectional area and fascicle length values increased after four and eight weeks of training, but did not change between the eighth and twelfth intervention week. Adaptations in RF and VL fascicular geometry were similar throughout the training program. Our findings suggest that: (1) there is a strong specificity effect of eccentric exercise on increases in muscle strength and activation; (2) eccentric and isometric strength gains up to the eighth week of training are related to measurable neural and morphological adaptations, while other mechanisms may be related to strength increase in the last four weeks of intervention; (3) concentric strength gain is not affected by neural adaptations; (4) eccentric training increases fascicle length, but not pennation angle; (5) muscle architecture adaptations may occur in the first weeks of training; and (6) despite the structural and functional differences, RF and VL present similar adaptation levels.

Key-words: Strength training, Eccentric exercise, Quadriceps femoris.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Desenho experimental do estudo: cinco avaliações neuromusculares de extensores de joelho (indicado pelas setas); um período controle de quatro semanas; e um período de 12 semanas de treinamento excêntrico..... 55
- Figura 2.** Sinal EMG dos músculos vasto lateral (VL), reto femoral (RF) e vasto medial (VM), sincronizado com dados de torque, posição articular e velocidade angular de movimento durante testes isométricos, concêntricos e excêntricos de um sujeito representativo da amostra.... 58
- Figura 3.** Imagens de ultrassonografia de um sujeito representativo da amostra utilizadas para análise de: [A] espessura muscular do reto femoral (RF); [B] espessura muscular do vasto lateral (VL); [C] espessura muscular do vasto medial (VM); e [D] área de secção transversa anatômica do RF. 61
- Figura 4.** Pico de torque de extensores de joelho em testes isométricos (PT_{iso}), concêntricos (PT_{con}) e excêntricos (PT_{exc}) ao longo do estudo..... 65
- Figura 5.** Ativação muscular de extensores de joelho em testes isométricos (ΣEMG_{iso}), concêntricos (ΣEMG_{con}) e excêntricos (ΣEMG_{exc}) ao longo do estudo..... 66
- Figura 6.** Somatório de espessuras do músculo quadríceps femoral (ΣEM) e área de secção transversa anatômica do músculo reto femoral ($ASTA_{rf}$) ao longo do estudo..... 67
- Figura 7.** Representação da análise dos parâmetros de arquitetura muscular em imagem ultrassonográfica do vasto lateral (VL): espessura muscular (EM); ângulo de penetração (AP); e comprimento de fascículo (CF)..... 80

- Figura 8.** Alteração percentual ($\Delta\%$) na espessura muscular (EM), ângulo de penação (AP) e comprimento de fascículo (CF) dos músculos reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) ao longo do estudo..... 85
- Figura 9.** Imagens ultrassonográficas de um sujeito representativo da amostra exibindo a estrutura dos músculos reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) antes (Pré-treino) e após (Pós-12) o programa de treinamento excêntrico de extensores de joelho..... 86

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Programas de treinamento excêntrico utilizados pelos estudos envolvendo os músculos extensores de joelho..... 23
- Tabela 2.** Adaptações na força muscular provenientes do treinamento excêntrico de extensores de joelho..... 25
- Tabela 3.** Adaptações neurais e morfológicas provenientes do treinamento excêntrico de extensores de joelho..... 27
- Tabela 4.** Programa de treinamento excêntrico de extensores de joelho..... 63
- Tabela 5.** Espessura muscular (EM), ângulo de penetração (AP) e comprimento de fascículo (CF) dos músculos reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) nos diferentes momentos de avaliação do estudo..... 84

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
APRESENTAÇÃO	12
INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO I. Adaptações Neuromusculares de Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico: Um Estudo de Revisão	15
RESUMO	15
INTRODUÇÃO	16
MÉTODOS	20
RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
Programas de treinamento excêntrico	29
Adaptações na força muscular	37
Adaptações neurais	39
Adaptações morfológicas	42
Treinamento excêntrico Vs. Treinamento concêntrico	46
Treinamento excêntrico Vs. Treino de força convencional	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
CAPÍTULO II. Cronologia das Adaptações Neuromusculares de Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico	52
RESUMO	52
INTRODUÇÃO	53
MÉTODOS	55
Desenho experimental	55
Sujeitos	56

Avaliação da força muscular	56
Avaliação da ativação muscular	58
Avaliação da massa muscular	59
Programa de treinamento excêntrico	61
Análise estatística	63
RESULTADOS	64
DISCUSSÃO	68
CAPÍTULO III. Adaptações na Arquitetura Muscular de Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico: Reto Femoral Vs. Vasto Lateral	73
RESUMO	73
INTRODUÇÃO	74
MÉTODOS	77
Desenho experimental	77
Sujeitos	77
Avaliação da arquitetura muscular	78
Programa de treinamento excêntrico	80
Análise estatística	82
RESULTADOS	83
DISCUSSÃO	86
CONCLUSÕES DA TESE	92
REFERÊNCIAS	94

APRESENTAÇÃO

O interesse em comum dos profissionais de Educação Física e Fisioterapia acerca das respostas do sistema neuromuscular ao treinamento excêntrico de extensores de joelho motivou a escolha desse tema para a presente tese de Doutorado. Com a intenção de aprofundar os conhecimentos acerca dessa temática, um estudo de revisão e dois estudos originais foram conduzidos durante o período de Doutorado do Prof. Bruno Manfredini Baroni junto ao Grupo de Pesquisa em Biomecânica e Cinesiologia da UFRGS.

O Capítulo I compreende um estudo de revisão da literatura que teve por objetivo descrever os diferentes métodos implementados pelos cientistas da área para o treinamento excêntrico de extensores de joelho, assim como verificar as adaptações neurais, adaptações morfológicas e adaptações na força do quadríceps femoral de indivíduos saudáveis submetidos a programas de treinamento excêntrico.

No Capítulo II, é apresentado um estudo original desenvolvido com o objetivo de verificar a cronologia das adaptações na ativação e massa muscular de extensores de joelho, bem como sua contribuição para os ganhos de força em ações isométricas, concêntricas e excêntricas ao longo de um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético (*Baroni et al. Time course of neuromuscular adaptations to knee extensor eccentric training. International Journal of Sports Medicine, 2013 - in press*).

No Capítulo III, um estudo original avaliou e comparou o efeito de um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico de extensores de joelho em condições isocinéticas sobre a geometria fascicular de dois músculos sinergistas da extensão de joelho que apresentam propriedades estruturais e funcionais específicas: o reto femoral e o vasto lateral (*Baroni et al. Muscle architecture adaptations to knee extensor eccentric training: rectus femoris vs. vastus lateralis. Muscle & Nerve, 2013 - in press*).

Ao fim do presente documento, uma breve sessão é dedicada à apresentação das considerações finais e das principais contribuições que essa tese de Doutorado fornece para a literatura científica da área.

INTRODUÇÃO

O treinamento de força é caracterizado pela execução de exercícios voluntários contra uma carga ou resistência externa, sendo considerado o método mais indicado para o incremento de força muscular ¹. As adaptações do sistema neuromuscular (ou adaptações neuromusculares), caracterizadas por modificações na capacidade de ativação e na morfologia (ou estrutura) do músculo, são as responsáveis pelo ganho de força proveniente de programas de treinamento de força. Como demonstrado desde o final da década de 1970 ², os ganhos de força nas primeiras semanas de treinamento são atribuídos principalmente a adaptações neurais ³⁻⁵, enquanto as adaptações morfológicas afetam a capacidade de produção de força do indivíduo de forma mais significativa após 6-8 semanas de treinamento ⁶⁻⁸. Apesar de o treinamento de força mais comumente utilizado envolver exercícios com ações concêntricas e excêntricas (treino de força convencional), programas de treinamento podem ser executados com ênfase ou exclusividade em ações isométricas, concêntricas e excêntricas ⁷.

Enquanto as contrações isométricas são caracterizadas pela manutenção do comprimento das fibras musculares durante a ativação do músculo, as contrações concêntricas e excêntricas têm sido classicamente associadas ao encurtamento e estiramento das fibras musculares, respectivamente. Estudos desenvolvidos *in vitro* ⁹⁻¹² e *in vivo* ¹³⁻¹⁸ têm demonstrado que as ações musculares excêntricas produzem mais tensão/força do que as ações isométricas ou concêntricas. Assim, uma vez estabelecido que as alterações na capacidade de produção de força estão diretamente relacionadas à demanda imposta sobre o sistema neuromuscular ^{1,19}, a possibilidade de implementar maiores cargas sobre a musculatura durante exercícios que utilizam somente contrações excêntricas ou exercícios com ênfase na fase excêntrica se torna atrativa com a intenção de potencializar as adaptações neuromusculares ao treinamento.

Um número expressivo de estudos envolvendo treinamento excêntrico em sujeitos saudáveis ²⁰⁻⁷⁰ e atletas de diferentes esportes e níveis competitivos ⁷¹⁻⁷⁸ foi publicado nas últimas décadas. O treinamento excêntrico tem sido também proposto

para a população idosa ⁷⁹⁻⁸⁹ com a intenção de conter ou reverter os efeitos deletérios do envelhecimento sobre o sistema neuromuscular ^{90,91}. Além disso, a plasticidade dos demais tecidos biológicos que são mecanicamente estimulados durante a contração muscular (por exemplo, tecidos esqueléticos e conectivos) ⁹² faz do exercício excêntrico uma alternativa interessante no campo da reabilitação de lesões do sistema musculoesquelético, o que vem sendo evidenciado pela literatura recente ⁹³⁻⁹⁵.

A utilização do exercício excêntrico em um programa de treinamento sistematizado, seja para fins de condicionamento físico ou com a proposta de prevenção/reabilitação, tem chamado atenção de um número crescente de profissionais da saúde e pesquisadores, os quais têm se concentrado em determinar os efeitos agudos e crônicos do exercício excêntrico sobre os diferentes sistemas do organismo humano. Provavelmente devido à sua relevância para a locomoção, o grupo muscular extensor de joelho se apresenta como o mais frequentemente investigado pelos estudos envolvendo treinamento de força em humanos. No entanto, embora o acervo científico na área apresente respostas para uma série de questionamentos em relação às adaptações neuromusculares promovidas pelo treinamento excêntrico de extensores de joelho, existem aspectos que não foram abordados ou que apresentam resultados controversos entre os estudos publicados até o presente momento.

Assim, os objetivos da presente tese de Doutorado foram: (1) compilar informações acerca das adaptações neuromusculares do quadríceps femoral de indivíduos saudáveis submetidos a programas de treinamento excêntrico em estudos prévios (Capítulo I); (2) determinar o comportamento temporal das adaptações na ativação e massa muscular de extensores de joelho, bem como sua contribuição para os ganhos de força em ações isométricas, concêntricas e excêntricas ao longo de um programa de treinamento (Capítulo II); e (3) avaliar e comparar o efeito de um programa de treinamento excêntrico de extensores de joelho sobre a geometria fascicular de dois músculos sinergistas da extensão de joelho com propriedades estruturais e funcionais específicas: o reto femoral e o vasto lateral (Capítulo III).

CAPÍTULO I

Adaptações Neuromusculares de Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico: Um Estudo de Revisão

RESUMO

Esta revisão de literatura objetivou descrever os diferentes métodos empregados pelos cientistas envolvendo o treinamento excêntrico de extensores de joelho nas últimas duas décadas, assim como avaliar as adaptações neurais, morfológicas e na força muscular em decorrência desse tipo de exercício em sujeitos saudáveis. Após busca sistematizada em bases de dados, 70 estudos foram analisados e 26 foram incorporados à presente revisão. Programas com 1-4 sessões de treino semanais por períodos de quatro a 20 semanas têm sido utilizados. A maioria dos programas de treinamento excêntrico realizados em dinamômetro isocinético incluiu 1-6 séries de 6-12 repetições em intensidade máxima e baixas velocidades angulares ($30-90^{\circ}.s^{-1}$). Nos programas de treinamento excêntrico em condições isotônicas (exercícios de *leg-press* e cadeira extensora), 3-7 séries de 5-10 repetições foram utilizadas com diferentes métodos de determinação da carga de exercício e distintas velocidades de execução do movimento. Maiores incrementos de força foram observados em testes excêntricos (9-116%) comparado aos testes isométricos (7-45%) e concêntricos (5-25%). Um similar efeito de especificidade do treinamento foi observado nas adaptações neurais, onde incrementos na ativação muscular ocorreram em testes excêntricos, mas não em testes concêntricos. A resposta hipertrófica ao treinamento é evidente e tem sido representada pelo aumento da área de secção transversa anatômica do quadríceps femoral (4-13%) e da espessura do vasto lateral (5-11%). Porém, mudanças no comprimento fascicular, ângulo de penação e distribuição dos tipos de fibras não são consensuais. A cronologia das adaptações neuromusculares e a resposta específica de cada porção do quadríceps femoral não parecem ter sido determinadas.

INTRODUÇÃO

Enquanto as contrações isométricas são caracterizadas pela manutenção do comprimento das fibras musculares durante a ativação do músculo, as contrações concêntricas e excêntricas têm sido classicamente associadas ao encurtamento e estiramento das fibras musculares, respectivamente. Entretanto, a ação excêntrica não pode ser considerada simplesmente uma contração muscular executada no sentido contrário à ação concêntrica. O fato de a fibra muscular estar sendo alongada durante sua ativação conduz a uma série de alterações em propriedades biomecânicas e fisiológicas da célula, as quais repercutem de forma significativa nas respostas agudas e crônicas ao exercício excêntrico.

Estudos *in vitro*⁹⁻¹² e *in vivo*¹³⁻¹⁸ têm demonstrado que as ações musculares excêntricas produzem mais tensão/força do que as ações isométricas ou concêntricas. O mecanismo responsável por esse incremento na produção de força não se encontra totalmente compreendido, mas parece estar relacionado com a soma da força gerada simultaneamente pelos elementos contráteis e não-contráteis (ou passivos) do músculo⁹⁶. Em seres humanos, apesar da já reportada seletividade de recrutamento em favor das unidades motoras rápidas (responsáveis pela inervação das fibras do tipo II) durante as ações excêntricas^{97,98}, estudos com a técnica de eletromiografia (EMG) de superfície têm demonstrado uma menor ativação muscular para um mesmo nível de força produzido durante contrações excêntricas em relação a contrações concêntricas⁹⁸⁻¹⁰¹. Em outras palavras, para produzir um mesmo nível de força, um menor número de unidades motoras é recrutado durante contrações excêntricas do que em contrações concêntricas, o que está associado aos elevados índices de inibição neural observados nas ações excêntricas^{96,102}. Esse reduzido número de fibras musculares desenvolvendo elevados níveis de tensão parece ser um mecanismo básico para o fenômeno conhecido como dano muscular induzido pelo exercício, que é considerado a resposta aguda mais característica do exercício excêntrico¹⁰³⁻¹⁰⁶.

Como a própria expressão sugere, o dano muscular consiste de uma série de lesões microscópicas (ou micro-lesões) à estrutura da célula muscular. A linha Z parece ser a estrutura mais vulnerável ao dano¹⁰³, embora micro-lesões tenham

sido também reportadas na membrana plasmática, retículo sarcoplasmático, túbulos transversos, miofibrilas e citoesqueleto (especialmente proteínas como a titina e a desmina)^{103,107,108}. Esses danos em nível microscópico são capazes de prejudicar a funcionalidade muscular, reduzindo a capacidade de produção de força, alterando o comprimento ótimo de produção de força e incrementando a tensão passiva do músculo^{104,107}. Outros aspectos, como a dor muscular de início tardio (DMIT), o aumento de proteínas musculares no sangue e a resposta inflamatória (com a presença de seus sinais cardinais, principalmente edema, calor e limitação funcional), também se encontram associados ao dano muscular induzido pelo exercício^{104,105,107,109,110}. Embora cada um desses eventos apresente um comportamento cronológico específico¹⁰⁵, os sintomas de dano muscular podem permanecer presentes por vários dias após a sessão de exercício excêntrico, levando à limitação do desempenho muscular e esportivo¹⁰⁶, assim como ao aumento do risco de lesões musculoesqueléticas¹⁰⁹.

Apesar da resposta inicial ao exercício excêntrico apresentar efeitos deletérios sobre a estrutura e função do músculo esquelético, o fenômeno conhecido como “*repeated bout effect*” (ou “efeito de sessões repetidas”) consiste em uma adaptação aguda, responsável por um efeito de proteção do tecido muscular contra o dano causado por uma sessão de exercício excêntrico subsequente¹¹¹. A partir disso, os sintomas do dano muscular induzido pelo exercício (por exemplo, DMIT, redução da força e/ou marcadores inflamatórios) são consideravelmente reduzidos após a segunda sessão quando comparados à resposta verificada após primeira sessão de exercício. Esse efeito protetor tem sido bem documentado na literatura em sessões de exercício separadas por semanas¹¹²⁻¹¹⁴ ou até mesmo meses¹¹⁵⁻¹¹⁷, mas os mecanismos por trás desse fenômeno permanecem incertos. As principais hipóteses envolvem adaptações de origem mecânica, neural e celular, as quais foram descritas com detalhamento na conceituada revisão de McHugh¹¹¹ sobre o tema. De qualquer forma, independente do mecanismo de ação, essa resposta do sistema neuromuscular a uma única sessão de exercício excêntrico sugere que esse tipo de exercício, quando executado sistematicamente por meio de um programa de treinamento, seja capaz de promover respostas crônicas interessantes sobre a

estrutura e função do sistema neuromuscular, as quais serão aqui tratadas pelo termo adaptações neuromusculares.

O treinamento de força, também chamado de treino resistido, é caracterizado pela execução de exercícios voluntários contra uma carga ou resistência externa, sendo considerado o método mais indicado para o incremento de força muscular ¹. Como demonstrado desde o final da década de 1970 ², os ganhos de força nas primeiras semanas de treinamento são atribuídos principalmente a adaptações neurais, relacionadas ao aumento da capacidade de ativação das unidades motoras e melhora do sincronismo da musculatura agonista, bem como à redução da ativação dos músculos antagonistas ³⁻⁵. As adaptações morfológicas ou estruturais estão principalmente (mas não exclusivamente) relacionadas ao ganho de massa muscular (ou hipertrofia), afetando a capacidade de produção de força do indivíduo de forma mais significativa após 6-8 semanas de treinamento ⁶⁻⁸. Embora o treinamento de força mais comumente utilizado envolva exercícios com ações concêntricas e excêntricas (treino de força convencional), programas de treinamento podem ser executados com ênfase ou exclusividade em ações isométricas, concêntricas e excêntricas ⁷. Assim, uma vez estabelecido que as alterações na capacidade de produção de força estão diretamente relacionadas à demanda imposta sobre o sistema neuromuscular ^{1,19}, a possibilidade de implementar maiores cargas sobre a musculatura durante exercícios que utilizam somente contrações excêntricas se torna atrativa com a intenção de potencializar as adaptações neuromusculares ao treinamento.

Um número expressivo de estudos envolvendo treinamento excêntrico em sujeitos saudáveis ²⁰⁻⁷⁰ e atletas de diferentes esportes e níveis competitivos ⁷¹⁻⁷⁸ foi publicado nas últimas décadas. Com a intenção de conter ou reverter os efeitos deletérios do envelhecimento sobre o sistema neuromuscular ^{90,91}, o treinamento excêntrico tem sido também proposto para a população idosa ⁷⁹⁻⁸⁹, uma vez que os ganhos associados ao treinamento de força podem aumentar o nível de independência desses indivíduos, contribuindo para a melhora da qualidade de vida e incremento da expectativa de vida. Além disso, é importante o entendimento de que outras estruturas envolvidas na geração do movimento (por exemplo, tecidos esqueléticos e conectivos) também se adaptam positivamente às demandas

funcionais do treinamento de força⁹². Essa característica de plasticidade dos tecidos biológicos que são mecanicamente estimulados durante a contração muscular faz do exercício excêntrico uma alternativa interessante no campo da reabilitação de lesões do sistema musculoesquelético, o que vem sendo evidenciado pela literatura recente⁹³⁻⁹⁵, com destaque para a prevenção e tratamento de lesões musculares¹¹⁸⁻¹²⁰, tendíneas¹²¹⁻¹²³ e ligamentares¹²⁴⁻¹²⁶.

A utilização do exercício excêntrico em um programa de treinamento sistematizado, seja para fins de condicionamento físico ou com a proposta de prevenção/reabilitação, tem chamado atenção de um número crescente de pesquisadores e profissionais da saúde, os quais têm se concentrado em determinar os efeitos agudos e crônicos do exercício excêntrico sobre os diferentes sistemas do organismo humano. Dois estudos de revisão relativamente recentes focaram sua atenção sobre as adaptações neuromusculares ao treinamento excêntrico^{96,127}. Roig et al.¹²⁷ apresentaram uma criteriosa meta-análise acerca dos ganhos de força e massa muscular em estudos que compararam o treinamento excêntrico com o treinamento concêntrico. Guilhem et al.⁹⁶ se concentraram em descrever as diferentes adaptações ao treinamento excêntrico realizado em condições isocinéticas (exercícios realizados em dinamômetro isocinético) e condições isotônicas (exercícios com pesos livres e/ou equipamentos de musculação). Entretanto, os estudos de revisão supramencionados agruparam informações de trabalhos envolvendo músculos extensores e flexores de joelho, extensores e flexores de cotovelo, flexores plantares e rotadores de ombro. Assim, uma vez que diferentes grupos musculares apresentam respostas específicas a uma sessão isolada de exercício excêntrico^{128,129} e a um programa sistematizado de treinamento de força^{1,3,19}, pode ser identificada uma lacuna na literatura relacionada à adaptação de grupos musculares específicos ao treinamento excêntrico.

Provavelmente devido à sua relevância para a locomoção, o grupo muscular extensor de joelho se apresenta como o mais frequentemente investigado pelos estudos envolvendo treinamento de força em humanos. O quadríceps femoral é uma estrutura complexa, formado por um músculo bi-articular (reto femoral, RF) e três músculos mono-articulares (vasto lateral, VL; vasto medial, VM; e vasto intermédio, VI). Apesar de os quatro músculos possuírem uma inervação em comum (nervo

femoral), o padrão de recrutamento desses músculos é diferenciado de acordo com o tipo de exercício realizado ¹³⁰⁻¹³². Cada músculo do quadríceps femoral possui sua própria arquitetura muscular (ou geometria fascicular) ¹³³ e distribuição específica dos tipos de fibras musculares ¹³⁴. Essas e outras características aumentam a complexidade do quadríceps femoral em relação a outros grupos musculares (por exemplo, flexores de cotovelo) e certamente influenciam as respostas do grupo muscular extensor do joelho ao treinamento. Desse modo, artigos de revisão concentraram suas atenções sobre as adaptações neuromusculares desse grupo muscular específico diante do treino de força convencional ⁷ e do treinamento com estimulação elétrica neuromuscular ¹³⁵. Entretanto, não são encontrados na literatura estudos que se propuseram a avaliar a resposta dos extensores de joelho ao treinamento excêntrico.

O presente estudo se constitui em uma revisão da literatura e teve como objetivo descrever os diferentes métodos implementados pelos cientistas da área para o treinamento excêntrico de extensores de joelho, assim como verificar as adaptações neurais, adaptações morfológicas, adaptações na força do quadríceps femoral de indivíduos saudáveis submetidos a programas de treinamento excêntrico.

MÉTODOS

Os autores conduziram um processo de busca por artigos científicos sobre a temática em questão de forma independente nas bases de dados PubMed, Scopus, SportDiscus e Scielo. A pesquisa foi realizada entre dezembro de 2011 e janeiro de 2012. Os termos utilizados nessa pesquisa bibliográfica foram “*eccentric contraction*”, “*eccentric exercise*” e “*eccentric training*”, tornando a pesquisa restrita a artigos publicados na íntegra ou com o resumo em língua inglesa. Esses termos foram escolhidos por serem rotineiramente utilizados na literatura científica para descrever o exercício de característica excêntrica ¹³⁶.

Os artigos foram inicialmente selecionados por meio da análise do título e do resumo, sendo incluídos nessa primeira parte do processo seletivo todos os estudos que apresentassem os seguintes critérios de inclusão: (1) artigos publicados a partir

de 1990 em periódicos com revisão pelos pares; (2) estudos caracterizados como “*randomized controlled trials*” (RCTs) ou “*clinical controlled trials*” (CCTs); (3) estudos envolvendo treinamento excêntrico em seres humanos sem a presença de lesões musculoesqueléticas, ou seja, o exercício excêntrico utilizado como uma intervenção para treinamento e não para reabilitação.

Todos os artigos originais incluídos após a primeira fase do processo de seleção foram obtidos e revisados na íntegra pelos autores. Dentre esses artigos, foram excluídos da análise da presente revisão: (1) estudos que não realizaram treinamento excêntrico nos músculos extensores de joelho; (2) estudos envolvendo atletas, devido à influência do treinamento das modalidades esportivas sobre os resultados e devido às diferentes magnitudes de adaptação neuromuscular entre sujeitos treinados e destreinados; (3) estudos com períodos de intervenção inferiores a quatro semanas de treinamento; (4) estudos que utilizaram métodos de treinamento que não incluem dinamômetros isocinéticos, pesos livres ou equipamentos convencionais de musculação; (5) estudos que não apresentaram nos resultados qualquer tipo de variável relacionada a adaptações neurais, morfológicas ou na força muscular dos sujeitos treinados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratégia de busca escolhida e a aplicação dos critérios de inclusão adotados por meio da leitura do título e do resumo dos estudos resultaram na seleção de 70 artigos para análise de conteúdo. Após a aquisição e revisão da versão completa desses estudos, os critérios de exclusão foram implementados, de modo que: (1) 28 estudos ^{27,42-44,46-57,59,60,66-68,71,75-78,81,137} foram excluídos por não contemplarem o treinamento excêntrico dos músculos extensores de joelho (critério de exclusão número 1); (2) três estudos ⁷²⁻⁷⁴ foram excluídos por envolverem o treinamento de atletas de diferentes esportes (critério de exclusão número 2); (3) dois estudos ^{58,79} foram excluídos por terem utilizado períodos de intervenção inferiores a quatro semanas de treinamento (critério de exclusão número 3); (4) sete estudos ^{61-63,80,85,87,88} foram excluídos por terem realizado o treinamento excêntrico

em cicloergômetros e três estudos^{64,65,84} por utilizarem equipamentos gravidade-independentes conhecidos como “*flywheel ergometers*” (critério de exclusão número 4); e (5) um estudo⁷⁰ foi excluído por não apresentar qualquer informação relacionada a adaptações neuromusculares do segmento treinado (critério de exclusão número 5). Assim, um total de 26 estudos foi considerado para análise na presente revisão.

Os estudos analisados demonstraram uma considerável variabilidade no número de participantes, sexo e idade dos sujeitos treinados. Além disso, os métodos de execução e periodização do treinamento excêntrico diferiram entre os estudos, culminando em diferenças em variáveis do treinamento, tais quais: número de semanas de treinamento, na frequência semanal de sessões de treino, volume de treinamento por sessão (número de séries x número de repetições por série), intensidade do exercício, tipo de exercício realizado, amplitude articular e velocidade de execução do movimento. As características dos sujeitos e do programa de treinamento excêntrico implementado em cada estudo se encontram sumarizadas na Tabela 1 e são discutidas na sessão “*Programas de Treinamento Excêntrico*”.

O incremento da força excêntrica, isométrica e concêntrica é apresentado na Tabela 2 por meio de dois modelos de análise: (1) alterações percentuais de força observadas entre pré- e pós-treinamento excêntrico em cada estudo; e (2) alterações percentuais de força observadas por sessão de treino excêntrico realizada em cada estudo. A força excêntrica foi obtida por meio de testes realizados em dinamômetros isocinéticos ou testes de repetições máximas excêntricas; os testes para avaliação da força isométrica incluíram dinamômetros ou células de carga; enquanto a força concêntrica foi avaliada por meio de dinamometria isocinética ou testes de uma repetição máxima. A sessão “*Adaptações na força muscular*” se concentra em discutir os achados dos estudos analisados.

A Tabela 3 apresenta: (1) as alterações percentuais em parâmetros neurais (ou seja, atividade eletromiográfica e razão de ativação central) durante contrações voluntárias máximas; e (2) as alterações percentuais nos principais parâmetros utilizados pelos estudos para avaliar as adaptações morfológicas ao treinamento excêntrico, em especial as mudanças na massa muscular, geometria fascicular e distribuição dos tipos de fibra.

Tabela 1. Programas de treinamento excêntrico utilizados pelos estudos envolvendo os músculos extensores de joelho.

	N	Sexo	Idade	Período	Freq.	Volume	Intensidade	Exercício	ADM	Veloc.
Ben-Sira et al. ²⁰	10	F	21	8	2	3 x 10	65% 1-RM	EJ	90°	3-4s
	8	F	21	8	2	3 x 5	130% 1-RM	EJ	90°	3-4s
Blazevich et al. ²¹	11	M-F	23	10	3	4-6 x 6	máxima	DI	100°	30°.s ⁻¹
Blazevich et al. ²²	11	M-F	23	10	3	4-6 x 6	máxima	DI	100°	30°.s ⁻¹
Higbie et al. ²³	19	F	20	10	3	3 x 10	máxima	DI	ni	60°.s ⁻¹
Hortobagyi et al. ²⁵	7	M	20	12	3	4-6 x 8-12	máxima	DI	ni	60°.s ⁻¹
Hortobagyi et al. ²⁴	14	F	21	6	4	4 x 6-10	submáxima	DI	ni	60°.s ⁻¹
Housh et al. ²⁶	9	M	24	8	3	3-5 x 6	80% 1-RM _{ecc}	EJ	80°	1-2s
Mayhew et al. ⁴⁵	10	M-F	24	4	3	5 x 10	submáxima	DI	75°	60°.s ⁻¹
Melo et al. ⁸³	9	M	62	12	2	2-4 x 8-12	submáxima	DI	60°	60°.s ⁻¹
Miller et al. ²⁸	17	F	20	20	3	1-5 x 6	máxima	DI	ni	60°.s ⁻¹
Nickols-Richardson et al. ²⁹	33	F	20	20	3	1-5 x 6	máxima	DI	ni	60°.s ⁻¹
Poletto et al. ³⁰	18	M	22	6	2	3 x 10	máxima	DI	70°	30°.s ⁻¹
Raj et al. ⁸⁹	13	M - F	68	16	2	3 x 5	50% 1-RM	LP	ni	ni
Raue et al. ³¹	6	M	24	4	3	4 x 8	75-100% 1-RM	EJ	ni	ni
Reeves et al. ⁸⁶	10	M-F	67	14	3	4 x 10	80% 5-RM _{ecc}	EJ / LP	90/95°	3s
Rocha et al. ³²	10	M	26	12	3	2-5 x 7-9	máxima	DI	90°	60°.s ⁻¹
Santos et al. ³³	20	M	22	6	2	3 x 10	máxima	DI	70°	30°.s ⁻¹
Schroeder et al. ³⁴	14	F	24	16	2	3 x 10	75% 1-RM	EJ	ni	4s
	14	F	24	16	2	3 x 6	125% 1-RM	EJ	ni	4s

Continuação da Tabela 1.

Seger e Thorstensson ³⁶	5	M	25	10	3	4 x 10	máxima	DI	85°	90°.s ⁻¹
Seger et al. ³⁵	5	M	25	10	3	4 x 10	máxima	DI	85°	90°.s ⁻¹
Smith e Rutherford ³⁷	10	M-F	20	20	3	4 x 10	RMs	LP	ni	3s
Sorichter et al. ³⁸	10	M	23	5	1	7 x 10	150% MFI	EJ	50°	1-2s
	10	M	23	5	2-3	7 x 10	150% MFI	EJ	50°	1-2s
Spurway et al. ³⁹	20	M-F	24	6	3	3 x 6	RMs	EJ	90°	ni
Symons et al. ⁸²	9	M-F	70	12	3	3 x 10	máxima	DI	85°	90°.s ⁻¹
Tomberlin et al. ⁴⁰	21	M-F	27	6	3	3 x 10	máxima	DI	70°	100°.s ⁻¹
Weir et al. ⁴¹	9	F	24	8	3	3-5 x 6	80% 1-RM _{ecc}	EJ	85°	1-2s

N = número de sujeitos; Idade = média de idade dos sujeitos (anos); Período = número de semanas de treinamento; Freq. (frequência) = número de sessões de treino por semana; Volume = número de séries por sessão x número de repetições por série; Exercício: tipo de exercício executado durante o treinamento; ADM = amplitude de movimento articular de joelho; Veloc. (velocidade) = velocidade angular (exercício isocinético) ou tempo de execução (exercício isotônico) das contrações excêntricas; M = masculino; F = feminino; 1-RM = teste de 1 repetição máxima; 1-RM_{ecc} = teste de 1 repetição máxima excêntrica; 3-RM = teste de 3 repetições máximas; 5-RM_{ecc} = teste de 5 repetições máximas excêntricas; RMs = método de repetições máximas; MFI = máxima força isométrica; DI = dinamômetro isocinético; EJ = cadeira extensora de joelho; LP = equipamento de leg-press; ni = não informado.

Tabela 2. Adaptações na força muscular provenientes do treinamento excêntrico de extensores de joelho.

	$\Delta\%$ força (entre pré- e pós-treinamento)			$\Delta\%$ força (por sessão de treino)		
	EXC	ISO	CON	EXC	ISO	CON
Ben-Sira et al. ²⁰	-	-	↑17-23%	-	-	↑1,44%
Blazevich et al. ²¹	↑39%	-	↑16%	↑1,30%	-	↑0,53%
Blazevich et al. ²²	-	↑10%	-	-	↑0,33%	-
Higbie et al. ²³	↑36%	-	↑7%	↑1,20%	-	↑0,23%
Hortobagyi et al. ²⁵	↑116%	↑45%	ns	↑3,22%	↑1,25%	**
Hortobagyi et al. ²⁴	↑42%	↑30%	ns	↑1,83%	↑1,30%	**
Housh et al. ²⁶	↑29%	-	-	↑1,61%	-	-
Mayhew et al. ⁴⁵	-	↑8%	-	-	↑0,67%	-
Melo et al. ⁸³	↑20%	-	-	↑0,83%	-	-
Miller et al. ²⁸	↑27%	-	↑25%	↑0,45%	-	↑0,42%
Nickols-Richardson et al. ²⁹	↑29%	-	↑15%	↑0,48%	-	↑0,25%
Poletto et al. ³⁰	↑38-41%	-	-	↑3,42%	-	-
Raj et al. ⁸⁹	-	↑7%	↑5-11% ^{VD}	-	↑0,22%	↑0,34%
Raue et al. ³¹	-	-	ns	-	-	**
Reeves et al. ⁸⁶	↑9-17% ^{VD}	ns	ns	↑1,41%	**	**
Rocha et al. ³²	ns-↑59% ^{VD}	↑24%	ns	↑1,69%	↑0,69%	**
Santos et al. ³³	↑17-27% ^{VD}	↑16%	-	↑2,25%	↑1,33%	-
Schroeder et al. ³⁴	-	-	↑19-24%	-	-	↑0,75%
Seger e Thorstensson ³⁶	ns-↑43% ^{VD}	-	ns	↑1,43%	-	**

 Continuação da Tabela 2.

Seger et al. ³⁵	ns-↑34% ^{VD}	ns	ns-↑8% ^{VD}	↑1,13%	**	↑0,27%
Smith e Rutherford ³⁷	-	ns-↑31% ^{AD}	ns-↑21% ^{VD}	-	↑0,52%	↑0,35%
Sorichter et al. ³⁸	-	ns	-	-	**	-
	-	↑9%	-	-	↑0,08%	-
Spurway et al. ³⁹	↑18-34% ^{VD}	ns	ns-↑20% ^{VD}	↑1,9%	**	↑1,1%
Symons et al. ⁸²	↑26%	↑25%	↑10%	↑0,72%	↑0,69%	↑0,28%
Tomberlin et al. ⁴⁰	↑53%	-	ns	↑2,94%	-	**
Weir et al. ⁴¹	↑29%	ns-↑15% ^{AD}	-	↑1,21%	↑0,63%	-

$\Delta\%$ = alteração percentual; EXC = testes excêntricos; ISO = testes isométricos; CON = teste concêntricos; ns = não significativo; ^{VD} velocidade-dependente; ^{AD} ângulo-dependente; M = masculino; F = feminino; ** valores de incremento de força não significativos na comparação pré- para pós-treinamento não foram considerados para análise da variação percentual por sessão de treino; obs. 1: em estudos que não apresentaram os valores de força no texto ou em tabelas, os incrementos percentuais de força foram obtidos por meio da análise de figuras com auxílio do software Image-J (National Institute of Health, EUA); obs.2: quando mais de uma velocidade ou ângulo foram avaliados, o maior incremento de força observado foi utilizado para o cálculo do incremento de força por sessão de treino; obs.3: os valores de alteração percentual por sessão de treino foram calculados por meio da divisão do incremento total de força pelo número de sessões de treinamento.

Tabela 3. Adaptações neurais e morfológicas provenientes do treinamento excêntrico de extensores de joelho.

	Adaptações Neurais	Adaptações Morfológicas
Ben-Sira et al. ²⁰	-	Perimetria de coxa = ns
Blazevich et al. ²¹	-	MV _{QF} = ↑10%; MV _{VL} = ↑11%; MV _{VM} = ↑15% ASTA _{QUAD} = ↑7-13%; ASTA _{RF} = ↑7-8% ASTA _{VI} = ↑0-13%; ASTA _{VM} = ↑12-18% ASTA _{VL} = ↑11-14%; ASTF _{VL} = ↑8% EM _{VL} = ↑15%; EM _{VM} = ↑8% AP _{VL} = ↑21%; AP _{VM} = ns CF _{VL} = ↑3%
Blazevich et al. ²²	ISO _{VL-VM-RF} = ns; coativação = ns	-
Higbie et al. ²³	EXC _{VL+VM} = ↑17%; CON _{VL+VM} = ns	ASTA _{QF} = ↑7%
Hortobagyi et al. ²⁵	EXC _{VL} = ↑188%; ISO _{VL} = ↑58% CON _{VL} = ns; coativação = ns	AST _{FM} : I=ns; II=↑38% [%] _{FM} : I=ns; IIa=↑12% IIb=↓7%
Hortobagyi et al. ²⁴	EXC _{VL} = ↑92%; EXC _{VM} = ↑80% CON _{VL} = ns; CON _{VM} = ns	-
Housh et al. ²⁶	-	ASTA _{QF} = ns
Mayhew et al. ⁴⁵	-	AST _{FM} : I=ns; II=↑18%
Nickols-Richardson et al. ²⁹	-	MLG = ↑3%
Raj et al. ⁸⁹	-	EM _{VL} = ↑5%; AP _{VL} = ns; CF _{VL} = ns
Raue et al. ³¹	-	% _{FM} = ns
Reeves et al. ⁸⁶	RAC = ↑4%	EM _{VL} = ↑11%; AP _{VL} = ns; CF _{VL} = ↑20%

 Continuação da Tabela 3.

Seger et al. ³⁵	-	ASTA _{QF} = ns-↑4% AST _{FM} : I=ns; IIa=ns; IIb=ns % _{FM} : I=ns; IIa=↓10%; IIb=ns
Smith e Rutherford ³⁷	-	ASTA _{QF} = ns-↑4%

EXC = testes excêntricos; ISO = testes isométricos; CON = testes concêntricos; ns = não significativo; M = masculino; F = feminino; RAC = razão de ativação central; ASTA = área de secção transversa anatômica; ASTF = área de secção transversa fisiológica; VM = volume muscular; EM = espessura muscular; AP = ângulo de penetração fascicular; CF = comprimento fascicular; MLG = massa livre de gordura; _{QF} = quadríceps femoral; _{RF} = reto femoral; _{VI} = vasto intermédio; _{VL} = vasto lateral; _{VM} = vasto medial; AST_{FM} = área de secção transversa das fibras musculares; [%]_{FM} = distribuição percentual dos tipos de fibra muscular. obs. 1: em estudos que não apresentaram os valores no texto ou em tabelas, os incrementos percentuais de aspectos neurais e morfológicos foram obtidos por meio da análise de figuras com auxílio do software Image-J (National Institute of Health, EUA).

Programas de treinamento excêntrico

Exercícios isocinéticos são executados com a velocidade angular controlada pelo dinamômetro durante toda a amplitude de movimento, independentemente da intensidade da contração executada pelo indivíduo, o que tem levado alguns cientistas a categorizá-los como exercícios com “acomodação da resistência”⁷. Em exercícios realizados com pesos livres ou equipamentos de musculação, apesar de a massa do peso livre ou da máquina apresentar uma magnitude constante, o torque resistente é alterado durante o arco de movimento, o que modifica a força muscular necessária para realizar o exercício ao longo da amplitude de movimento articular. Por essa razão, o termo “isotônico” tem sido preterido por expressões como “exercício dinâmico”⁷ ou “exercício isoinercial”¹³⁸ por alguns autores. No entanto, a presente revisão optou pela utilização dos termos “isocinético” e “isotônico” devido ao fato de serem os termos mais frequentemente utilizados na literatura.

De acordo com a Tabela 1, 16 estudos utilizaram dinamômetros isocinéticos para o treinamento excêntrico^{21-25,28-30,32,33,35,36,40,45,82,83}, enquanto os 10 estudos remanescentes optaram por exercícios isotônicos em equipamentos de *leg-press*^{37,86,89} e/ou cadeira extensora de joelho^{20,26,31,34,38,39,41,86}. Com respeito à execução dos exercícios excêntricos isotônicos, o método adotado pelos estudos incluiu: (1) ajuda do pesquisador durante a execução da fase concêntrica, de modo que o sujeito se concentrava somente na execução da fase excêntrica do exercício^{26,34,38,41,86}; (2) execução da fase concêntrica de forma bilateral e da fase excêntrica somente com o segmento escolhido para o treinamento excêntrico^{20,39,89}; e (3) execução da fase concêntrica com carga reduzida e adição de carga durante a fase excêntrica do exercício³⁷. É interessante notar que os regimes de treinamento excêntrico isotônico não se constituem exclusivamente de ações musculares excêntricas, uma vez que algum nível de ação concêntrica é exigido para a movimentação do segmento até a posição inicial do exercício excêntrico. Tal fato leva alguns pesquisadores a substituir a expressão “treinamento excêntrico” por outros termos que transmitam essa ideia de treinamento com ênfase no componente excêntrico do movimento⁸⁹.

Nenhum dos estudos com treinamento isotônico optou pela execução da fase excêntrica com uma maior duração de tempo do que a fase concêntrica, como

proposto pelo estudo de revisão de Schoenfeld ⁸. Diferentemente dos outros métodos, essa estratégia sobrecarrega a fase excêntrica incrementando o tempo de exposição da musculatura à ação excêntrica e não à carga sustentada durante a ação excêntrica. Sob uma ótica voltada à aplicação prática, essa parece uma alternativa interessante pois não necessita do auxílio de um segundo sujeito (pesquisador ou clínico) para auxiliar na realização da fase concêntrica, como foi a estratégia utilizada pela maioria dos estudos com treinamento excêntrico isotônico ^{26,34,38,41,86}. No entanto, embora já existam evidências favoráveis à utilização de tempos mais prolongados na fase excêntrica dos exercícios resistidos ¹³⁹, a efetividade desse método necessita de investigações adicionais.

O número de sujeitos engajados nos programas de treinamento excêntrico variou entre cinco ^{35,36} e 33 ²⁹ participantes, de modo que a maioria dos estudos utilizou amostras compostas por 10 a 20 indivíduos ^{20-24,28-30,32-34,37-40,45,86,89}. Todos os sujeitos eram saudáveis, sem a presença de lesões musculoesqueléticas ou comorbidades que pudessem interferir no desempenho durante as avaliações e/ou sessões de treino. Com exceção dos estudos desenvolvidos com idosos ^{82,83,86,89}, a média de idade dos sujeitos variou entre 20 e 33 anos, ao passo que muitos estudos relataram a maciça participação de estudantes universitários nos programas de intervenção. Nove estudos realizaram o treinamento em indivíduos de ambos os sexos ^{21,22,37,39,40,45,82,86,89}, enquanto 11 treinaram apenas homens ^{25,26,30-33,35,36,38,41,83} e seis apenas mulheres ^{20,23,24,28,29,34}. É interessante observar que somente um estudo ³⁹ reportou resultados agregados por sexo dos indivíduos, de modo que as diferenças encontradas sugerem que esse seja um fator interveniente nas adaptações ao treinamento excêntrico de extensores de joelho.

O período de duração dos programas de treinamento excêntrico variou entre quatro ^{31,45} e 20 ^{28,29,37} semanas de treinamento. A frequência adotada pela maioria dos estudos envolveu três sessões por semana ^{21-23,25,26,28,29,31,32,35-37,39-41,45,82,86}, havendo também programas compreendendo duas ^{20,30,33,34,83,89} e quatro ²⁴ sessões de treino semanais. Um único estudo ³⁸ realizou a progressão de duas para três sessões semanais durante o programa de treinamento de um grupo, assim como fixou a frequência do outro grupo experimental em uma única sessão de treino semanal.

Um aspecto frequentemente enfatizado pelos autores com respeito à frequência das sessões de treino diz respeito à observação de um intervalo de pelo menos 48 horas entre as sessões. Esse procedimento se faz necessário com intuito de permitir um adequado processo de regeneração dos grupos musculares treinados^{1,7}. Entretanto, como previamente mencionado na sessão de introdução do presente artigo, o exercício excêntrico é um potente causador de dano muscular, cujos sintomas clínicos podem persistir por muitos dias após a sessão de exercício, em especial a DMIT e a redução da força muscular^{104,105,107,109,110}. Nesse sentido, diferentes estratégias têm sido implementadas na(s) primeira(s) semana(s) de treinamento excêntrico com a intenção de evitar que o sujeito realize uma sessão de treino na presença dos efeitos deletérios do dano muscular induzido pela sessão anterior. Assim, a redução da frequência das sessões de treino na primeira semana de intervenção^{24,32}, a progressão do número de contrações por sessão de treino^{21,24-26,28,29,32,39,41} e o incremento gradual do nível de intensidade do exercício isocinético^{21,22} ou da carga usada no exercício isotônico³¹ parecem ser estratégias válidas.

Na presente revisão, o volume de treinamento é definido como o produto do número de séries executadas na sessão de treino pelo número de repetições executadas por série, enquanto a intensidade está relacionada ao nível de esforço requerido para a execução do exercício^{7,8,19}. Normalmente, essas são as variáveis que são manipuladas durante um programa de treinamento de força com a intenção de respeitar o “princípio de progressão” do treinamento^{1,19}. Nesse sentido, durante o programa de treinamento a sobrecarga mecânica imposta sobre os músculos pode ser incrementada pelo aumento da intensidade no exercício isocinético, pelo aumento da carga externa no exercício isotônico ou pelo aumento do número de contrações executadas em ambos os tipos de treinamento^{1,19}. Os estudos com treinamento excêntrico isocinético adotaram 1-6 séries de 6-12 repetições^{21-25,28-30,32,33,35,36,40,45,82,83}, enquanto os programas de treinamento excêntrico isotônico foram constituídos de 3-7 séries de 5-10 repetições por sessão de treino^{20,26,31,34,37-39,41,86,89}. Entretanto, alguns aspectos relacionados à intensidade do exercício devem ser enfatizados, uma vez que diferenciam consideravelmente o treinamento realizado em condições isocinéticas e isotônicas.

Os exercícios executados em dinamômetros isocinéticos permitem a realização de uma contração máxima durante toda a amplitude de movimento ¹⁴⁰. O dinamômetro isocinético responde ao torque gerado pelo sujeito de forma proporcional e em direção oposta com o intuito de controlar a velocidade angular do movimento ¹⁴⁰. Assim, a demanda mecânica imposta sobre a musculatura é determinada pela capacidade e nível de esforço do próprio sujeito, o que possibilita a realização de um exercício na real máxima intensidade possível de cada indivíduo sem o risco de expor o complexo músculo-tendão a uma sobrecarga mecânica acima da sua capacidade. Essa característica do exercício isocinético ajudou sobremaneira na disseminação do uso dos dinamômetros para fins de treinamento e, principalmente, reabilitação musculoesquelética ¹⁴¹. Porém, três estudos ^{24,45,83} optaram pela utilização de contrações submáximas em seus programas de treinamento. No estudo de Hortobagyi et al. ²⁴, por exemplo, a intensidade do exercício do grupo que treinou excentricamente foi equalizada com os valores de torque gerados pelo grupo que treinou concentricamente em máxima intensidade. A intenção dos autores era verificar a influência do tipo de contração, mas não a sobrecarga mecânica, sobre as adaptações neuromusculares de extensores de joelho. No entanto, a vantagem clínica do dinamômetro isocinético é justamente a possibilidade de submeter o músculo a exercícios na máxima intensidade, sendo esse o método comumente escolhido pelos estudos que utilizaram sujeitos sem restrições ao exercício máximo ^{21-23,25,28-30,32,33,35,36,40,82}.

Uma vez que a resposta esperada pelo sujeito engajado em um programa de treinamento é o incremento gradual da capacidade de produção de força muscular, a sobrecarga mecânica imposta pelo exercício isocinético máximo tende a ser também incrementada ao longo do período de treinamento. Em outras palavras, se ocorre um progressivo aumento no torque produzido pelo sujeito ao longo das sessões de treino no dinamômetro isocinético, o princípio de progressão é respeitado mesmo que o volume (séries x repetições) permaneça constante durante todo o programa de treinamento. Esse aspecto diferencia o treinamento isocinético do treinamento isotônico, uma vez que o segundo exige ajustes no volume ou na carga utilizada nas sessões de treino para garantir o aumento da sobrecarga mecânica imposta sobre a musculatura. Mesmo assim, alguns estudos com treinamento excêntrico em

condições isocinéticas optaram por variar o número de séries ^{21,22,28,29}, o número de repetições por série ²⁴ ou ambos ^{25,32,83} durante o período de intervenção.

Em virtude da maior capacidade de produção de força em ações excêntricas em comparação às ações concêntricas, a execução de uma repetição completa (fases concêntrica e excêntrica do movimento) com uma carga fixa (pesos livres ou equipamentos de musculação) conduz a uma evidente subestimação do componente excêntrico do movimento. Esse aspecto afeta diretamente questões relacionadas à prescrição da carga em exercícios excêntricos isotônicos, já que estratégias comumente utilizadas para a determinação da carga no treino de força convencional, como o teste de uma repetição máxima (1-RM) ¹⁴², apresentam limitações quando o objetivo é prescrever a carga a ser utilizada no exercício excêntrico. Por exemplo, a carga de 80% de 1-RM, uma intensidade comumente utilizada em programas de treino de força convencional ^{1,19}, corresponde a 80% da capacidade máxima de produção de força concêntrica do músculo, mas certamente representa um percentual inferior da capacidade máxima de produção de força excêntrica. Ou seja, a utilização dessa carga leva a uma intensidade de exercício inferior à desejada durante a fase excêntrica do movimento, o que possivelmente afeta de forma negativa a magnitude das adaptações neuromusculares atribuídas ao componente excêntrico do movimento.

O método de determinação da carga a ser utilizada nos exercícios excêntricos variou entre os estudos de treinamento excêntrico isotônico. Quatro estudos ^{20,31,34,89} optaram por cargas inferiores à máxima registrada no teste de 1-RM, enquanto dois desses estudos ^{20,34} treinaram outro grupo de sujeitos com cargas correspondentes a 125-130% de 1-RM para a execução de séries com 5-6 repetições excêntricas. Apesar de pouco usuais, os testes envolvendo uma repetição máxima excêntrica (1-RM_{exc}) ou cinco repetições máximas excêntricas (5-RM_{exc}) parecem ser uma alternativa interessante para a determinação da carga a ser implementada no treinamento excêntrico. Valores correspondentes a 80% de 1-RM_{exc} para séries de 6 repetições ^{26,41} e 80% de 5-RM_{exc} para séries de 10 repetições ⁸⁶ têm sido utilizados para jovens e idosos, respectivamente. Entretanto, a estratégia que se apresenta mais próxima a um exercício de máxima intensidade é a prescrição da carga baseada no método de repetições excêntricas máximas. Nesse método, um número

pré-determinado de repetições excêntricas precisa ser atingido pelo sujeito (preferencialmente com controle do tempo de execução das ações excêntricas), de modo que os incrementos da carga são realizados quando o indivíduo é capaz de executar uma repetição adicional ao número fixado, como utilizado em dois dos estudos analisados pela presente revisão ^{37,39}.

Tanto o exercício isocinético realizado no dinamômetro quanto o exercício isotônico realizado na cadeira extensora são classificados como exercícios de cadeia cinética aberta. Esses exercícios são compostos por ações mono-articulares em que a extremidade do segmento (no caso, o pé) não se encontra apoiada sobre uma superfície, ao passo que os exercícios de cadeia cinética fechada envolvem o apoio da extremidade em uma superfície associada à movimentação de mais de uma articulação ¹⁴³. Entretanto, Guilhem et al. ¹³² demonstraram que a ativação muscular do quadríceps femoral é superior em exercícios de cadeia cinética aberta realizados em condições isotônicas do que em condições isocinéticas. Diferentes padrões de ativação muscular também foram verificadas entre exercícios isotônicos de cadeia cinética aberta (como a cadeira extensora de joelho) e cadeia cinética fechada (como o *leg-press*) ¹³¹. Essas e outras peculiaridades de cada tipo de exercício possivelmente afetam as adaptações do sistema neuromuscular ao treinamento, de modo que a comparação entre estudos que utilizaram diferentes equipamentos para o treinamento excêntrico deve ser feita com cautela.

Uma vez que evidências sugerem que exercícios realizados em maiores comprimentos musculares promovem índices de dano muscular superior aos exercícios em menores comprimentos ¹⁴⁴, a amplitude de movimento utilizada no treinamento excêntrico passa a ser um fator com prováveis repercussões sobre as respostas neuromusculares. Um número considerável de estudos não faz menção à amplitude de movimento utilizada na execução do exercício excêntrico ^{23-25,28,29,31,34,37,89}. No entanto, entre os estudos envolvendo exercícios em cadeia cinética aberta, os exercícios excêntricos no dinamômetro isocinético foram realizados com 60-100° de amplitude articular do joelho ^{21,22,30,32,33,35,36,40,45,82,83}, enquanto amplitudes de 50-90° foram usadas na cadeira extensora de joelho ^{20,26,38,39,41,86}. Em relação ao *leg-press*, apenas um estudo ⁸⁶ transcreveu a utilização de amplitudes de movimento de aproximadamente 95° na articulação do joelho.

Porém, é interessante ressaltar que a angulação do quadril é mantida constante nos exercícios em cadeia cinética aberta (dinamômetro isocinético e cadeira extensora de joelho) em aproximadamente 80-90°, enquanto nos exercícios de cadeia cinética fechada, a configuração estrutural da maioria dos equipamentos de *leg-press* pode levar a valores de flexão de quadril consideravelmente superiores a esse valor na fase final da fase excêntrica do movimento. Dessa forma, mesmo que a amplitude articular do joelho seja semelhante entre os três tipos de exercício implementados pelos estudos, o comprimento em que o reto femoral produz força é provavelmente menor no exercício de *leg-press*.

A velocidade de movimento nas ações excêntricas influencia de forma antagônica os exercícios executados em condições isocinéticas e isotônicas. Durante os exercícios máximos isocinéticos, quanto maior a velocidade angular determinada pelo dinamômetro, maior a sobrecarga mecânica imposta sobre a musculatura, como evidenciado pela maior magnitude de dano muscular após exercícios excêntricos em velocidades elevadas em comparação a velocidades lentas^{57,145}. Por outro lado, nos exercícios isotônicos com carga constante, o tempo de exposição à ação excêntrica determina a sobrecarga mecânica imposta sobre o músculo. Em outras palavras, quanto mais lenta a contração excêntrica isotônica, maior o trabalho total realizado pela musculatura (trabalho = força x tempo) e maior o nível de dano muscular esperado. Assim, enquanto estudos com treinamento isocinético poderiam adotar como estratégia o aumento da velocidade angular para aumentar a sobrecarga mecânica imposta pelo exercício, estudos com treinamento isotônico deveriam aumentar o tempo que o músculo leva para executar a ação excêntrica (reduzir a velocidade do movimento) com intuito de incrementar a sobrecarga mecânica sem alterar a carga utilizada no exercício.

Os estudos com treinamento excêntrico isocinético têm priorizado velocidades lentas de execução de $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ ^{21,22,30,33}, $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ ^{23-25,28,29,45,83} e $90^{\circ} \cdot s^{-1}$ ^{35,36,82}, sendo encontrado um único estudo que variou a velocidade angular ao longo do treinamento⁵⁰. Evidências sugerem que contrações isocinéticas excêntricas máximas em velocidades elevadas produzem maiores índices de dano muscular comparado a contrações em velocidades mais lentas^{57,145}. Assim, uma vez que o dano muscular se constitui em um importante mecanismo responsável pela resposta

hipertrófica das fibras musculares ⁸, o que conduz ao aumento da força muscular, a resposta do quadríceps femoral ao treinamento excêntrico talvez pudesse ser potencializada pelo treinamento em altas velocidades angulares, como observado na área de secção transversa anatômica ^{57,67}, área de secção das fibras ⁵⁷ e percentual de fibras rápidas ⁵³ nos músculos flexores de cotovelo. Entretanto, não foram encontrados estudos envolvendo o treinamento excêntrico isocinético de músculos extensores de joelho que objetivaram verificar o efeito da velocidade angular de exercício sobre as adaptações do sistema neuromuscular.

Em estudos com treinamento isotônico, o controle da velocidade é normalmente atribuído ao tempo de duração das ações excêntricas, independentemente do tipo e da amplitude de movimento utilizada, de modo que o tempo de duração das ações excêntricas é apresentado na coluna destinada à velocidade de execução do movimento nos estudos com treinamento excêntrico isotônico. Nesses estudos, tempos de 3 a 4 segundos foram os mais frequentemente utilizados ^{20,34,37,86}, embora contrações excêntricas de 1-2 segundos também tenham sido empregadas por alguns pesquisadores ^{26,38,41}. Não foram encontrados estudos avaliando o efeito de diferentes velocidades de execução do exercício excêntrico isotônico sobre as adaptações neuromusculares. No entanto, dois estudos ^{20,34} se propuseram a verificar o efeito da carga utilizada nos exercícios. Ambos os estudos tentaram equalizar o produto entre volume e intensidade entre os grupos treinados com cargas elevadas e reduzidas por meio da manipulação do número de repetições executadas por série. Ou seja, os sujeitos que treinaram com cargas mais altas executaram um número menor de repetições por série comparados aos que treinaram com cargas mais baixas. Uma vez que os autores não encontraram diferenças significativas entre os grupos nos ganhos de força, os resultados dos grupos foram agrupados e apresentados em conjunto na Tabela 2.

Em resumo, a Tabela 1 demonstra a considerável variabilidade dos protocolos empregados pelos estudos envolvendo treinamento excêntrico dos músculos extensores de joelho em sujeitos saudáveis. Diversos fatores podem interferir nas adaptações decorrentes de um período de treinamento, como por exemplo: (1) características dos sujeitos (sexo, idade, nível de condicionamento físico); (2) período de duração de treinamento; (3) frequência semanal das sessões

de treino; (4) volume de treino; (5) intensidade do exercício; (6) tipo de exercício; (7) amplitude articular de movimento; e (8) velocidade de execução do movimento) ^{1,3,19}. Sendo assim, recomenda-se cautela na interpretação dos resultados obtidos por cada estudo e, mais ainda, na comparação entre os diferentes estudos, uma vez que as diferenças metodológicas podem conduzir a interpretações equivocadas. As diferentes estratégias utilizadas para a implementação do exercício excêntrico, os métodos de definição da carga/intensidade de exercício e a influência da velocidade durante as ações musculares enfatizam as particularidades que caracterizam o treinamento excêntrico realizado em condições isocinéticas e isotônicas. Todos os fatores supramencionados são importantes e devem ser levados em consideração por pesquisadores e profissionais da saúde no momento do planejamento, prescrição e monitorização dos programas de treinamento excêntrico.

Adaptações na força muscular

Existem três formas básicas de manifestação da força muscular: força máxima, força resistente e força explosiva ³. Cada uma dessas manifestações retrata uma capacidade funcional distinta do grupo muscular avaliado e possui uma relevância clínica específica. No entanto, a maioria dos estudos envolvendo treinamento tem utilizado os testes de força máxima para verificar o efeito do programa de intervenção sobre a capacidade de produção de força muscular, de modo que esta revisão concentra suas atenções sobre as adaptações na força muscular máxima reportadas pelos estudos envolvendo treinamento excêntrico.

Todos os estudos que avaliaram os ganhos de força por meio de testes excêntricos observaram aumentos significativos ^{20,21,23-26,28-30,32,33,35,36,39-41,82,83,86}. Por outro lado, incremento da força concêntrica do quadríceps femoral foi verificado em alguns ^{20,21,23,28,29,34,82,89}, mas não em todos os estudos analisados ^{24,25,31,32,35,40,86}. Além disso, todos os estudos envolvendo extensores de joelho demonstraram que o percentual médio de incremento na força excêntrica (9-116%) foi superior ao verificado na força concêntrica (5-25%), discordando de evidências provenientes de estudos com treinamento excêntrico de outros grupos musculares que reportaram ganhos de força similar ^{50,53,54,81} ou até mesmo superior em testes concêntricos ^{67,68}. Esses achados demonstram um forte efeito do “princípio da especificidade” no

treinamento excêntrico de extensores de joelho, corroborando proposições de estudos de revisão anteriores^{96,127}.

Oito estudos^{32,33,35-37,39,86,89} utilizaram testes excêntricos e/ou concêntricos em diferentes velocidades angulares para verificar as alterações da força em função do treinamento excêntrico. Os resultados sugerem que os incrementos de força muscular variam em função da velocidade testada, de modo que os ganhos mais significativos ocorrem próximos à velocidade angular utilizada no treinamento, mais uma vez enfatizando o efeito do “princípio da especificidade” do treinamento excêntrico sobre as adaptações do sistema neuromuscular. Esse aspecto é bem evidenciado no estudo desenvolvido por Rocha et al.³², no qual 12 semanas de treinamento excêntrico isocinético na velocidade angular de $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ promoveu aumento do torque máximo de extensores de joelho somente em testes realizados na velocidade de treinamento e nas duas velocidades adjacentes.

Embora os testes isométricos algumas vezes não representem adequadamente os ganhos de força decorrentes de um período de treinamento, eles são os testes de força que apresentam os mais altos índices de reprodutibilidade¹⁴⁶. Esse tipo de teste foi adotado por 13 estudos^{22,24,32,33,35,37-39,41,45,82,86,89}, de modo que apenas quatro desses estudos^{35,38,39,86} não encontraram alterações significativas na capacidade de produção de força isométrica máxima após o período de treinamento excêntrico. Além disso, resultados de estudos que avaliaram a força isométrica em diferentes ângulos articulares^{37,41} demonstram que o comprimento muscular adotado durante os testes também influencia a magnitude dos ganhos de força. Esses achados podem estar relacionados a alterações no comprimento ótimo de produção de força devido ao treinamento excêntrico^{40,59,72,86}, podendo ser explicados pela adição de sarcômeros em série e conseqüente aumento do comprimento das fibras musculares^{21,43,55,86,147}, aspectos que serão discutidos na sessão “*Adaptações morfológicas*”.

Estudos envolvendo curtos períodos de intervenção demonstraram que os incrementos de força podem ser verificados após 4-6 semanas de treinamento excêntrico^{25,30,33,38-40,45}, embora alguns autores^{31,38} não tenham observado diferenças na força após cinco semanas de treinamento. Evidências adicionais de estudos com intervenções mais prolongadas e apresentando avaliações em

períodos intermediários sugerem que os incrementos de força são significativos após cinco ^{21,35} ou seis ²⁵ semanas de treinamento excêntrico de extensores de joelho. Entretanto, embora o tempo de curso das adaptações neuromusculares ao treinamento de força convencional ², ao treinamento isométrico ¹⁴⁸ e até mesmo à redução de uso ¹⁴⁹ tenha sido investigado, a cronologia das adaptações ao treinamento excêntrico permanece vagamente explorada pela literatura.

Em síntese, os principais achados dos estudos revisados demonstram fortemente que o treinamento excêntrico é um método eficiente para o incremento da força muscular de extensores de joelho em indivíduos saudáveis, tanto realizado em condições isocinéticas quanto isotônicas. O “princípio da especificidade” parece ter influência significativa sobre os ganhos de força muscular, especialmente quando o treinamento é realizado em dinamômetros isocinéticos, de modo que os maiores incrementos de força ocorrem em contrações excêntricas e em velocidades próximas à velocidade utilizada no treinamento. Apesar de não ser um consenso, o incremento de força isométrica parece ser significativo, ao passo que alterações no ângulo ótimo de produção de torque sugerem a influência de fatores neurais e/ou morfológicos não relacionados exclusivamente ao ganho de massa muscular. O tempo necessário para se observar um ganho de força significativo apresenta divergências na literatura, mas a maior parte das evidências suporta efeitos significativos após períodos de 4-6 semanas de treinamento.

Adaptações neurais

As adaptações neurais são normalmente estudadas por meio da técnica de eletromiografia (EMG) de superfície, de modo que os dados apresentados pelos estudos avaliados permitiram a determinação da variação percentual da ativação muscular decorrente do treinamento excêntrico de extensores de joelho em testes excêntricos, isométricos e concêntricos ²²⁻²⁵. A exceção ocorreu em relação ao estudo de Reeves et al. ⁸⁶, que optou por avaliar a capacidade de ativação voluntária da musculatura por meio do cálculo da razão de ativação central, obtido a partir da aplicação de estimulação elétrica neuromuscular sobreposta a uma contração isométrica voluntária máxima.

Apesar do reduzido número de estudos que se propuseram a verificar as adaptações neurais ao treinamento excêntrico, achados de trabalhos envolvendo os músculos extensores de joelho²³⁻²⁵, flexores de cotovelo^{47,81} e flexores plantares⁵⁴ formam um consenso de que o treinamento excêntrico aumenta a capacidade de recrutamento das unidades motoras em testes excêntricos, mas não altera a ativação muscular em testes concêntricos. Esses resultados sugerem que o efeito do "princípio da especificidade", assim como verificado em relação aos incrementos de força, recai sobre as adaptações neurais ao treinamento excêntrico do quadríceps femoral.

Colson et al.⁴², avaliando os músculos flexores de cotovelo, parece ser o único estudo que verificou aumento da atividade EMG em testes concêntricos após um período de treinamento excêntrico. Entretanto, esse comportamento foi observado somente em testes executados em velocidades angulares elevadas ($180^{\circ} \cdot s^{-1}$ e $240^{\circ} \cdot s^{-1}$). Talvez a seletividade de recrutamento em favor das unidades motoras rápidas durante o exercício excêntrico^{98,111} possa estar envolvida nessa ativação muscular aumentada em testes concêntricos realizados em altas velocidades angulares. Porém, o único estudo com treinamento excêntrico que também avaliou a atividade EMG em testes concêntricos realizados em altas velocidades não encontrou alterações⁴⁷, deixando em aberto a possibilidade de o treinamento excêntrico favorecer ou não a ativação muscular em altas velocidades concêntricas.

A reprodutibilidade do sinal EMG em testes isométricos é consideravelmente superior aos testes dinâmicos¹⁵⁰. Os resultados reportados por Hortobagyi et al.²⁵ para os músculos extensores de joelho concordam com achados de estudos envolvendo outros grupos musculares^{47,54} de que a ativação isométrica da musculatura é incrementada pelo treinamento excêntrico. Por outro lado, esses achados recebem o contraponto de estudos que não encontraram efeito do treinamento excêntrico sobre a ativação isométrica do quadríceps femoral²² e do bíceps braquial⁸¹. No entanto, Reeves et al.⁸⁶ utilizaram contrações voluntárias isométricas máximas superimpostas por estimulação elétrica neuromuscular para determinar a capacidade de ativação voluntária máxima do quadríceps femoral,

encontrando incrementos nesse parâmetro e sugerindo que a inibição muscular de idosos pode ser reduzida com treinamento excêntrico.

A ativação antagonista (ou coativação muscular) consiste em um importante fator de proteção e estabilização articular durante contrações vigorosas da musculatura agonista. Entretanto, a força produzida pelos músculos antagonistas durante a contração voluntária dos agonistas reduz o torque final produzido sobre a articulação. Evidências têm demonstrado que programas de treinamento de força são capazes de reduzir significativamente a coativação muscular^{4,5}. Porém, estudos envolvendo treinamento excêntrico não encontraram alterações na coativação após 10-12 semanas de treinamento isocinético de extensores de joelho^{22,25} ou sete semanas de treinamento isotônico de flexores de cotovelo⁴². Após um programa de seis semanas de treinamento excêntrico isotônico de flexores plantares, Pensini et al.⁵⁴ não encontraram mudanças na coativação em testes isométricos, mas observaram redução em testes concêntricos e excêntricos. Assim, a influência do treinamento excêntrico sobre a coativação permanece sem uma resposta clara. As evidências sugerem que os músculos flexores de joelho não reduzem a coativação em resposta ao treinamento excêntrico isocinético de extensores de joelho, porém evidências provenientes de outras musculaturas submetidas a treinamento excêntrico isotônico levantam a possibilidade de redução da ativação antagonista.

A revisão de Guilhem et al.⁹⁶ conclui que as adaptações neurais são mais pronunciadas e contribuem de forma mais significativa para os ganhos de força no treinamento excêntrico realizado em condições isotônicas do que isocinéticas. Na presente revisão, os quatro estudos²²⁻²⁵ que avaliaram as mudanças na ativação muscular de extensores de joelho por meio da técnica de EMG de superfície realizaram o treinamento em condições isocinéticas. Apesar de o estudo de Reeves et al.⁸⁶ ter utilizado equipamentos de musculação no treinamento excêntrico, as adaptações neurais avaliadas por meio da razão de ativação central não permitem uma comparação com os estudos de treinamento excêntrico isocinético do quadríceps²²⁻²⁵. Portanto, para a musculatura extensora de joelho permanece incerto se a realização de exercícios excêntricos em condições isocinéticas ou isotônicas afeta de forma distinta as adaptações neurais ao treinamento.

Em linhas gerais, o treinamento excêntrico parece promover adaptações neurais nos músculos extensores de joelho, o que já foi observado por meio do aumento da atividade elétrica e redução da inibição neural do quadríceps femoral. Embora o incremento da ativação muscular tenha um corpo de evidências suficientemente robusto em relação aos testes excêntricos, ainda há dúvida sobre o aumento da atividade mioelétrica em testes isométricos e concêntricos. Apesar de a redução da coativação ser uma adaptação neural esperada após períodos de treinamento de força, os estudos com treinamento excêntrico do quadríceps femoral não têm demonstrado esse efeito. Além disso, as evidências em relação aos extensores de joelho não permitem concluir se exercícios isocinéticos ou isotônicos promovem respostas mais exacerbadas do ponto de vista neural.

Adaptações morfológicas

Sob uma ótica estrutural, a resposta mais evidente ao treino resistido é o ganho de massa muscular decorrente do aumento do calibre das fibras musculares⁶⁻⁸. No entanto, a presente revisão considerou como adaptação morfológica qualquer alteração estrutural do músculo esquelético em função do treinamento excêntrico. Assim, as técnicas utilizadas pelos estudos para avaliar as adaptações morfológicas variam consideravelmente, incluindo: (1) medidas de circunferência de segmentos corporais²⁰; (2) imagens tomografia computadorizada e ressonância nuclear magnética, as quais permitem a mensuração da área de secção transversa anatômica (ASTA) dos músculos^{21,23,26,35,37}; (3) imagens de ultrassonografia, que permitem a avaliação de diferentes parâmetros de arquitetura muscular, como a espessura muscular, o ângulo de penação e o comprimento dos fascículos, assim como contribuem para a estimativa de parâmetros como o volume e a área de secção transversa fisiológica (ASTF) dos músculos^{21,86,89}; e (4) métodos histoquímicos, usados para avaliação da área das fibras musculares e análise da distribuição entre os tipos de fibras no tecido muscular^{25,35,45}.

A avaliação da ASTA do quadríceps tem sido largamente utilizada para verificar as alterações na massa muscular e explicar os ganhos de força obtidos com o treinamento de força. Entre os estudos analisados na presente revisão, quatro observaram um aumento significativo na ASTA dos extensores de joelho com

programas de 8-12^{21,23,35} e 20³⁷ semanas de treinamento excêntrico em condições isocinéticas e isotônicas, respectivamente. No entanto, Housh et al.²⁶ não encontraram mudanças nesse parâmetro após oito semanas de treinamento excêntrico isotônico, concordando com os achados de um estudo envolvendo flexores plantares⁵⁰.

Os músculos penados, como é o caso do quadríceps femoral, apresentam uma ASTA não representativa do corte perpendicular sobre todas as fibras do músculo, ou seja, a área de secção transversa fisiológica (ASTF). A ASTF é considerada o parâmetro que melhor descreve a capacidade de produção de força máxima do músculo, uma vez que representa o número de sarcômeros alinhados em paralelo¹⁵¹, podendo ser calculada por meio da utilização combinada das técnicas de ressonância magnética e ultrassonografia. A complexa geometria fascicular do quadríceps dificulta a determinação precisa da ASTF desse grupo muscular. Assim, Blazevich et al.²¹ foi único dentre os estudos avaliados que se propôs a examinar a ASTF de uma das porções do quadríceps, encontrando um incremento de 8% da ASTF do VL. Além disso, o estudo de Blazevich et al.²¹ foi pioneiro na avaliação das alterações promovidas pelo treinamento excêntrico sobre o volume muscular dos extensores de joelho, reportando aumentos de cerca 10%.

Incrementos na espessura muscular devido ao treinamento excêntrico já foram verificados nos músculos VL^{21,86,89} e VM²¹, indo ao encontro de evidências levantadas nos músculos flexores de cotovelo^{67,68} e flexores plantares⁴³. Similar ao aumento da espessura, o incremento do ângulo de penação tem geralmente sido utilizado como um marcador da resposta hipertrófica, uma vez que o aumento do ângulo de penação dos fascículos se originaria do aumento do diâmetro das fibras musculares^{152,153}. Esse tipo de alteração foi observado após um período de 10 semanas de treinamento excêntrico isocinético no músculo VL de sujeitos jovens²¹, mas não no VM desses indivíduos. Em idosos, 14-16 semanas de treinamento excêntrico isotônico não alteraram o ângulo de penação do VL^{86,89}. Por outro lado, estudos envolvendo treinamento excêntrico de flexores plantares⁴³ e flexores de joelho⁵⁵ já reportaram incrementos do ângulo de penação, o que poderia ser explicado pelo aumento da área das fibras musculares verificada após programas de treinamento excêntrico^{25,45,57}.

As evidências obtidas por meio dos diferentes métodos de avaliação fornecem uma base de sustentação suficientemente robusta para afirmar que o treinamento excêntrico é eficiente na promoção do ganho de massa muscular. O aumento do diâmetro das fibras musculares é mediado pelo incremento do calibre das miofibrilas, que ocorre pela adição de filamentos finos e grossos à periferia de cada miofibrila, e pelo incremento do número de miofibrilas, que ocorre quando o material contrátil é abundante e a miofibrila se divide em duas ou mais “miofibrilas-filhas”⁶. Independente do tipo de treinamento, o processo de adição de material contrátil subsequente ao exercício parece ser mediado pelas células-satélite musculares, que são ativadas a partir do dano estrutural às proteínas contráteis do sarcômero¹⁵⁴. Uma vez que o exercício excêntrico pode promover significativos níveis de dano muscular¹⁵⁵ e uma elevada sobrecarga mecânica¹⁸ sobre a musculatura, é de se esperar uma resposta hipertrófica significativa com este tipo de treinamento⁸.

Além da adição de sarcômeros em paralelo, um aspecto atrativo do treinamento excêntrico se encontra na possibilidade de promover a adição de sarcômeros em série das fibras musculares. Esse aumento de sarcômeros no sentido longitudinal tem sido relacionado ao aumento no comprimento de fascículo mensurado por meio de imagens de ultrassonografia. Embora, Raj et al.⁸⁹ não tenham encontrado aumento no comprimento de fascículo do VL de idosos treinados excêntricamente por 16 semanas, essa adaptação morfológica foi observada em estudos com humanos envolvendo o músculo VL^{21,86}, além de flexores de joelho⁵⁵ e flexores plantares⁴³. Além disso, essa resposta ao treinamento excêntrico é corroborada por evidências em modelos animais, onde um programa de exercícios em esteira declinada incrementou o número de sarcômeros em série de músculos extensores de joelho de ratos¹⁴⁷. Na mesma direção, existem estudos mostrando que o ganho de sarcômeros em série ocorre em resposta a uma única sessão de exercício excêntrico em humanos^{156,157}. Essa resposta aguda estaria relacionada ao mecanismo protetor contra o dano muscular provocado por uma sessão subsequente de exercício excêntrico (“*repeated bout effect*”)¹¹¹, uma vez que evitaria ou minimizaria o alongamento excessivo dos sarcômeros durante as contrações excêntricas realizadas na segunda sessão.

Esse tipo de adaptação possui uma interessante aplicabilidade clínica, uma vez que músculos com fibras mais longas permitem uma maior amplitude de movimento, alteram o comprimento ótimo de produção de força e possibilitam que maiores quantidades de força sejam gerados em contrações concêntricas realizadas em velocidades elevadas ^{151,152}. Assim, o aumento de sarcômeros em série talvez possa ser a chave para explicar os resultados de alguns trabalhos envolvendo treinamento excêntrico que encontraram aumento de torque concêntrico somente em altas velocidades angulares ^{53,86}, assim como aumento da potência muscular ⁸¹ e da velocidade máxima de contração muscular ⁷⁸.

Alterações no percentual de fibras musculares rápidas e lentas são esperadas após um período considerável de treinamento de força convencional, especialmente o incremento relativo das fibras do tipo IIa com um paralelo declínio do percentual de fibras IIb ⁶. Essa expectativa parece ser corroborada pelas evidências de que quatro semanas de treinamento excêntrico foram insuficientes para promover alterações na distribuição dos tipos de fibras do VL ³¹, enquanto um período de 12 semanas proporcionou o aumento do percentual de fibras IIa acompanhado pela redução das fibras IIb ²⁵. No entanto, Seger et al. ³⁵ encontraram uma redução percentual de fibras IIa no VL após o treinamento excêntrico. Ainda, estudos envolvendo os músculos flexores de cotovelo podem ser encontrados reportando aumento ⁵³ ou redução ⁵⁷ do percentual de fibras IIb. Desse modo, devido à grande variabilidade dos resultados encontrados, o efeito do treinamento excêntrico sobre a distribuição dos tipos de fibras nos músculos extensores de joelho permanece em debate.

A resposta de cada um dos músculos extensores de joelho permanece incerta em relação às alterações em ASTA, ASTF, volume, espessura, ângulo de penetração, comprimento de fascículo e tipos de fibras devido à escassez de estudos e o fato de somente os músculos VL e VM terem sido analisados. Alguns estudos demonstraram que os músculos sinergistas do quadríceps apresentam diferentes magnitudes de resposta hipertrófica ²¹, assim como um mesmo músculo demonstra adaptação distinta entre as suas porções proximais e distais ^{21,35}. Apesar da importância clínica do incremento no comprimento das fibras musculares, não foram encontrados estudos que avaliassem se outros músculos além do VL respondem ao treinamento excêntrico com alterações no comprimento dos fascículos. A adaptação

específica na estrutura dos quatro músculos que compõem o compartimento extensor de joelho representa uma das lacunas do conhecimento em relação aos efeitos do treinamento excêntrico.

Em suma, achados provenientes de diferentes técnicas de análise sugerem que o treinamento excêntrico é capaz de promover o ganho de massa muscular em virtude do aumento na área das fibras musculares (adição de sarcômeros em paralelo), principalmente nas fibras de contração rápida. Evidências em animais e humanos também reforçam a premissa de que o treinamento excêntrico seja capaz de promover a adição de sarcômeros em série, conduzindo a fibras musculares mais longas, o que possui influência direta sobre a funcionalidade muscular e pode ter efeitos clínicos benéficos para diferentes populações. Alterações na distribuição dos tipos de fibra na musculatura foram encontradas, mas os resultados conflitantes impedem uma definição do tipo de adaptação promovida pelo treinamento excêntrico de extensores de joelho. Por fim, as mudanças estruturais específicas de cada uma das porções do quadríceps femoral seguem sem definições na literatura.

Treinamento excêntrico Vs. Treinamento concêntrico

Dezesseis estudos ^{20-25,28,29,31,35-37,39,40,45,82} compararam as adaptações promovidas por programas de treinamento excêntrico com as adaptações ao treinamento concêntrico de extensores de joelho. A análise dos resultados reportados por esses estudos demonstra um claro efeito do “princípio da especificidade”, de modo que os grupos treinados excêntricamente obtiveram maior ganho de força excêntrica e os grupos treinados concêntricamente apresentaram maior ganho de força concêntrica. Conclusão semelhante foi verificada pela meta-análise desenvolvida por Roig et al. ¹²⁷, que avaliou estudos com treinamento excêntrico e concêntrico de diferentes grupos musculares. Porém, o estudo de meta-análise supracitado acrescenta que o incremento de força geral (ou seja, somando os ganhos isométricos, concêntricos e excêntricos) se mostra superior nos sujeitos submetidos ao treinamento excêntrico.

Apesar de um único estudo ²² não ter encontrado evidências de adaptação neural após 10 semanas de treinamento excêntrico ou concêntrico, a maior parte das evidências demonstra que ambos os tipos de treinamento incrementam a

capacidade de ativação muscular ²³⁻²⁵. A especificidade das adaptações neurais relacionadas ao tipo de contração utilizada no programa de treinamento é bem representada pelos estudos de Hortobágyi et al. ^{24,25}. Em um desses estudos ²⁴, o grupo treinado excêntrica obtve aumento da atividade EMG somente nos testes excêntricos, enquanto o grupo de treinamento concêntrico incrementou o nível de ativação muscular somente nos testes concêntricos. No outro estudo ²⁵, foi verificado aumento do sinal EMG em testes isométricos e excêntricos nos sujeitos treinados excêntrica, ao passo que incrementos foram observados em testes isométricos e concêntricos nos indivíduos treinados concentricamente.

Do ponto de vista morfológico, o estudo de revisão realizado por Wernbom et al. ⁷ sugere que o tipo de contração não se constitui em um fator decisivo sobre a magnitude da resposta hipertrófica ao treinamento, na medida em que o volume e a intensidade parecem ser fatores primordiais para o ganho de massa muscular. Essa premissa pode ser fundamentada pelo estudo de Blazevich et al. ²¹, que utilizou diversos parâmetros para verificar a adaptação morfológica de extensores de joelho e não encontrou diferenças entre os programas de treinamento excêntrico e concêntrico, assim como outros trabalhos envolvendo treinamento excêntrico e concêntrico do quadríceps ^{29,37}. No entanto, evidências levantadas por outros estudos avaliados na presente revisão ^{23,25,35} e corroboradas pelos resultados da meta-análise de Roig et al. ¹²⁷ sugerem que o treinamento excêntrico é capaz de promover ganhos de massa muscular superiores àqueles obtidos com o treinamento concêntrico, o que pode estar relacionado ao maior nível de dano muscular ¹⁵⁵ e/ou maior sobrecarga mecânica ¹⁸ imposta pelo exercício excêntrico comparado ao concêntrico. Além disso, um único estudo ²¹ analisou as adaptações no comprimento de fascículo geradas pelo treinamento excêntrico e concêntrico de extensores de joelho, não encontrando efeito do tipo de treinamento sobre o incremento do comprimento fascicular do VL. No entanto, evidências em modelo animal sugerem que o aumento no número de sarcômeros em série ocorra de forma mais expressiva em resposta ao exercício com contrações excêntricas do que concêntricas ^{157,158}.

Com base nas informações levantadas junto ao expressivo número de artigos comparando os treinamentos excêntrico e concêntrico de extensores de joelho ^{20-25,28,29,31,35-37,39,40,45,82}, fica evidente o efeito da especificidade sobre os ganhos de

força e aumento da ativação muscular. As evidências apontam para um incremento de conteúdo muscular (em série e em paralelo) em favor do treinamento excêntrico. No entanto, a adaptação no comprimento de fascículos dos músculos extensores de joelho em função de ambos os tipos de treinamento necessita de mais investigações.

Treinamento excêntrico Vs. Treino de força convencional

A presente revisão encontrou apenas três estudos ^{20,86,89} com a proposta de comparar as adaptações provenientes de programas de treinamento excêntrico e treinamento de força convencional. Em relação às adaptações na força muscular, Ben-Sira et al. ²⁰ não encontraram diferenças entre os dois métodos de treinamento por meio do teste de 1-RM. O desenho experimental do estudo de Raj et al. ⁸⁹ buscou equilibrar o trabalho realizado entre os grupos de treinamento excêntrico e treino de força convencional. Os autores observaram incrementos de força similar entre os grupos no teste de 1-RM, acompanhados por uma discreta superioridade do grupo de treinamento excêntrico nos testes isométricos e isocinéticos. Por outro lado, os achados de Reeves et al. ⁸⁶ reforçam o efeito da especificidade nos ganhos de força, uma vez que os sujeitos treinados excêntricamente obtiveram incrementos de força em testes excêntricos, enquanto os voluntários submetidos ao treino de força convencional apresentaram ganhos nos testes isométricos e concêntricos.

Reeves et al. ⁸⁶ utilizaram a medida da razão de ativação central e encontraram níveis semelhantes de incremento na capacidade de ativação voluntária dos extensores de joelho em idosos submetidos ao treinamento excêntrico e treinamento de força convencional. De acordo com as buscas realizadas pelo presente estudo revisão, o estudo de supramencionado ⁸⁶ parece ser o único a comparar as adaptações neurais promovidas pelo treinamento excêntrico e treinamento de força convencional, o que limita as conclusões acerca de qual dos dois métodos é responsável por adaptações mais significativas sobre a ativação muscular. Além disso, uma vez que o método utilizado pelo estudo de Reeves et al. ⁸⁶ utiliza contrações isométricas, não é evidenciado o esperado efeito da especificidade do treinamento sobre as adaptações neurais geradas pelos exercícios excêntricos e convencionais.

A avaliação das adaptações morfológicas foi realizada por meio de medidas da circunferência dos segmentos no estudo de Ben-Sira et al. ²⁰, não encontrando alterações significativas para nenhum dos métodos de treinamento implementados. Reeves et al. ⁸⁶, por meio da avaliação de ultrassonografia do VL, encontrou incrementos similares na espessura muscular de idosos submetidos ao treinamento excêntrico e treino de força convencional. Interessantemente, esse incremento da espessura ocorreu por mecanismos distintos entre os dois grupos: o grupo de treinamento excêntrico apresentou incremento do comprimento dos fascículos; enquanto o grupo de treinamento de força convencional apresentou aumento do ângulo de penação. Em outro estudo conduzido com idosos, Raj et al. ⁸⁹ encontraram aumento na espessura do VL do grupo treinado excentricamente, mas não do grupo submetido ao treinamento de força convencional. Além disso, não foram encontradas alterações significativas no comprimento ou no ângulo de penação dos fascículos em ambos os grupos treinados.

O reduzido número de estudos e os resultados contraditórios não permitem que conclusões sejam feitas com respeito às diferentes adaptações morfológicas promovidas entre o treinamento excêntrico e o treinamento de força convencional. Entretanto, estudos da década de 1990 ¹⁵⁹⁻¹⁶¹ observaram adaptações mais exacerbadas com o treino de força convencional em comparação ao treinamento concêntrico. Além disso, estudos mais recentes ^{64,84} encontraram respostas mais significativas ao treinamento utilizando equipamentos gravidade-independentes conhecidos como “*flywheel ergometers*”, os quais utilizam a energia inercial acumulada no sistema durante a fase concêntrica para impor uma maior sobrecarga mecânica durante a fase excêntrica do exercício. Agrupadas, essas evidências enfatizam a importância do componente excêntrico para as adaptações neuromusculares ao treinamento de força. No entanto, até o presente momento, a literatura apresenta uma clara lacuna em relação à comparação entre treinamento excêntrico e treino de força convencional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão apresenta e discute uma série de particularidades em relação ao treinamento excêntrico executado em condições isocinéticas e isotônicas com o intuito de auxiliar os pesquisadores e profissionais de saúde no planejamento, prescrição e monitoramento dos programas de treinamento excêntrico para os músculos extensores de joelho. Os diferentes métodos utilizados entre os estudos, tanto em termos de treinamento quanto de recursos de avaliação, talvez possam justificar a variabilidade dos resultados observados.

Os dados aqui apresentados permitem concluir que o treinamento excêntrico do quadríceps conduz a significativos ganhos de força muscular, principalmente durante ações excêntricas. Essa especificidade dos ganhos de força é também observada nas adaptações neurais, possivelmente devido ao efeito de aprendizagem motora associado ao exercício excêntrico. Além disso, o treinamento excêntrico parece induzir a uma considerável resposta hipertrófica, possivelmente associada ao aumento do comprimento das fibras musculares.

A literatura fornece um corpo de evidências considerável acerca da superioridade do treinamento excêntrico sobre o treinamento concêntrico em termos de adaptação na força e massa muscular. Entretanto, do ponto de vista neural, o treinamento exclusivamente excêntrico ou concêntrico parece gerar respostas específicas ao tipo de contração utilizada no programa de exercícios. Comparações entre o treinamento excêntrico e o treino de força convencional são dificultadas pelo escasso número de estudos encontrados na literatura, de modo que conclusões somente serão possíveis após a realização de mais estudos com desenho experimental adequado.

Por fim, os resultados reportados por essa revisão sugerem que os ganhos de força obtidos com o treinamento excêntrico de extensores de joelho ocorrem tanto por fatores neurais quanto morfológicos. Infelizmente, os estudos desenvolvidos até o momento não permitem que se determine a cronologia dessas adaptações e suas contribuições para os ganhos de força ao longo do período de treinamento. Além disso, uma vez que os cientistas têm concentrado suas atenções sobre o músculo VL, adaptações específicas no arranjo estrutural das diferentes partes do músculo

quadríceps femoral permanecem obscuras. Desse modo, essas lacunas identificadas na literatura devem ser enfatizadas por estudos futuros com intuito de aprofundar o conhecimento relacionado ao tema e possibilitar que os profissionais de saúde façam uso desse método com um nível cada vez maior de segurança e de otimização dos resultados almejados.

CAPÍTULO II

Cronologia das Adaptações Neuromusculares de Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi investigar a cronologia das adaptações neurais e morfológicas ao treinamento excêntrico de extensores de joelho e sua contribuição para os ganhos de força em ações isométricas, concêntricas e excêntricas. Vinte homens saudáveis realizaram um período controle de quatro semanas sem treinamento, seguido por um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético. Avaliações de torque, eletromiográfica e de ultrassonografia de extensores de joelho foram realizadas a cada quatro semanas. Não foram observadas alterações significativas das variáveis analisadas após o período controle e os valores atingiram níveis satisfatórios de reprodutibilidade. Os valores de torque em testes excêntricos e isométricos incrementaram após quatro, oito e 12 semanas de treinamento, enquanto o torque concêntrico aumentou somente até a oitava semana de treinamento. A ativação muscular nos testes excêntricos e isométricos aumentou após quatro e oito semanas de treinamento, respectivamente, ao passo que os testes concêntricos não apresentaram alterações na atividade eletromiográfica. Os valores de espessura muscular e de área de secção transversa anatômica aumentaram após quatro e oito semanas de treinamento, mas não se modificaram da oitava para 12ª semana de treinamento. Esses resultados sugerem que (1) o percentual de aumento de força concêntrica foi menor que o ganho isométrico/excêntrico e não está relacionado a adaptações neurais; e (2) os ganhos de força excêntrica e isométrica até a oitava semana de treinamento podem ser explicados pelas adaptações neurais e morfológicas, enquanto os ganhos observados nas últimas quatro semanas de treinamento parecem estar associados a outros mecanismos.

INTRODUÇÃO

O treinamento de força é caracterizado pela execução de exercícios voluntários contra uma carga ou resistência externa, sendo considerado o método mais eficiente para obtenção de ganhos de força muscular ^{1,19}. Enquanto o incremento de força nas primeiras semanas de treinamento é principalmente atribuído ao aumento da capacidade de ativação das unidades motoras (adaptação neural), o aumento da massa muscular (adaptação morfológica) é comumente associado aos ganhos de força após 6-8 semanas de treinamento ^{5,7,162}. Essas adaptações neuromusculares são influenciadas por diversos fatores, como características dos sujeitos (por exemplo, sexo, idade e nível de condicionamento físico), grupo muscular treinado, velocidade e amplitude articular de execução dos movimentos, tipo de exercício e periodização do treinamento (período de treinamento, frequência semanal, volume e intensidade dos exercícios) ^{1,19}.

Embora o treino de força convencional envolva exercícios com as fases concêntrica e excêntrica de ação muscular, um número expressivo de ensaios clínicos têm focado suas atenções sobre os efeitos crônicos do treinamento excêntrico em sujeitos saudáveis ^{21-25,29,32,35,37,39,43,45,57}, praticantes de treinamento de força ^{69,78} e atletas de diferentes esportes e níveis competitivos ^{75,76}. Adicionalmente, o treinamento excêntrico tem sido proposto para a população idosa ^{82,83,86,89} com intuito de combater os efeitos deletérios do envelhecimento sobre o sistema neuromuscular ^{90,91}, além de ser largamente utilizado em programas de reabilitação musculoesquelética ^{94,163,164}.

Os extensores de joelho se apresentam como o grupo muscular mais frequentemente investigado na literatura, de modo os autores normalmente desenvolvem os programas de treinamento excêntrico em dinamômetros isocinéticos ^{21-25,29,32,35,45,82,83} ou equipamentos de musculação ^{37,39,86,89}. Embora a maioria dos estudos tenha reportado aumentos significativos de força em testes realizados excentricamente ^{21,23-25,29,32,35,39,82,83,86}, incrementos de força concêntrica foram observados em alguns ^{21,23,29,82}, mas não em outros estudos ^{24,25,32,35,86,89}. O mesmo conflito de resultados pode ser observado em relação aos aumentos de força em contrações isométricas ^{22,24,32,35,37,39,45,82,86}. Além disso, existe uma lacuna

do conhecimento relacionada ao comportamento temporal das alterações na força e à contribuição relativa de fatores neurais e morfológicos para essas alterações ao longo de um programa de treinamento excêntrico.

A maioria dos estudos que avaliou as adaptações neurais ao treinamento excêntrico focou somente os músculos mono-articulares de extensão de joelho²³⁻²⁵. As evidências sugerem de forma consensual que ocorram incrementos da ativação de unidades motoras em testes excêntricos, mas não em testes concêntricos²³⁻²⁵. Por outro lado, adaptações neurais em testes isométricos após programas de treinamento excêntrico apresentaram resultados inconsistentes^{22,25}. Além disso, apesar de existir um número limitado de evidências que indique o aumento da capacidade de ativação muscular em curtos períodos de treinamento excêntrico (ou seja, seis semanas)^{24,25}, contribuindo para os ganhos de força nas primeiras semanas de intervenção, a cronologia das adaptações neurais ao treinamento excêntrico segue como uma questão em aberto.

O curso das adaptações morfológicas ao treinamento excêntrico de extensores de joelho também se apresenta como uma clara lacuna da literatura. Aumentos significativos da área de secção transversa anatômica (ASTA) do quadríceps foram observados após 8-10^{21,23,35} e 20³⁷ semanas de treinamento excêntrico, mas não há evidência de incrementos da ASTA em períodos mais curtos de treinamento. Estudos utilizando imagens ultrassonográficas também apresentaram incrementos na espessura do vasto lateral (VL) após 10²¹ e 14-16^{86,89} semanas de treinamento excêntrico em jovens e idosos, respectivamente. No entanto, de acordo com o nosso conhecimento, um único estudo avaliou a espessura do músculo VL em um período mais curto de treinamento excêntrico e encontrou incremento significativo após cinco semanas de treinamento²¹.

Os resultados conflitantes na literatura e a carência de informações acerca do comportamento temporal das adaptações neuromusculares ao treinamento excêntrico necessitam ser esclarecidas, assim como já realizado em relação ao treino de força convencional², treinamento isométrico¹⁴⁸ e redução de uso¹⁴⁹. Assim, o objetivo do presente estudo foi verificar a cronologia das adaptações neurais e morfológicas ao treinamento excêntrico de extensores de joelho e a sua contribuição para os ganhos de força em ações isométricas, concêntricas e

excêntricas ao longo de um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético.

MÉTODOS

Desenho experimental

O presente estudo se caracteriza como um ensaio clínico longitudinal e foi conduzido de acordo com as disposições da Declaração de Helsinki após aprovação pelo comitê de ética em pesquisa institucional. Com o objetivo de verificar o comportamento temporal das adaptações neuromusculares ao treinamento excêntrico, os voluntários foram avaliados cinco vezes durante os quatro meses de duração do estudo. Cada sessão de avaliação compreendeu o exame da massa muscular do quadríceps femoral, assim como o torque e a atividade elétrica dos extensores de joelho durante testes de contração máxima isométrica, concêntrica e excêntrica. Um período controle de quatro semanas foi respeitado entre a primeira (Basal) e a segunda (Pré-treino) avaliações, durante o qual os sujeitos foram instruídos a não realizar qualquer tipo de atividade física sistemática. Após a segunda avaliação, os sujeitos iniciaram o programa de 12 semanas de treinamento excêntrico de extensores de joelho em dinamômetro isocinético. Avaliações subsequentes foram realizadas após quatro (Pós-4), oito (Pós-8) e 12 (Pós-12) semanas de treinamento (Figura 1).

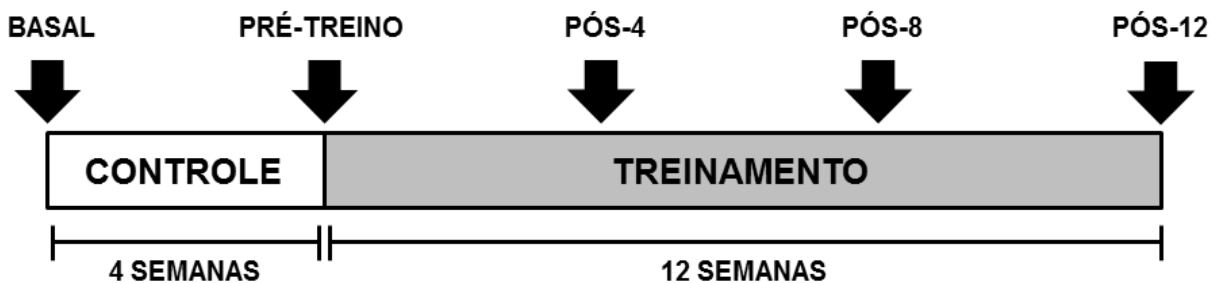


Figura 1. Desenho experimental do estudo: cinco avaliações neuromusculares de extensores de joelho (indicado pelas setas); um período controle de quatro semanas; e um período de 12 semanas de treinamento excêntrico.

Sujeitos

Indivíduos do sexo masculino com idades entre 20 e 35 anos foram convidados a participar do presente estudo. Todos os voluntários eram estudantes universitários fisicamente ativos e não envolvidos em qualquer tipo de programa de treinamento de força para membros inferiores nos seis meses prévios ao início do estudo. Os seguintes critérios de exclusão foram adotados: (1) histórico de lesões musculoesqueléticas em membros inferiores que representassem uma contraindicação a execução de exercícios máximos ou que pudessem interferir no desempenho durante as sessões de treinamento e avaliação (por exemplo, tendinopatia patelar, síndrome fêmoro-patelar, procedimento cirúrgico de joelho, rupturas de ligamentos submetidos ou não a procedimento cirúrgico, casos recentes de lesão muscular ou entorse articular); (2) condições respiratórias ou cardiovasculares consideradas um fator de risco ou limitante à execução de exercícios máximos; e (3) usuários de suplementos alimentares ou esteroides anabólicos.

Os sujeitos foram informados acerca dos objetivos e procedimentos envolvidos no estudo, de modo que todos concordaram em participar voluntariamente por meio de um termo de consentimento informado. Vinte voluntários (idade: $24,05 \pm 3,73$ anos; estatura: $1,75 \pm 0,06$ m; massa corporal: $73,95 \pm 6,99$ kg) completaram o programa de treinamento e avaliações. A massa corporal foi avaliada ao longo do estudo e não apresentou alterações significativas.

Avaliação da força muscular

O pico de torque de extensão de joelho em testes isométricos, concêntricos e excêntricos foi mensurado por meio do dinamômetro isocinético Biodex System 3 (*Biodex Medical System*, EUA) com intuito de verificar as adaptações na força do músculo quadríceps femoral em função do treinamento excêntrico. Após exercício de aquecimento realizado por cinco minutos em cicloergômetro, os voluntários foram posicionados no equipamento de dinamometria de acordo com as recomendações do fabricante para avaliação do joelho. A articulação do quadril foi fixada em um ângulo de 85° e as regiões do tronco, pelve e coxa firmemente afixados ao equipamento por meio de cintas e faixas de velcro. Os sujeitos realizaram um

protocolo adicional de aquecimento no dinamômetro constituído de 10 repetições de flexão/extensão de joelho em uma velocidade de $90^{\circ}\cdot s^{-1}$ com um nível submáximo de esforço. Antes dos testes máximos, os sujeitos foram instruídos a executar os testes com intensidade máxima no desenvolvimento da extensão de joelho da forma mais forte e rápida possível.

A avaliação do torque isométrico compreendeu três contrações máximas de extensores de joelho na posição articular de 60° de flexão de joelho (0° = extensão total). Cada contração isométrica teve duração de cinco segundos e um período de repouso de dois minutos foi respeitado entre os testes. O valor de pico de torque de cada contração foi checado durante a coleta de dados e um teste isométrico máximo adicional foi realizado quando a variação entre os valores obtidos nos três primeiros testes foi maior do que 10%.

A avaliação do torque concêntrico compreendeu três contrações concêntricas máximas de extensores de joelho, realizadas de forma consecutiva com uma velocidade angular de $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ e amplitude de movimento entre 90° e 10° de flexão de joelho. Os sujeitos foram instruídos a realizar máximo esforço durante o movimento de extensão do joelho e retornar passivamente à posição inicial de teste (ângulo articular de 90°) durante a fase de flexão de joelho. O teste foi repetido duas vezes com um intervalo de dois minutos de repouso entre os testes.

O torque excêntrico foi mensurado por meio de três contrações excêntricas máximas, realizadas de forma consecutiva com velocidade angular de $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ e amplitude de movimento entre 30° e 90° de flexão de joelho. Os sujeitos realizaram passivamente a extensão de joelho com auxílio do pesquisador e iniciaram a contração ativa dos músculos extensores de joelho assim que o segmento atingisse a posição de 30° de flexão de joelho, de forma que o dinamômetro respondia ao torque de extensão do sujeito movimentando o segmento novamente até a posição de 90° de flexão de joelho. Foram realizados dois testes e observado um período de intervalo de dois minutos entre os testes.

Estímulo verbal foi emitido pelos pesquisadores de forma padronizada durante a execução de todos os testes de força. Os mais altos valores de pico de torque, respectivamente obtidos nos testes com contrações isométricas (PT_{iso}), concêntricas (PT_{con}) e excêntricas (PT_{ecc}), foram utilizados na análise estatística.

Avaliação da ativação muscular

Um sistema de eletromiografia (EMG) de oito canais AMT-8 (*Bortec Biomedical Ltd.*, Canadá), conectado a um sistema de aquisição de dados Windaq (*Dataq Instruments Inc.*, USA), foi sincronizado com o dinamômetro isocinético e utilizado na avaliação da atividade elétrica dos músculos reto femoral (RF), vasto lateral (VL) e vasto medial (VM) durante testes máximos de extensão do joelho com contrações isométricas, concêntricas e excêntricas (Figura 2).

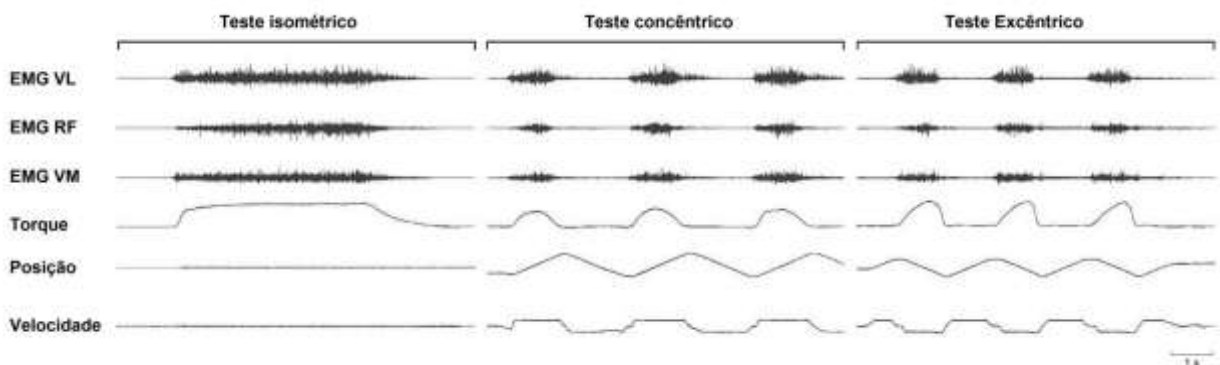


Figura 2. Sinal EMG dos músculos vasto lateral (VL), reto femoral (RF) e vasto medial (VM), sincronizado com dados de torque, posição articular e velocidade angular de movimento durante testes isométricos, concêntricos e excêntricos de um sujeito representativo da amostra.

A preparação da pele e o posicionamento dos eletrodos para avaliação EMG seguiram as recomendações da *Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles* (SENIAM) ¹⁶⁵. Eletrodos Meditrace 100 (*Kendall*, EUA) foram posicionados em configuração bipolar com distância inter-eletrodo de 2,2 cm sobre a superfície da pele que recobre os músculos RF (50% da linha entre a espinha ilíaca ântero-superior e a borda superior da patela), VL (2/3 da linha entre a espinha ilíaca ântero-superior e a borda superior da patela) e VM (80% da linha entre a espinha ilíaca ântero-superior e o espaço articular em frente à borda anterior do ligamento medial). Foram confeccionados mapas em folha maleável e transparente contendo pontos anatômicos de referência (por exemplo, borda superior da patela) e marcas da pele dos sujeitos (por exemplo, manchas, pintas e

cicatrizes), assim como os locais específicos de posicionamento dos eletrodos com intuito de garantir que o sinal EMG fosse coletado exatamente nos mesmos pontos ao longo das cinco avaliações previstas ¹⁶⁶. Um eletrodo de referência foi colocado na face medial da tíbia.

Os sinais brutos de EMG foram digitalizados com uma frequência amostral de 2000 Hz por canal por meio de uma placa analógico-digital DI-720 de 16 bits de resolução (*Dataq Instruments Inc.*, EUA) e armazenados para posterior análise. Os dados foram exportados para o *software* SAD32, onde foi utilizado um filtro passa-banda do tipo *Butterworth*, com uma frequência de corte de 20 e 500 Hz. Um segmento de sinal EMG com 1 segundo de duração e sincronizado com o pico de torque do teste foi utilizado na análise de dados por meio do cálculo do valor *root mean square* (RMS). O somatório dos valores RMS dos músculos RF, VL e VM nos testes com contrações isométricas ($\Sigma\text{EMG}_{\text{iso}}$), concêntricas ($\Sigma\text{EMG}_{\text{con}}$) e excêntricas ($\Sigma\text{EMG}_{\text{exc}}$) foi utilizado na análise estatística com intuito de representar a adaptação neural de uma grande porção do músculo quadríceps femoral ²³.

Avaliação da massa muscular

Imagens dos músculos extensores de joelho foram obtidas por meio de um sistema de ultrassonografia Aloka SSD-4000 (*Aloka Inc.*, Japão), em conjunto com uma sonda de arranjo linear de 60 mm (7,5 MHz) de mesma marca e procedência, a fim de determinar as respostas morfológicas do quadríceps femoral ao treinamento excêntrico. O somatório dos valores de espessura muscular (ΣEM) dos músculos RF, VL e VM (os mesmos músculos utilizados na avaliação do sinal EMG) foi considerado como representativo da massa muscular do quadríceps femoral ¹⁶⁶. O mesmo equipamento de ultrassonografia foi usado na mensuração da área de secção transversa anatômica do músculo RF (ASTA_{rf}), uma técnica com alta correlação com as mensurações executadas por meio de imagens de ressonância magnética ¹⁶⁷. Esses dois parâmetros (ΣEM e ASTA_{rf}) foram utilizados para avaliar as adaptações morfológicas dos extensores de joelho ao treinamento excêntrico.

Os sujeitos foram avaliados em posição supina com suas pernas totalmente estendidas e seus músculos relaxados ²¹. Um período de 10 minutos de repouso foi respeitado antes das avaliações e os voluntários foram instruídos a não realizar

qualquer tipo de atividade física vigorosa nas 48 horas prévias aos dias de avaliação. Muita atenção foi dispendida na determinação dos locais específicos em que as imagens foram coletadas. Pontos anatômicos de referência (por exemplo, borda superior da patela) e marcas da pele dos sujeitos (por exemplo, manchas, pintas e cicatrizes), assim como os locais específicos de posicionamento da sonda ultrassonográfica sobre cada músculo, foram mapeados em uma folha maleável e transparente com intuito de garantir que as imagens de ultrassonografia fossem coletadas exatamente nos mesmos pontos ao longo das cinco avaliações previstas^{21,89,168,169}. Um pesquisador com larga experiência com a técnica de ultrassonografia conduziu todas as avaliações ao longo do estudo.

Três imagens foram coletadas com a sonda posicionada longitudinalmente às fibras musculares de cada músculo extensor de joelho (Figura 3). O ponto médio entre o trocanter maior e o côndilo lateral do fêmur foi utilizado como referência para as avaliações dos músculos RF e VL, enquanto as medidas do VM foram realizadas a 25-30% dessa distância de acordo com as características anatômicas de cada sujeito. Essas imagens de ultrassonografia foram utilizadas para análise da espessura muscular. Adicionalmente, três imagens transversais ao sentido das fibras musculares do RF foram coletadas a 50% da distância entre o trocanter maior e côndilo lateral do fêmur para análise da $ASTA_{rf}$ (Figura 3). Em todos os locais de avaliação, a superfície da sonda de ultrassonografia foi coberta com gel transmissor solúvel em água, o que promove contato acústico da sonda com a pele, evitando o contato direto entre as duas e a possível deformação de tecidos biológicos em função da pressão exercida pela sonda.

Todas as imagens de ultrassonografia foram analisadas por um mesmo investigador por meio do *software* Image-J (*National Institute of Health*, EUA). A distância entre as aponeuroses superficial e profunda foi mensurada em cinco pontos ao longo de cada imagem longitudinal (Figuras 3-A, 3-B e 3-C), de modo que o valor médio entre essas cinco medidas foi considerado a espessura muscular da imagem. O valor médio obtido entre as três imagens ultrassonográficas de cada músculo foi considerado a espessura muscular final do RF, VL e VM, respectivamente. Um procedimento semelhante foi utilizado na determinação da $ASTA_{rf}$. Cinco medidas da área do RF foram realizadas em cada imagem transversal

de ultrassonografia (Figura 3-D) e a média dos valores obtidos entre as três imagens foi considerada a $ASTA_{rf}$ do sujeito.

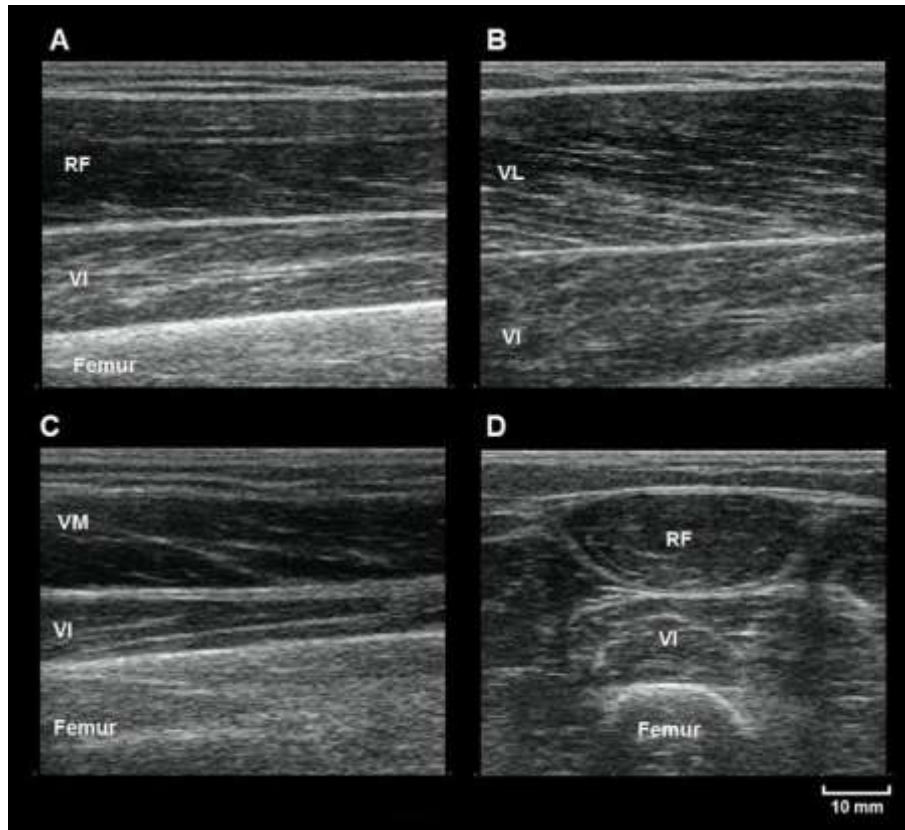


Figura 3. Imagens de ultrassonografia de um sujeito representativo da amostra utilizadas para análise de: [A] espessura muscular do reto femoral (RF); [B] espessura muscular do vasto lateral (VL); [C] espessura muscular do vasto medial (VM); e [D] área de secção transversa anatômica do RF.

Programa de treinamento excêntrico

Os voluntários foram engajados em um programa de intervenção composto por 12 semanas de treinamento excêntrico dos músculos extensores de joelho. As sessões de treinamento foram realizadas no mesmo equipamento de dinamometria isocinética utilizado nas avaliações neuromusculares, duas vezes por semana, com um intervalo mínimo de 72 horas entre as sessões. Cada sessão de treino compreendeu um protocolo de aquecimento em cicloergômetro com duração de cinco minutos, seguido por 3-5 séries de 10 contrações excêntricas máximas com intervalo de um minuto sendo respeitado entre as séries. O programa de treinamento

foi dividido em três mesociclos, de modo que o volume (número de séries x número de repetições por série) foi incrementado gradualmente pelo aumento no número de séries realizadas em cada sessão de treino. Os sujeitos realizaram três séries nas semanas 1-4, quatro séries nas semanas 5-8 e cinco séries nas semanas 9-12. Na primeira semana de treinamento, os sujeitos realizaram apenas uma sessão de treino com intuito de evitar a realização da segunda sessão na presença dos efeitos deletérios do dano muscular induzido pelo exercício excêntrico^{106,170}. As semanas de avaliação ao longo do programa de treinamento excêntrico (semanas 5 e 9) coincidiam com a progressão de mesociclo e consequente aumento do volume de treino, de modo que apenas uma sessão de treino foi realizada nessas semanas. A periodização do treinamento excêntrico pode ser visualizada na Tabela 4.

As contrações excêntricas foram executadas de acordo com o protocolo descrito por Baroni et al.¹⁷¹. Antes de cada contração excêntrica, o membro inferior dos voluntários foi passivamente estendido até a posição de 30° de flexão de joelho. Os sujeitos foram encorajados a promover uma contração máxima de extensores de joelho assim que o braço do dinamômetro atingisse esse posicionamento. Em resposta ao torque de extensão do sujeito, o dinamômetro conduziu o segmento até a posição de 90° de flexão de joelho (amplitude de movimento = 60°) em uma velocidade angular fixada em 60°.s⁻¹. Assim, cada contração excêntrica teve duração de 1 s, sendo seguida de um período de 1 s de repouso em que o segmento era passivamente estendido.

Todos os voluntários iniciaram o programa de treinamento recebendo a intervenção nos dois hemisférios corporais com intuito de evitar desequilíbrios musculares entre os membros direito e esquerdo devido às adaptações ao treinamento. Entretanto, alguns sujeitos relataram quadros de dor articular em um dos membros inferiores no decorrer das sessões de treino e outros foram acometidos por lesões musculoesqueléticas em um dos segmentos durante suas atividades de vida diária. Nesses casos, somente os membros inferiores íntegros desses sujeitos completaram as 12 semanas do programa de treinamento e puderam ser considerados para análise. Como resultado, a análise estatística foi realizada com os dados de 20 sujeitos (15 com o membro inferior direito e cinco com o esquerdo; ou 16 membros não-dominantes e quatro membros dominantes).

Dezoito voluntários completaram as 21 sessões do programa de intervenção e dois indivíduos faltaram a uma sessão de treino cada devido a razões pessoais, conduzindo nossa amostra a uma assiduidade igual a 99,5%.

Tabela 4. Programa de treinamento excêntrico de extensores de joelho.

Mesociclo	Semana	Frequência	Séries	Repetições	Volume
1	1	1	3	10	30
	2	2	3	10	30
	3	2	3	10	30
	4	2	3	10	30
2	5	1	4	10	40
	6	2	4	10	40
	7	2	4	10	40
	8	2	4	10	40
3	9	1	5	10	50
	10	2	5	10	50
	11	2	5	10	50
	12	2	5	10	50

Análise estatística

Um coeficiente de correlação intraclassa (ICC) foi utilizado para verificar a reprodutibilidade teste-reteste entre os valores obtidos nas avaliações Basal e Pré-treino. Uma ANOVA de medidas repetidas foi usada para verificar o efeito do tempo entre os cinco momentos de coleta de dados do estudo (Basal, Pré-treino, Pós-4, Pós-8 e Pós-12). O teste de *Mauchly* foi utilizado e o fator de correção de *Greenhouse-Geisser* foi aplicado quando o pressuposto de esfericidade foi violado. Quando foi identificado efeito do tempo, um *post-hoc* de Bonferroni foi usado para identificar as diferenças entre os momentos. Toda a análise estatística foi desenvolvida utilizando um nível de significância de $p < 0,05$. Os resultados são apresentados nas figuras como média \pm erro padrão.

RESULTADOS

Elevados índices de correlação foram observados entre as avaliações Basal e Pré-treino para todas as variáveis: PT_{iso} ($r=0,983$); PT_{con} ($r=0,958$); PT_{exc} ($r=0,958$); ΣEMG_{iso} ($r=0,891$); ΣEMG_{con} ($r=0,848$); ΣEMG_{exc} ($r=0,844$); ΣEM ($r=0,956$); $ASTA_{rf}$ ($r=0,971$). Além disso, não foram verificadas diferenças significativas em qualquer uma das variáveis nas avaliações Basal e Pré-treino ($p=1,000$ para todos os testes).

As Figuras 4, 5 e 6 ilustram as alterações observadas ao longo do período de intervenção na força muscular (pico de torque), ativação (atividade EMG) e massa muscular (espessura e ASTA) dos músculos extensores de joelho, respectivamente. Essas figuras apresentam as diferenças significativas entre os cinco momentos de avaliação neuromuscular (Basal, Pré-treino, Pós-4, Pós-8 e Pós-12) e a variação percentual média observada após quatro, oito e 12 semanas de treinamento excêntrico.

Os valores de PT_{iso} , PT_{con} e PT_{exc} aumentaram significativamente após quatro semanas de treinamento excêntrico ($p<0,001$, $p=0,001$ e $p<0,001$, respectivamente) e da avaliação Pós-4 para a Pós-8 ($p<0,001$; $p=0,001$; $p=0,016$). O PT_{iso} e o PT_{exc} incrementaram significativamente entre as avaliações Pós-8 e Pós-12 ($p=0,007$; $p=0,013$), enquanto o PT_{con} permaneceu no mesmo nível nesse período ($p=0,177$) (Figura 4).

Os valores de ΣEMG_{iso} não se alteraram de forma significativa entre as avaliações Pré-treino e Pós-4 ($p=0,114$), atingindo incrementos significativos após oito semanas de treinamento (Pré-treino vs. Pós-8, $p=0,025$) e estabilizando entre as avaliações Pós-8 e Pós-12 ($p=1,000$). Embora o desenho da curva de ΣEMG_{con} possa sugerir uma tendência a incremento ao longo do programa de treinamento, esse parâmetro não apresentou alterações significativas em qualquer momento de avaliação do estudo (Pré-treino vs. Pós-4, $p=0,134$; Pré-treino vs. Pós-8, $p=0,069$; Pré-treino vs. Pós-12, $p=1,000$). A ΣEMG_{exc} apresentou um abrupto incremento nas quatro primeiras semanas de treinamento ($p=0,004$) e não se alterou a partir desse ponto até o término do período de treinamento ($p=1,000$ para Pós-4 vs. Pós-8, Pós-4 vs. Pós-12 e Pós-8 vs. Pós-12) (Figura 5).

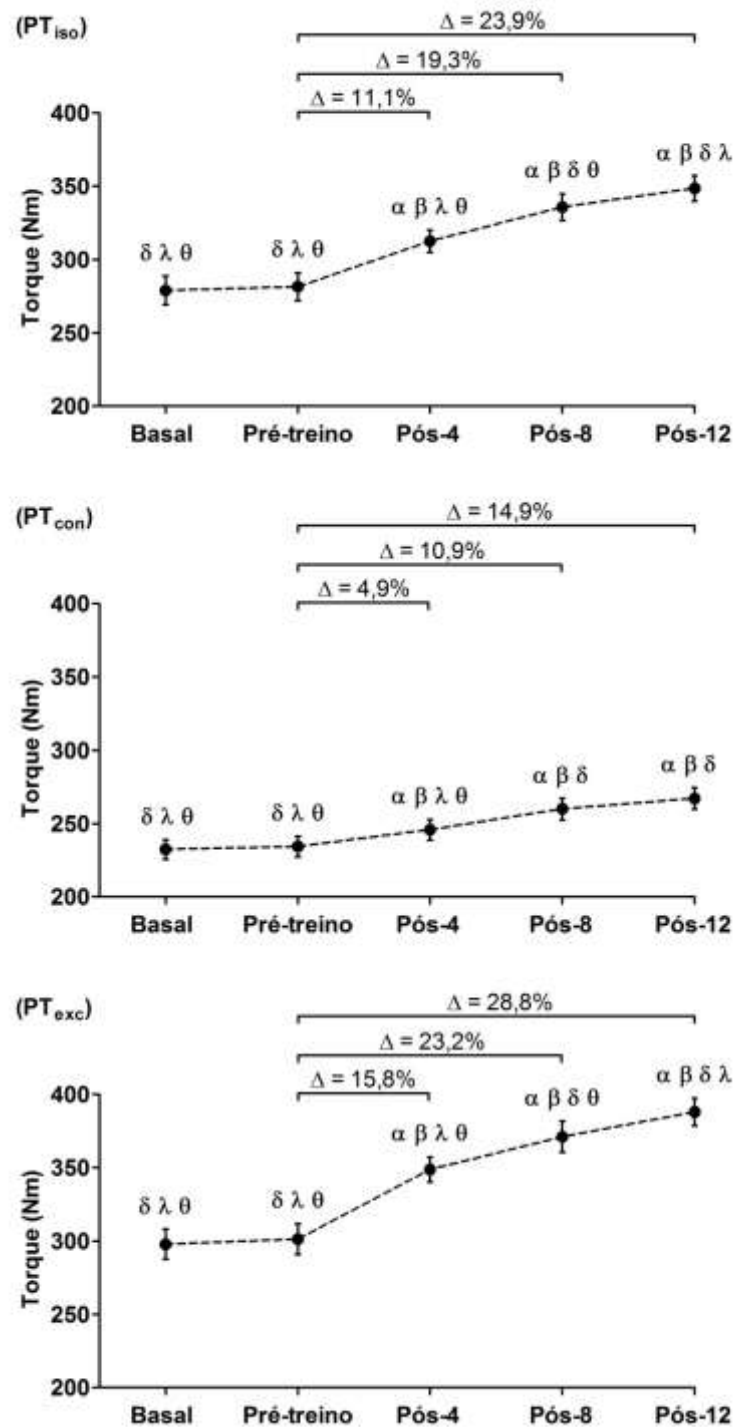


Figura 4. Pico de torque de extensores de joelho em testes isométricos (PT_{iso}), concêntricos (PT_{con}) e excêntricos (PT_{exc}) ao longo do estudo. α = diferente de Basal; β = diferente de Pré-treino; δ = diferente de Pós-4; λ = diferente de Pós-8; θ = diferente de Pós-12; Δ = alteração percentual.

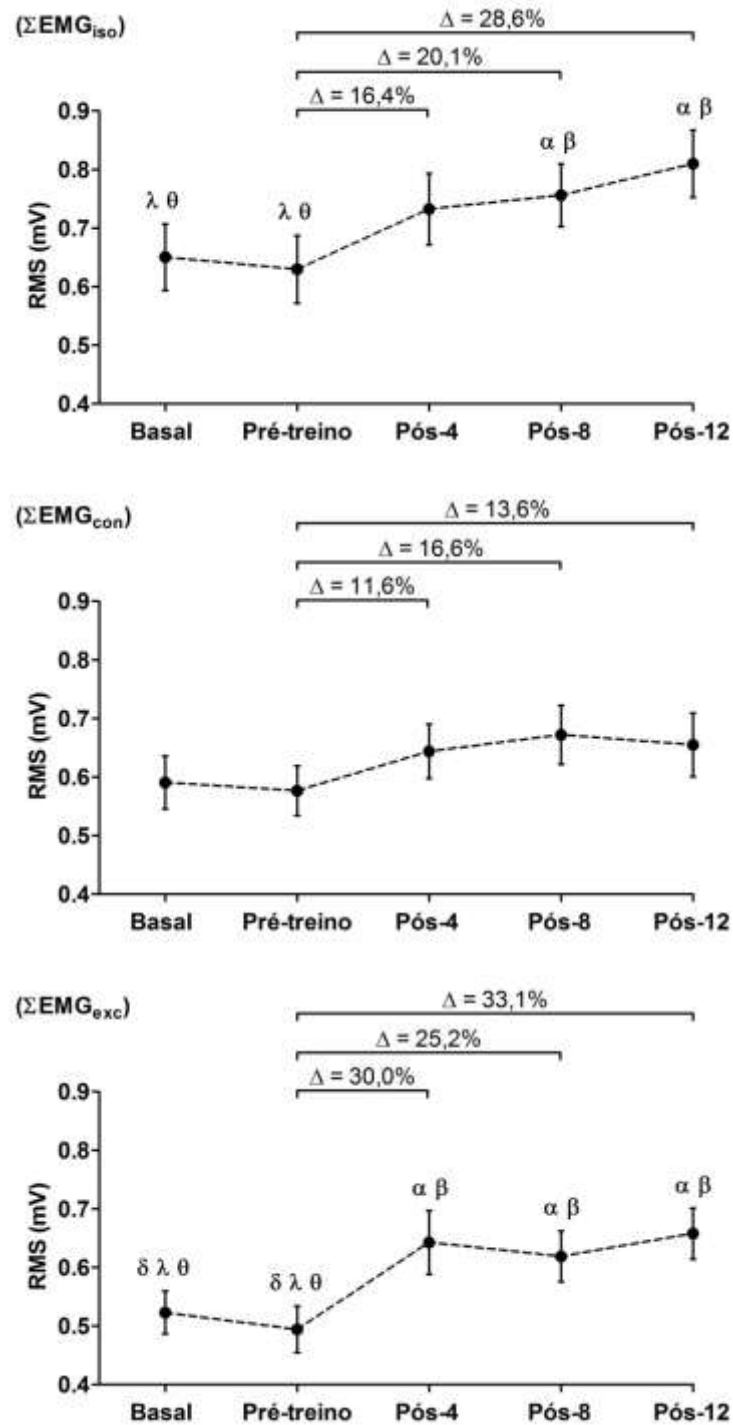


Figura 5. Ativação muscular de extensores de joelho em testes isométricos (ΣEMG_{iso}), concêntricos (ΣEMG_{con}) e excêntricos (ΣEMG_{exc}) ao longo do estudo. α = diferente de Basal; β = diferente de Pré-treino; δ = diferente de Pós-4; λ = diferente de Pós-8; θ = diferente de Pós-12; Δ = alteração percentual.

Os valores de ΣEM e $ASTA_{rf}$ apresentaram aumentos significativos após quatro semanas de treinamento ($p < 0,001$; $p = 0,001$) e entre as avaliações Pós-4 e Pós-8 ($p = 0,003$; $p < 0,001$), mas não sofreram alterações significativas da avaliação Pós-8 para a Pós-12 ($p = 1,000$ para ambos os testes) (Figura 6).

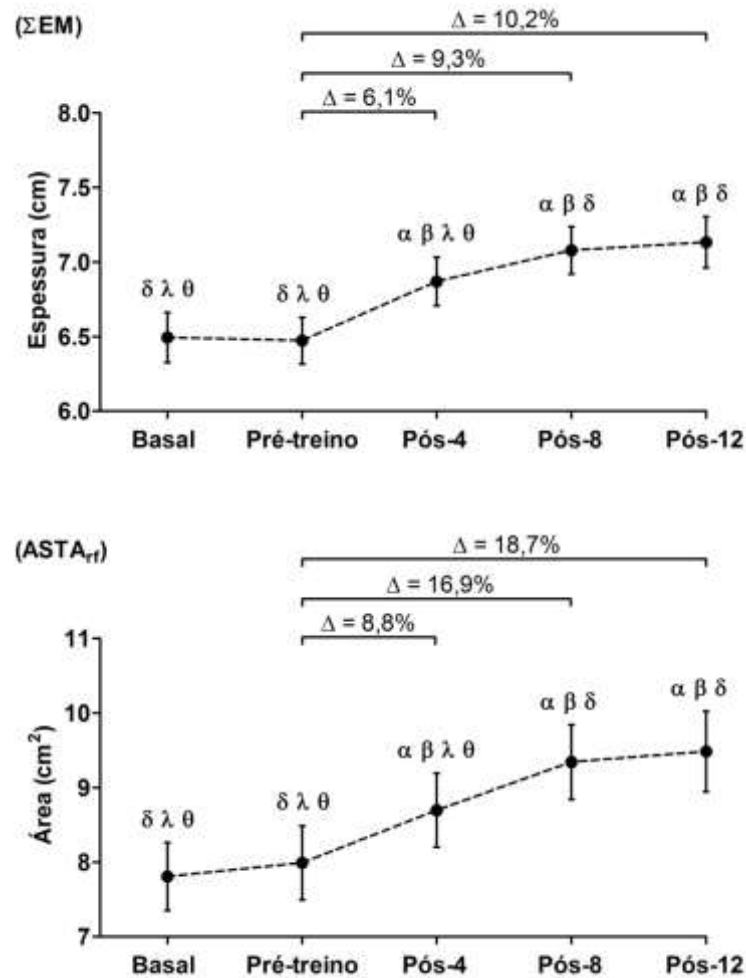


Figura 6. Somatório de espessuras do músculo quadríceps femoral (ΣEM) e área de secção transversa anatômica do músculo reto femoral ($ASTA_{rf}$) ao longo do estudo. α = diferente de Basal; β = diferente de Pré-treino; δ = diferente de Pós-4; λ = diferente de Pós-8; θ = diferente de Pós-12; Δ = alteração percentual.

DISCUSSÃO

Os principais achados desse estudo foram de que um programa de treinamento excêntrico dos músculos extensores de joelho: (1) incrementou o pico de torque isométrico, concêntrico e excêntrico, mas em diferentes magnitudes; (2) incrementou a ativação muscular após quatro e oito semanas de treinamento nos testes excêntricos e isométricos, respectivamente, mas não alterou a ativação do músculo em testes concêntricos; e (3) promoveu uma significativa resposta hipertrófica após quatro e oito semanas de treinamento, sem alterações adicionais entre oito e 12 semanas de treinamento. Embora um considerável número de estudos tenha avaliado os efeitos do treinamento excêntrico sobre o músculo quadríceps femoral, o presente estudo é o primeiro a acompanhar as adaptações neurais e morfológicas de forma simultânea e periódica ao longo de um período de 12 semanas de treinamento excêntrico, possibilitando a associação dessas adaptações com os ganhos de força isométrica, concêntrica e excêntrica.

O desenho experimental adotado pelo presente estudo descartou a necessidade de um grupo controle não submetido a qualquer tipo intervenção, uma vez que todos os voluntários foram submetidos a um mesmo período controle de quatro semanas previamente ao programa de treinamento excêntrico. Os elevados valores de ICC e a ausência de diferenças significativas entre os resultados das avaliações Basal e Pré-treino suportam a reprodutibilidade dos nossos procedimentos de avaliação. As diferentes magnitudes de alteração nos valores de pico de torque (Figura 4) e atividade EMG (Figura 5) observadas nos testes isométricos, concêntricos e excêntricos podem ser associadas ao efeito da especificidade do exercício excêntrico, enquanto as diferenças nas curvas de ΣEM e $ASTA_{rf}$ (Figura 6) expressam as respostas específicas de dois parâmetros de arquitetura muscular comumente associados à quantidade de massa muscular. Entretanto, fatores intervenientes, tais quais as características dos sujeitos e a periodização do treinamento^{1,19}, assim como a realização dos exercícios em dinamômetros isocinéticos ou em equipamentos de musculação⁹⁶, exercem efeito direto sobre as adaptações dos músculos extensores de joelho ao treinamento excêntrico. Desse modo, cautela se faz necessária na comparação dos resultados

entre estudos com diferentes programas de treinamento ou amostras compostas por indivíduos com características distintas.

Os dados do presente estudo poderiam ser utilizados para se fazer uma estimativa da contribuição percentual dos fatores neurais e morfológicos para os ganhos de força nos diferentes momentos de avaliação ao longo do programa de treinamento excêntrico, como previamente realizado em relação ao treino de força convencional ². No entanto, é importante notar que o nosso estudo, assim como a maioria dos estudos envolvendo treinamento, analisou a atividade elétrica e morfologia muscular de pontos específicos do quadríceps femoral. Uma vez que estudos com treinamento excêntrico têm demonstrado distintas respostas adaptativas entre as diferentes regiões de um mesmo músculo ^{21,23,35,37}, a extrapolação das medidas para toda a musculatura extensora de joelho precisa ser feita com precaução. Assim, optamos por não determinar valores de contribuição percentual das adaptações neurais e morfológicas para os ganhos de força observados nos sujeitos do presente estudo, mas discutimos as contribuições neurais e morfológicas para os incrementos verificados nos testes isométricos, concêntricos e excêntricos ao longo do programa de treinamento excêntrico por meio das respostas temporais dos dados de torque, EMG e massa muscular.

Em nosso estudo, maiores incrementos na força excêntrica de extensores de joelho em comparação aos ganhos de força isométrica e concêntrica eram esperados ^{21,23-25,29,32,35,39,82,86}, tendo em vista o já relatado efeito da especificidade do treinamento excêntrico ^{96,127}. Porém, de forma contrária aos estudos que não encontraram incrementos de força em testes isométricos ^{35,39,86} e concêntricos ^{24,25,32,35,86}, nossos resultados apontam para um aumento significativo do pico de torque isométrico e concêntrico com um período de apenas quatro semanas de treinamento excêntrico. O pico de torque isométrico continuou a incrementar nas avaliações subsequentes, mas em magnitudes inferiores às observadas nos testes excêntricos. O pico de torque concêntrico também aumentou da quarta para a oitava semana de treinamento, mas não se alterou da avaliação Pós-8 para a Pós-12. Esse comportamento observado na força isométrica, concêntrica e excêntrica de extensores de joelho se encontra fortemente associado aos nossos resultados de EMG e ultrassonografia, como discutido a seguir.

A atividade elétrica dos músculos nos testes excêntricos aumentou com quatro semanas de treinamento e permaneceu inalterada até o término da intervenção (Figura 5), um resultado que pode ser explicado pela manifestação do efeito de aprendizado motor desde as primeiras semanas de exposição dos sujeitos ao exercício excêntrico. Níveis mais elevados de inibição muscular são observados em ações excêntricas comparadas às ações isométricas e/ou concêntricas^{96,102}. Embora o mecanismo responsável por essa reduzida capacidade de ativação excêntrica não seja completamente elucidado, a hipótese mais aceita está relacionada aos diferentes padrões de programação das contrações excêntricas e concêntricas em nível de sistema nervoso central, associados à influência do *feedback* proprioceptivo de neurônios aferentes durante a fase excêntrica do movimento^{96,102}. Independentemente do mecanismo de ação, nossos resultados corroboram achados prévios acerca do incremento da atividade EMG excêntrica após o treinamento excêntrico de extensores de joelho²³⁻²⁵, mas adiciona uma importante informação: essa adaptação neural ocorre predominantemente nas quatro primeiras semanas do programa de treinamento excêntrico.

Aumentos significativos na atividade EMG foram observados a partir da oitava semana de treino em testes isométricos, enquanto a ativação muscular em testes concêntricos não se alterou ao longo do nosso estudo (Figura 5). Hortobagyi et al.²⁵ também encontraram incrementos na atividade elétrica em testes isométricos após o treinamento excêntrico em condições isocinéticas, ao passo que a maioria dos estudos com treinamento excêntrico concorda com a ausência de modificações na ativação muscular em testes concêntricos²³⁻²⁵. É importante ressaltar que ações musculares isométricas são necessárias para iniciar cada contração excêntrica realizada no dinamômetro isocinético, mas contrações concêntricas não foram realizadas em qualquer momento durante as sessões de treino do nosso estudo. Portanto, o comportamento da atividade EMG em testes isométricos e concêntricos pode ser justificado pela demanda imposta sobre a musculatura durante as sessões de treino, sugerindo um forte efeito da especificidade das adaptações neurais em relação ao tipo de contração muscular. Além disso, uma vez que a ativação muscular não apresentou alterações nos testes concêntricos, nossos resultados sugerem que o incremento do torque concêntrico foi primordialmente atribuído às

adaptações morfológicas. Essa hipótese é sustentada pelo comportamento similar entre as curvas de PT_{con} (Figura 4) e ΣEM ou $ASTA_{rf}$ (Figura 6), onde os incrementos aconteceram até a oitava semana de treinamento e se estabilizaram entre as avaliações Pós-8 e Pós-12.

Os nossos parâmetros de massa muscular (ΣEM e $ASTA_{rf}$) apresentaram um comportamento semelhante ao longo do estudo. Embora conceitos tradicionais no campo do treinamento de força afirmem que adaptações neurais possuem um papel dominante durante as primeiras 6-8 semanas de treinamento^{5,7,162}, nós observamos alterações morfológicas significativas nas quatro primeiras semanas de intervenção. Esse aumento da massa muscular certamente teve um efeito importante sobre os ganhos de força observados nesse período inicial de treinamento, de modo que parece ter sido o principal fator responsável pelo incremento do torque concêntrico, já que não foram verificadas alterações na ativação muscular concêntrica. Estudos envolvendo treino de força convencional de extensores de joelho não encontraram aumentos na espessura muscular do VL em curtos períodos (5 semanas)^{168,172}. Por outro lado, estudos utilizando equipamentos gravidade-independentes (*flywheel ergometers*) com um componente excêntrico mais forte que equipamentos convencionais de musculação verificaram aumento da $ASTA$ ⁶⁵ e volume⁶⁴ do músculo quadríceps femoral com apenas três e cinco semanas de treinamento, respectivamente. Além disso, estudos envolvendo o treinamento excêntrico de extensores de joelho observaram incrementos da espessura muscular do VL²¹ e área de secção transversa de fibras musculares tipo II⁴⁵ com 4-5 semanas de treinamento, corroborando os nossos achados. Embora estudos comparando o treinamento excêntrico e o treino de força convencional não tenham encontrado diferenças na resposta hipertrófica de idosos após 14⁸⁶ e 16 semanas⁸⁹, é possível que as adaptações morfológicas ao treinamento excêntrico ocorram de forma precoce em relação às respostas ao treino de força convencional, como suportado pelos resultados de Norrbrand et al.⁶⁴.

A estabilização dos valores de massa muscular observados entre as avaliações Pós-8 e Pós-12 foram inesperadas, especialmente porque o volume de treinamento foi incrementado nesse último mesociclo do programa de intervenção. Em conjunto com a ausência de alterações da atividade EMG nas últimas quatro

semanas de treinamento, esse resultado sugere que outros mecanismos encontram-se envolvidos com os ganhos de força verificados nos testes isométricos e excêntricos nesse período. É tentador especular que a força produzida por unidade de área muscular foi incrementada devido a adaptações intrínsecas das células musculares não relacionadas à resposta hipertrófica. No entanto, existe a possibilidade de o treinamento excêntrico ter reduzido o conteúdo lipídico intramuscular⁶⁹ com um incremento simultâneo e proporcional no conteúdo contrátil²⁵, não afetando os valores espessura muscular ou ASTA. Esse tipo de adaptação poderia explicar porque o treinamento de força induz aumentos mais pronunciados na área de secção transversa das fibras musculares do que na ASTA do músculo¹⁶², como já demonstrado em um estudo envolvendo o treinamento excêntrico de flexores de cotovelo⁵⁷. Outra possibilidade é que o treinamento excêntrico possa ter levado a um incremento da rigidez do tecido conjuntivo⁴³, uma adaptação relacionada ao aumento na síntese de colágeno induzida pelo exercício excêntrico¹⁷³. Dessa forma, o pico de torque poderia ser incrementado por meio do engajamento dos elementos passivos de produção de força, uma vez que o desempenho em ações musculares de alta intensidade é, em parte, dependente da efetiva transmissão de força do tecido contrátil para os ossos¹⁷⁴.

Em conclusão, esse estudo provê informações acerca das respostas temporais de força, ativação e massa muscular dos extensores de joelho ao longo de um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico. Nossos resultados sugerem que o treinamento excêntrico possui um forte efeito de especificidade sobre os ganhos de força em favor das contrações excêntricas e isométricas. O aumento de força concêntrica ocorreu, porém não pôde ser atribuído a adaptações neurais. O aumento de força isométrica e excêntrica em quatro e oito semanas de treinamento pode ser explicado pela soma de adaptações neurais e morfológicas, enquanto os ganhos de força da oitava para a 12ª semana de treinamento devem ser atribuídos a mecanismos distintos ao incremento da ativação muscular ou alteração mensurável da massa muscular.

CAPÍTULO III

Adaptações na Arquitetura Muscular de Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico: Reto Femoral Vs. Vasto Lateral

RESUMO

Este estudo verificou as alterações na arquitetura muscular induzidas pelo treinamento excêntrico em dois músculos sinergistas da extensão de joelho: reto femoral (RF) e vasto lateral (VL). Vinte homens saudáveis foram submetidos a um período controle de quatro semanas sem treinamento, seguido por um período de 12 semanas de treinamento excêntrico do quadríceps femoral em exercício realizado no dinamômetro isocinético. Imagens de ultrassonografia do RF e do VL foram coletadas antes e após o período controle, assim como depois de quatro, oito e 12 semanas de treinamento excêntrico. Não foram observadas diferenças na espessura muscular, ângulo de penação ou comprimento de fascículo após o período controle, de modo que os valores dessas medidas atingiram níveis satisfatórios de reprodutibilidade. Após quatro semanas de intervenção, tanto o RF quanto o VL apresentaram aumento significativo na espessura e no comprimento de fascículo. As adaptações na geometria fascicular desses músculos não diferiram ao longo do programa de treinamento, de modo que ao final das 12 semanas de intervenção foi possível observar: (1) aumento de 7-10% da espessura muscular; (2) incremento de 17-19% no comprimento de fascículo; e (3) ausência de alterações significativas no ângulo de penação. Esses achados sugerem que: (1) as adaptações morfológicas podem ocorrer em curtos períodos de treinamento excêntrico; (2) o aumento da espessura muscular em função do treinamento excêntrico se deve ao aumento do comprimento fascicular, mas não do ângulo de penação; e (3) apesar das diferenças estruturais e funcionais, RF e VL apresentam índices semelhantes de adaptação dos parâmetros de arquitetura muscular em resposta a um programa treinamento excêntrico isocinético.

INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo o treinamento de força têm comumente avaliado a resposta hipertrófica por meio da área de secção transversa anatômica (ASTA)^{7,175}. Entretanto, a ASTA dos músculos penados, como é o caso do quadríceps femoral, não representa a área de secção transversa perpendicular a todas as fibras musculares, ou seja, a área de secção transversa fisiológica (ASTF), que é considerada o parâmetro de arquitetura diretamente proporcional à máxima tensão gerada por um músculo¹⁵¹. Uma vez que a ASTF é estimada por meio de valores de volume muscular, ângulo de penação e comprimento das fibras musculares¹⁵¹, alterações na geometria fascicular possuem efeitos significativos sobre a funcionalidade dos músculos penados. Desse modo, as adaptações na geometria fascicular dos músculos extensores de joelho têm sido investigadas em diversos estudos envolvendo o treino de força convencional^{65,86,89,168,169,172,176}.

Os efeitos do treinamento excêntrico sobre o sistema neuromuscular têm sido investigados por um número expressivo de estudos envolvendo sujeitos saudáveis^{21-25,29,32,35,39,43,55,57}, praticantes de treino de força convencional^{66,69,78}, atletas de diferentes esportes^{72,76,137} e idosos⁷⁹⁻⁸⁹. Apesar de o grupo muscular extensor de joelho ser o mais frequentemente investigado^{21-25,29,32,35,39,86,89}, poucos trabalhos se preocuparam em avaliar as adaptações na arquitetura muscular do quadríceps femoral^{21,86,89}. Esses estudos demonstraram que o treinamento excêntrico promove significativos aumentos da espessura muscular após 10²¹ e 14-16^{86,89} semanas de intervenção em jovens e idosos, respectivamente. Algumas evidências sugerem incremento²¹, enquanto outras sugerem ausência de alterações^{86,89} no ângulo de penação. Resultados controversos também podem ser encontrados em relação à adaptação no comprimento dos fascículos de músculos treinados excêntricamente^{21,86,89}. Além disso, a cronologia das adaptações na arquitetura muscular segue obscura, uma vez que o estudo de Blazevich et al.²¹ parece ser o único a avaliar alterações na geometria fascicular em curtos períodos (cinco semanas) de treinamento excêntrico. Em outras palavras, até o presente momento não há um consenso a respeito de como e quando ocorram as adaptações na geometria

fascicular ao longo de um programa de treinamento excêntrico de extensores de joelho.

Outra questão em aberto diz respeito ao fato de os estudos com treinamento excêntrico terem focado suas atenções sobre o músculo vasto lateral (VL) ^{21,86,89}, normalmente assumindo que as alterações na arquitetura desse músculo são representativas das adaptações verificadas no compartimento extensor do joelho como um todo. No entanto, diferentes adaptações no ângulo de penação fascicular após o treinamento excêntrico foram verificadas entre o VL e o vasto medial (VM) ²¹. A complexa arquitetura do VM leva a valores de reprodutibilidade demasiadamente baixos nas medições de comprimento dos fascículos ^{21,133,168}, o que impediu a comparação entre VL e VM no estudo supramencionado ²¹. Entretanto, evidências suportam a existência de diferentes magnitudes de sarcômerogênese (adição de sarcômeros em série em uma fibra muscular) entre o VL e o vasto intermédio (VI) de ratos submetidos a um programa de exercício excêntrico ¹⁴⁷. Sendo assim, a ideia de ocorrer uma resposta ao treinamento excêntrico específica para cada um dos músculos que agem sinergicamente na extensão de joelho de seres humanos parece bastante razoável.

Cada músculo extensor de joelho possui sua própria arquitetura ¹³³, uma distribuição específica em relação aos tipos de fibras musculares ¹³⁴ e um padrão de recrutamento diferenciado de acordo com o tipo de exercício realizado ¹³⁰⁻¹³². Esses aspectos afetam as respostas agudas dos músculos ao exercício e, conseqüentemente, as adaptações ao treinamento. A resposta aguda mais característica a uma sessão de exercício excêntrico é o dano muscular induzido pelo exercício ^{106,109}, que é um mecanismo de ativação para o processo de reparo tecidual e promove a adição de sarcômeros alinhados em paralelo ⁸ e em série ¹⁰⁴ no músculo esquelético. Um maior número de sarcômeros em paralelo conduz a um aumento no diâmetro das fibras musculares, possivelmente levando a um incremento no ângulo de penação dos fascículos ^{152,153} e resultando em uma maior ASTF. A adição de sarcômeros em série determina o aumento no comprimento das fibras musculares ^{151,153}. Assumindo que músculos com maiores ângulos de penação apresentam fibras mais fortes devido ao maior número de sarcômeros em paralelo, esses músculos são menos suscetíveis ao dano muscular induzido pelo exercício.

Ao mesmo tempo, músculos com fibras de maior diâmetro e maior ângulo de penação normalmente apresentam fibras mais curtas ^{151,177}, as quais são mais suscetíveis ao dano muscular por atuarem mais próximas à fase descendente da relação força-comprimento, experimentando maiores índices de alongamento durante as ações excêntricas ¹⁰⁴.

Imagens de ultrassonografia evidenciam a variabilidade nos valores de ângulo de penação e comprimento dos fascículos entre diferentes locais do quadríceps femoral ¹³³, demonstrando a complexa geometria fascicular dos músculos extensores de joelho de humanos. Dados provenientes de cadáveres comprovam que o VL possui fibras mais longas, além de maior ângulo de penação e ASTF que o reto femoral (RF) ¹⁷⁷, o que sugere uma menor suscetibilidade do VL ao dano muscular induzido por exercício. Por outro lado, o RF é o único músculo bi-articular na extensão de joelho, reduzindo as chances de esse músculo atingir o seu comprimento máximo fisiológico (fase descendente da relação força-comprimento) durante exercícios em cadeia cinética aberta executados na posição sentado (por exemplo, dinamômetro isocinético e cadeira extensora de joelho) devido à flexão de quadril. Tendo em vista que o comportamento dos fascículos do RF e VL durante esse tipo de exercício parece não ter sido avaliado em estudos envolvendo humanos, permanece incerto como isso pode afetar a resposta adaptativa desses músculos ao treinamento excêntrico.

O presente estudo foi motivado (1) pelos resultados conflitantes relacionados ao incremento do ângulo de penação e comprimento de fascículo, (2) pela lacuna de evidências acerca da cronologia das alterações na geometria fascicular e (3) pela ausência de estudos destinados às respostas específicas das diferentes porções do quadríceps femoral de seres humanos submetidos ao treinamento excêntrico. Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar e comparar o efeito de 12 semanas de treinamento excêntrico sobre a geometria fascicular de dois músculos sinergistas da extensão de joelho: RF e VL.

MÉTODOS

Desenho experimental

Um ensaio clínico de caráter longitudinal foi desenvolvido para verificar as adaptações morfológicas dos músculos RF e VL ao longo de um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico. Os voluntários foram submetidos a avaliações ultrassonográficas em cinco oportunidades ao longo dos quatro meses de duração do estudo com intuito de analisar as alterações nos parâmetros de arquitetura muscular (espessura, ângulo de penação e comprimento de fascículo) do RF e do VL. Um período de intervalo de quatro semanas foi respeitado entre as avaliações. Nas primeiras quatro semanas do estudo, o período de intervalo entre a primeira e a segunda avaliação (denominadas de Basal e Pré-treino, respectivamente), os voluntários passaram por um período controle sem a realização de qualquer tipo de exercício sistematizado. Após a segunda avaliação, os sujeitos iniciaram o programa de 12 semanas de treinamento excêntrico de extensores de joelho. Avaliações subsequentes foram realizadas após quatro (Pós-4), oito (Pós-8) e 12 (Pós-12) semanas de treinamento (Figura 1). O presente estudo foi conduzido de acordo com as disposições da Declaração de Helsinki e foi previamente aprovado pelo comitê de ética em pesquisa institucional.

Sujeitos

Vinte estudantes universitários do sexo masculino (idade: $24,05 \pm 3,73$ anos; estatura: $1,75 \pm 0,06$ m; massa corporal: $73,95 \pm 6,99$ kg) completaram o programa do estudo. Todos eram sujeitos fisicamente ativos e não envolvidos em qualquer tipo de programa de treinamento de força para membros inferiores nos seis meses prévios ao início do estudo. Os voluntários foram cuidadosamente informados sobre os objetivos e procedimentos do estudo durante uma sessão de entrevista realizada na fase de seleção dos sujeitos aptos a participar do estudo. Os seguintes critérios de exclusão foram adotados: (1) histórico de lesões musculoesqueléticas em membros inferiores que representassem uma contraindicação a execução de exercícios máximos ou que pudessem interferir no desempenho durante as sessões de treinamento e avaliação (por exemplo, tendinopatia patelar, síndrome fêmoro-

patelar, procedimento cirúrgico de joelho, rupturas de ligamentos submetidos ou não a procedimento cirúrgico, casos recentes de lesão muscular ou entorse articular); (2) condições respiratórias ou cardiovasculares consideradas um fator de risco ou limitante a execução de exercícios máximos; e (3) usuários de suplementos alimentares ou esteroides anabólicos.

Avaliação da arquitetura muscular

Um equipamento de ultrassonografia Aloka SSD-4000 (*Aloka Inc.*, Japão), em conjunto com uma sonda de arranjo linear de 60 mm (7,5 MHz) de mesma marca e procedência, foi utilizado para avaliar a espessura, o ângulo de penação e o comprimento de fascículo dos músculos RF e VL. Rigoroso cuidado foi destinado à determinação dos locais específicos de coleta das imagens. Pontos anatômicos de referência (por exemplo, borda superior da patela) e marcas da pele dos sujeitos (por exemplo, manchas, pintas e cicatrizes), assim como os locais específicos de posicionamento da sonda ultrassonográfica sobre cada músculo, foram mapeados em uma folha maleável e transparente com intuito de garantir que as imagens de ultrassonografia fossem coletadas exatamente nos mesmos pontos ao longo das cinco avaliações previstas^{21,89,168,169}. Todas as avaliações ultrassonográficas do estudo foram conduzidas por um mesmo investigador com experiência nesse tipo de procedimento. Os sujeitos foram avaliados em posição supina com suas pernas totalmente estendidas e seus músculos relaxados²¹. Um período de 10 minutos de repouso foi respeitado antes das avaliações e os voluntários foram instruídos a não realizar qualquer tipo de atividade física vigorosa nas 48 horas prévias aos dias de avaliação.

As imagens foram coletadas a 50% da distância entre o trocanter maior e o côndilo lateral do fêmur. A superfície da sonda de ultrassonografia foi coberta com gel transmissor solúvel em água, o que promoveu contato acústico da sonda com a pele, evitando o contato direto entre as duas superfícies e a possível deformação de tecidos em função da pressão exercida pela sonda. A sonda foi orientada no sentido paralelo aos fascículos musculares, respeitando um posicionamento perpendicular à pele que recobre os músculos RF e VL. Desse modo, a orientação da sonda de ultrassonografia em relação ao eixo longitudinal da coxa foi diferente entre os

indivíduos devido às suas características anatômicas individuais. O alinhamento da sonda foi considerado apropriado para a aquisição das imagens ultrassonográficas quando diversos fascículos podiam ser facilmente delimitados sem interrupção de suas trajetórias na imagem.

Três imagens de ultrassonografia foram coletadas em cada músculo. Os parâmetros de arquitetura muscular do RF e VL foram analisados por um único investigador, o qual não tinha conhecimento acerca da identidade dos participantes ou do período do estudo em que cada imagem havia sido coletada. As imagens de ultrassonografia foram digitalizadas e analisadas por meio do *software* Image-J (*National Institute of Health*, EUA). A espessura muscular foi considerada a distância entre a aponeurose superficial e a aponeurose profunda do músculo, sendo calculada através do valor médio de cinco linhas paralelas traçadas entre as aponeuroses ao longo da imagem ultrassonográfica (Figura 7). O fascículo de melhor visualização de cada imagem foi utilizado para análise do ângulo de penação e comprimento fascicular. O ângulo de penação correspondeu ao ângulo formado entre o fascículo muscular e a aponeurose profunda, enquanto o comprimento de fascículo foi determinado pela distância percorrida pelo fascículo entre as aponeuroses superficial e profunda (Figura 7). Quando não foi possível visualizar a extensão total do fascículo na imagem ultrassonográfica, a linha do fascículo foi extrapolada e o comprimento calculado por meio de uma função trigonométrica (Figura 7). Esse tipo de procedimento foi utilizado por diversos estudos envolvendo a análise do comprimento fascicular do VL^{21,86,89,133,168,169,172,178}, de modo que o coeficiente de variação tem sido estimado em cerca de 4%^{86,169}.

O valor médio obtido entre as medidas realizadas nas três imagens de ultrassonografia do RF e do VL foi considerado para análise estatística dos parâmetros de espessura muscular, ângulo de penação e comprimento de fascículo. Quando esses três valores apresentaram uma dispersão maior do que 10%, o valor mais discrepante foi excluído e somente os dois valores mais próximos foram considerados para análise.

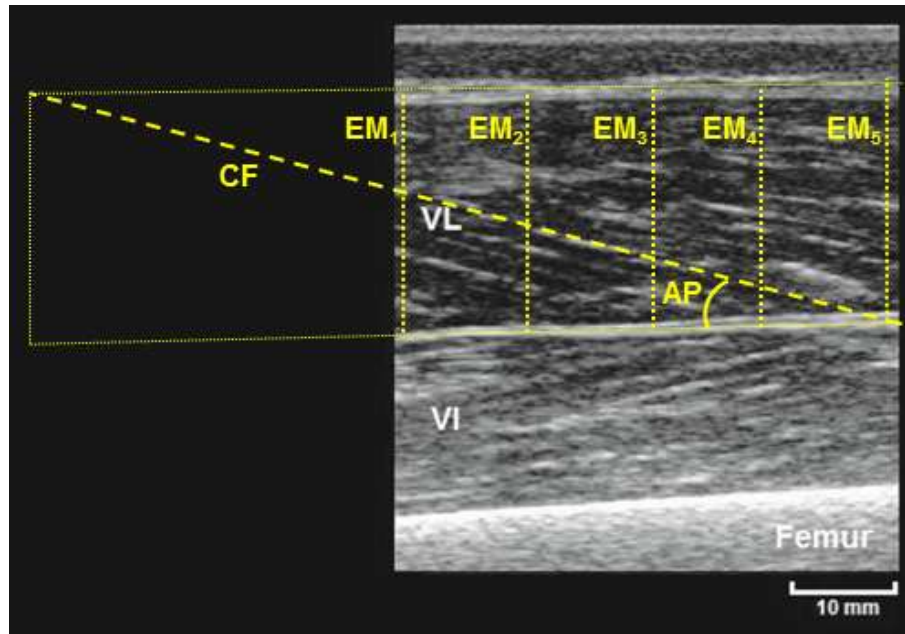


Figura 7. Representação da análise dos parâmetros de arquitetura muscular em imagem ultrassonográfica do vasto lateral (VL): espessura muscular (EM); ângulo de penação (AP); e comprimento de fascículo (CF).

Programa de treinamento excêntrico

Um programa de intervenção composto por 12 semanas de treinamento excêntrico dos músculos extensores de joelho foi realizado em um dinamômetro isocinético Biodex System 3 (*Biodex Medical Systems*, EUA). O programa de treinamento compreendeu duas sessões semanais separadas por um intervalo mínimo de 72 horas. Objetivando respeitar o princípio de progressão do treinamento, a intervenção foi dividida em três mesociclos e o volume das sessões de treino (número de séries por sessão x número de repetições por série) foi incrementado a cada mesociclo (Tabela 4). Dessa forma, cada sessão de treino foi composta por cinco minutos de exercício em ciclo-ergômetro para fins de aquecimento, seguidos de 3-5 séries de 10 contrações excêntricas máximas com intervalo de um minuto entre as séries. Os sujeitos realizaram apenas uma sessão de treino na primeira semana do programa de intervenção a fim de permitir uma introdução progressiva do regime de treinamento e para evitar que os participantes realizassem uma sessão de exercício na presença de sinais clínicos de dano muscular induzido pela primeira sessão de treino excêntrico^{106,109}. Além disso, as semanas de avaliação ao longo do

programa (5ª e 9 semana de treinamento) coincidiam com a troca de mesociclos e o consequente incremento do volume de treino, de modo que somente uma sessão de treino foi realizada nessas semanas específicas do programa.

As contrações excêntricas foram executadas de acordo com o protocolo descrito por Baroni et al. ¹⁷¹. Os sujeitos foram posicionados no dinamômetro com 85° de flexão de quadril e 90° de flexão de joelho (0° = extensão total para quadril e joelho). Antes de cada contração excêntrica, o membro inferior dos voluntários era passivamente estendido até a posição de 30° de flexão de joelho. Os sujeitos foram encorajados a promover uma contração máxima de extensores de joelho assim que o braço do dinamômetro atingisse esse posicionamento. Em resposta ao torque de extensão do sujeito, o dinamômetro conduzia o segmento até a posição de 90° de flexão de joelho (amplitude de movimento = 60°) em uma velocidade angular fixada em 60°.s⁻¹. Assim, cada contração excêntrica teve duração de 1 s, sendo seguida de um período de um segundo de repouso em que o segmento era passivamente estendido.

Com intuito de evitar desequilíbrios musculares entre os membros direito e esquerdo devido às adaptações ao treinamento, todos os voluntários iniciaram o programa de treinamento recebendo a intervenção nos dois segmentos. Entretanto, alguns sujeitos relataram quadros de dor articular em um dos membros inferiores no decorrer das sessões de treino, enquanto outros foram acometidos por lesões musculoesqueléticas em um dos segmentos durante suas atividades de vida diária. Nesses casos, somente os membros inferiores íntegros desses sujeitos completaram as 12 semanas do programa de treinamento e puderam ser considerados para análise. Como resultado, a análise estatística compreendeu 20 sujeitos (15 com o membro inferior direito e cinco com o esquerdo; ou 16 membros não-dominantes e quatro membros dominantes). Dezoito voluntários completaram as 21 sessões do programa de intervenção e dois indivíduos faltaram a uma sessão de treino cada devido a razões pessoais, conduzindo nossa amostra a uma assiduidade igual a 99,5%.

Análise estatística

A espessura muscular, ângulo de penação e o comprimento de fascículo dos músculos RF e VL obtidos nas avaliações Basal e Pré-treino foram utilizados para verificação da reprodutibilidade teste-reteste das medidas a partir do índice de correlação intraclassa (ICC).

Os valores absolutos de espessura muscular, ângulo de penação e o comprimento de fascículo de cada músculo ao longo dos cinco momentos de avaliação do estudo (Basal, Pré-treino, Pós-4, Pós-8 e Pós-12) foram comparados por meio de uma ANOVA de medidas repetidas. O teste de *Mauchly* foi utilizado e o fator de correção de *Greenhouse-Geisser* foi aplicado quando o pressuposto de esfericidade foi violado. Quando um efeito significativo do tempo foi determinado, o *post-hoc* de LSD foi utilizado para identificar as diferenças entre os momentos dentro de cada músculo.

As variações percentuais em relação aos valores observados na avaliação Pré-treino foram calculados para cada parâmetro de arquitetura muscular. Uma ANOVA de dois fatores foi usada para verificar a interação entre músculo (RF e VL) e o momento de avaliação (Basal, Pré-treino, Pós-4, Pós-8 e Pós-12). O teste de *Mauchly* e o fator de correção de *Greenhouse-Geisser* foram devidamente aplicados. Quando houve uma interação significativa entre músculo e momento, uma ANOVA de um fator foi aplicada dentro de cada momento para comparar a variação percentual entre RF e VL, enquanto uma ANOVA de medidas repetidas, seguida do *post-hoc* de LSD, foi usada dentro de cada músculo para comparar os momentos de avaliação. Quando somente efeito do tempo foi observado, um *post-hoc* de LSD foi utilizado para identificar as diferenças entre os momentos de avaliação.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com um nível de significância de $p \leq 0,05$. Os resultados são apresentados em tabelas como média \pm desvio padrão e em figuras como média \pm erro padrão.

RESULTADOS

Elevados índices de reprodutibilidade teste-reteste entre as avaliações Basal e Pré-treino foram observados para todos os parâmetros de arquitetura muscular: espessura muscular (RF: $r=0,963$; VL: $r=0,912$); ângulo de penação (RF: $r=0,950$; VL: $r=0,903$); e comprimento de fascículo (RF: $r=0,948$; VL: $r=0,912$). Além disso, não houve diferenças significativas entre esses momentos de avaliação em qualquer um dos parâmetros de arquitetura muscular: espessura muscular (RF: $p=0,977$; VL: $p=0,222$); ângulo de penação (RF: $p=0,112$; VL: $p=0,710$); e comprimento de fascículo (RF: $p=0,433$; VL: $p=0,316$) (Tabela 5).

Com relação aos valores absolutos, foi observado um efeito significativo do tempo sobre a espessura muscular (RF: $p<0,001$; VL: $p<0,001$) e sobre o comprimento de fascículo (RF: $p<0,001$; VL: $p<0,001$), mas não sobre o ângulo de penação (RF: $p=0,693$; VL: $p=0,539$). Nos músculos RF e VL, a espessura muscular aumentou significativamente de Pré-treino para Pós-4 ($p<0,001$ para ambos), permanecendo constante até o término do programa de treinamento ($p>0,05$ para Pós-4 vs. Pós-8 e Pós-4 vs. Pós-12). O comprimento de fascículo de ambos os músculos apresentou um incremento significativo após quatro semanas de treinamento (RF: $p=0,022$; VL: $p=0,050$) e entre os momentos de avaliação Pós-4 e Pós-8 (RF: $p=0,005$; VL: $p=0,002$), sem alterações significativas em Pós-12 comparado à avaliação Pós-8 (RF: $p=0,339$; VL: $p=0,502$) (Tabela 5).

A Figura 8 apresenta a variação percentual (dados normalizados pelos valores Pré-treino) de cada parâmetro de arquitetura muscular ao longo do programa de treinamento. A análise estatística não indicou interação significativa entre músculo e momento de avaliação para espessura muscular ($p=0,069$), ângulo de penação ($p=0,677$) ou comprimento de fascículo ($p=0,732$), demonstrando que os músculos RF e VL tiveram alterações relativas semelhantes ao longo da intervenção. Não foi observado efeito do músculo sobre esses três parâmetros de arquitetura muscular ($p=0,227$; $p=0,774$; $p=0,759$; respectivamente). Efeito do tempo foi observado na espessura muscular ($p<0,001$) e no comprimento de fascículo ($p<0,001$), mas não no ângulo de penação ($p=0,381$). Espessura muscular e comprimento de fascículo incrementaram significativamente de Pré-treino para Pós-

4 ($p<0,001$; $p=0,001$) e de Pós-4 para Pós-8 ($p=0,003$; $p<0,001$), mas não de Pós-8 para Pós-12 ($p=0,902$; $p=0,093$).

A Figura 9 ilustra as alterações na arquitetura muscular dos músculos RF e VL de um sujeito representativo da amostra por meio de imagens ultrassonográficas das avaliações Pré-treino e Pós-12. Salienta-se o nítido incremento da espessura de ambos os músculos da avaliação Pré-treino para a avaliação Pós-12.

Tabela 5. Espessura muscular (EM), ângulo de penação (AP) e comprimento de fascículo (CF) dos músculos reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) nos diferentes momentos de avaliação do estudo.

	Basal	Pré-treino	Pós-4	Pós-8	Pós-12
RF EM (cm)	2,01±0,34	2,01±0,35	2,15±0,35 *	2,20±2,20 *	2,19±0,33 *
AP (°)	8,48±1,85	8,70±1,87	8,55±1,43	8,42±1,48	8,67±1,35
CF (cm)	13,49±2,48	13,63±2,29	14,31±1,97 *	15,32±1,86 **	15,61±1,51 **
VL EM (cm)	2,61±0,24	2,59±0,23	2,72±0,23 *	2,75±0,25 *	2,77±0,29 *
AP (°)	17,18±2,54	17,28±2,50	17,79±2,50	17,02±2,78	17,15±2,58
CF (cm)	8,10±1,11	8,22±1,32	8,54±1,21 *	9,51±1,50 **	9,67±1,75 **

* diferente de Basal e Pré-treino ($p<0,05$); # diferente de Pós-4 ($p<0,05$).

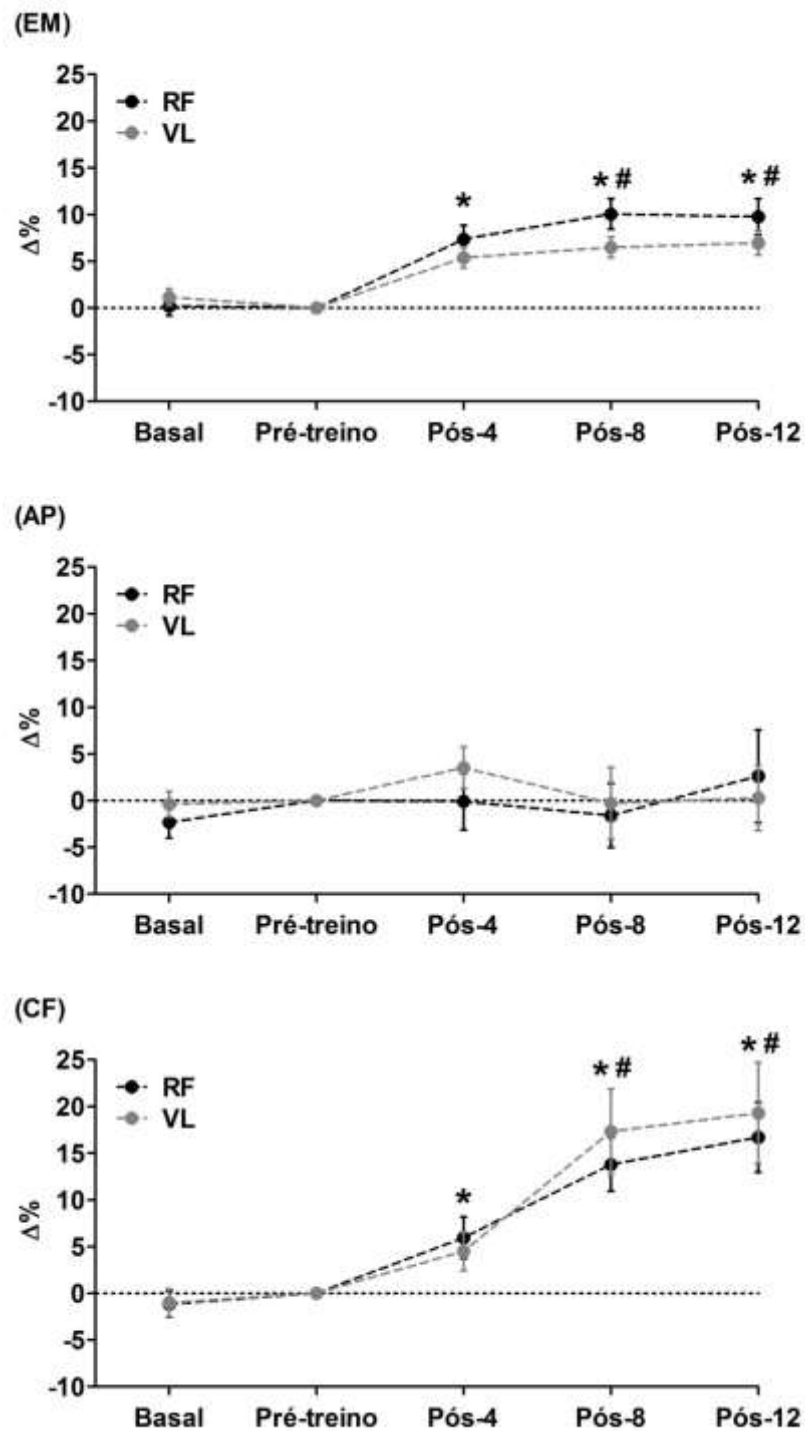


Figura 8. Alteração percentual ($\Delta\%$) na espessura muscular (EM), ângulo de penação (AP) e comprimento de fascículo (CF) dos músculos reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) ao longo do estudo. * diferente de Basal e Pré-treino ($p < 0,05$); # diferente de Pós-4 ($p < 0,05$).

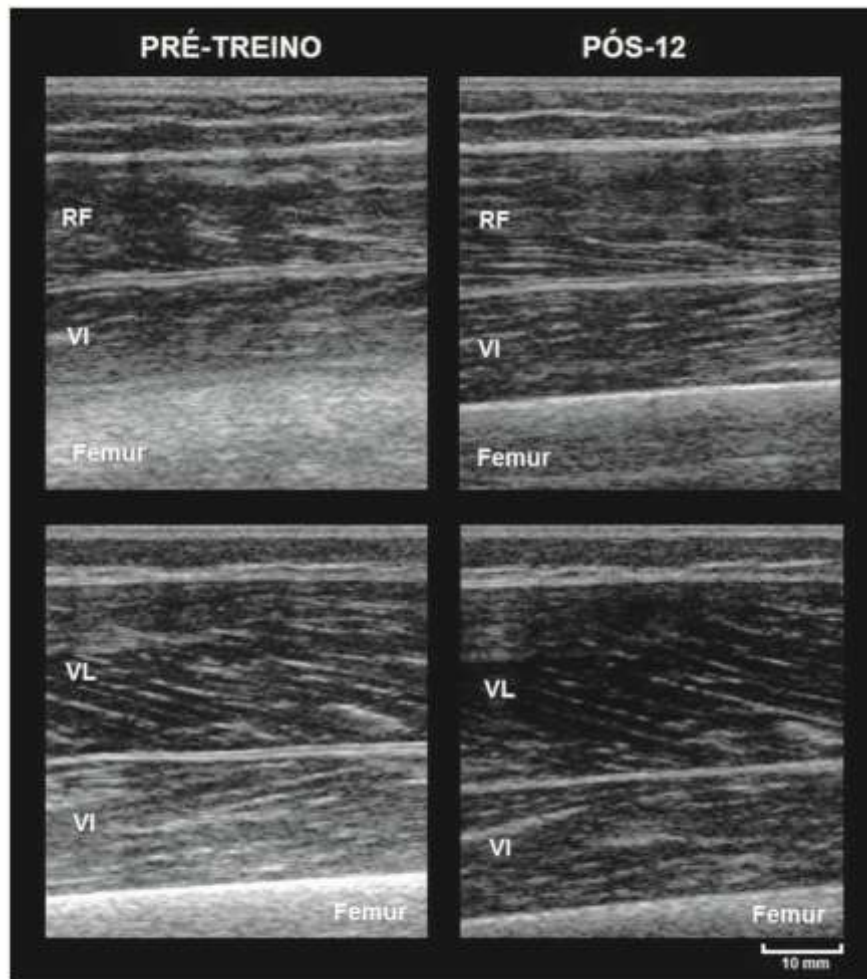


Figura 9. Imagens ultrassonográficas de um sujeito representativo da amostra exibindo a estrutura dos músculos reto femoral (RF) e vasto lateral (VL) antes (Pré-treino) e após (Pós-12) o programa de treinamento excêntrico de extensores de joelho.

DISCUSSÃO

O presente estudo avaliou e comparou as adaptações na geometria fascicular entre os músculos RF e VL ao longo de um programa de treinamento excêntrico. Os principais achados desse estudo foram que: (1) o treinamento excêntrico de extensores de joelho incrementou a espessura muscular e o comprimento fascicular dos músculos RF e VL, mas não produziu nenhuma alteração mensurável no ângulo de penação desses músculos; (2) um período de quatro semanas de treinamento foi

suficiente para promover adaptações significativas na arquitetura desses músculos; e (3) apesar das diferenças nas propriedades estruturais e funcionais dos músculos RF e do VL, não foram verificadas diferenças nas adaptações de geometria fascicular entre esses músculos sinergistas da extensão de joelho.

O desenho experimental adotado pelo presente estudo descartou a necessidade de um grupo controle não submetido a qualquer tipo intervenção, uma vez que todos os voluntários foram submetidos a um mesmo período controle imediatamente antes do programa de treinamento excêntrico. Os elevados valores de ICC e a ausência de diferenças estatisticamente significantes entre as avaliações Basal e Pré-treino confirmam a reprodutibilidade dos procedimentos de mensuração adotados no estudo, reforçando a confiabilidade dos resultados observados ao longo do período de treinamento.

O aumento da espessura muscular é uma resposta esperada ao treinamento de força ^{153,179}, de modo que essa adaptação pode ser atribuída ao incremento do ângulo de penação, incremento do comprimento de fascículo ou ambos. Nossa hipótese inicial era de que tanto o ângulo de penação quanto o comprimento fascicular do RF e do VL aumentariam devido às respectivas adições de sarcômeros alinhados em paralelo e em série em resposta ao dano muscular induzido pelo exercício excêntrico ^{8,104}. O incremento simultâneo do ângulo de penação e comprimento de fascículo devido ao treinamento excêntrico já foi reportado no músculo VL ²¹, embora a ausência de mudanças significativas nesses parâmetros de arquitetura muscular após um período de treinamento excêntrico também já tenha sido verificada nesse músculo ⁸⁹. No entanto, nossos achados estão em conformidade aos resultados reportados por Reeves et al. ⁸⁶, sugerindo que o aumento da espessura muscular devido ao treinamento excêntrico é atribuído ao incremento do comprimento fascicular, mas não ao aumento do ângulo de penação.

Uma vez que estudos prévios mostraram que o treinamento excêntrico é capaz de aumentar a área de secção transversa de fibras musculares ^{25,57,78}, nós esperávamos um incremento do ângulo de penação após o treinamento excêntrico em resposta ao processo hipertrófico ^{152,153}. Entretanto, estudos envolvendo o treino de força convencional e o treinamento excêntrico de extensores de joelho têm apresentado resultados conflitantes em relação às alterações no ângulo de penação.

Enquanto alguns estudos encontraram incrementos do ângulo de penação do VL após o treino de força convencional^{86,169,172,176}, outros não verificaram diferenças nesse parâmetro^{89,168}. Em relação ao treinamento excêntrico, Blazeovich et al.²¹ reportaram aumentos do ângulo de penação do VL, mas não do VM, enquanto outros estudos^{86,89} sugerem não haver modificações do ângulo de penação do VL com o treinamento excêntrico. É complicado determinar a razão desses resultados inconclusivos da literatura, mas uma possível explicação pode estar relacionada ao erro de medida associado à técnica de análise ultrassonográfica. Enquanto o treino de força convencional e o treinamento excêntrico parecem promover aumentos de aproximadamente 0,1-5,1° no ângulo de penação do VL^{21,86,89,168,169,172,176}, a análise ultrassonográfica apresenta um erro típico de 0,24-1,22°^{133,168}. Desse modo, a alteração do ângulo de penação devido ao treinamento normalmente se encontra dentro ou próxima à faixa de erro de mensuração da análise ultrassonográfica, o que poderia explicar porque alguns estudos encontraram incrementos em marcadores de hipertrofia (por exemplo, espessura muscular, ASTA, volume) sem concomitantes alterações no ângulo de penação.

Apesar de haver estudos com treino de força convencional que encontraram incrementos do comprimento fascicular do VL^{86,169}, a maioria dos trabalhos com esse tipo de treinamento não reportam alterações desse parâmetro após cinco^{168,172}, nove¹⁷⁶ ou mesmo 16⁸⁹ semanas de treinamento. Em contrapartida, Seynnes et al.⁶⁵ utilizaram um equipamento gravidade-independente com uma sobrecarga excêntrica mais forte do que a imposta pelos equipamentos de musculação convencionais para o treinamento de extensores de joelho e encontraram incrementos no comprimento fascicular do VL com apenas 10 dias de treinamento. O efeito das contrações excêntricas sobre o comprimento fascicular é suportado pelos estudos mostrando incremento desse parâmetro no músculo VL após cinco²¹, 10²¹ e 14⁸⁶ semanas de treinamento excêntrico, assim como reportado em relação ao bíceps femoral⁵⁵ e o gastrocnêmio medial⁴³ após sete e oito semanas de treinamento, respectivamente. De forma similar, estudos em modelo animal demonstraram a sarcomerogênese induzida pelo exercício excêntrico^{147,157}. Essa adaptação tem sido proposta como um mecanismo de proteção contra o dano muscular que seria causado por uma sessão subsequente de exercício excêntrico

¹⁰⁴, comumente associada ao efeito de sessões repetidas, descrito em detalhes na revisão de McHugh ¹¹¹.

Músculos com fibras mais longas são capazes de produzir maiores níveis de força em posições alongadas e apresentam maior velocidade de encurtamento que músculos com fibras mais curtas por possuírem um maior número de sarcômeros em série se contraindo simultaneamente ^{151,179}. O deslocamento do comprimento ótimo de produção de força em direção aos maiores comprimentos musculares ⁷² é interessante em uma perspectiva de prevenção de lesões musculares em atletas ¹³⁷, enquanto a maior velocidade de encurtamento das fibras mais longas ⁷⁸ melhora o desempenho esportivo por possibilitar a execução de movimentos com maior velocidade e potência ^{76,81}. Kumagai et al. ¹⁷⁸, por exemplo, demonstraram que corredores profissionais com a melhor marca na prova de 100 m rasos variando entre 10,0 e 10,9 s possuem fascículos mais longos nos músculos dos membros inferiores em comparação a corredores mais lentos (11,0-11,7 s na prova de 100 m), de modo que o comprimento de fascículo se mostrou significativamente correlacionado ao desempenho dos atletas. Além disso, o decréscimo do comprimento das fibras associado ao processo de sarcopenia ^{90,91} parece ser responsável por quase metade da diferença de velocidade de contração muscular entre jovens e idosos ¹⁸⁰, um efeito deletério do envelhecimento que poderia ser combatido com o treinamento excêntrico ^{81,86}. Nesse sentido, nossos achados sugerem que uma série de possíveis benefícios relacionados ao incremento do comprimento fascicular podem ser atingidos com períodos relativamente curtos de treinamento excêntrico dos músculos extensores de joelho.

Embora o VL apresente fibras mais longas e maiores ângulos de penação e ASTF ¹⁷⁷, o RF é um músculo bi-articular que não atinge seu máximo comprimento fisiológico durante exercícios de cadeia cinética aberta executados na posição sentado. Em outras palavras, cada músculo possui fatores favoráveis e contrários ao desenvolvimento do dano muscular induzido pelo exercício, os quais precisam ser levados em consideração de forma conjunta para se entender as respostas do RF e VL ao treinamento excêntrico. Assim, as semelhantes adaptações na geometria fascicular desses músculos encontradas no nosso estudo devem estar relacionadas

a uma similaridade na resposta específica do RF e VL ao tipo de exercício executado durante as sessões de treino.

Guilhem et al.¹³² demonstraram que o RF e o VL apresentam um padrão de ativação similar ao longo da amplitude de movimento em contrações excêntricas máximas realizadas no dinamômetro isocinético. Ambos os músculos tiveram um incremento progressivo da ativação de 30° a 65° de flexão de joelho, uma região de platô entre 65° e 75° (próximo a 80-90% da atividade eletromiográfica observada em contrações isométricas máximas de cada músculo), seguido por uma queda da ativação muscular entre os ângulos de 75° e 90° de flexão de joelho. Isso significa que os dois músculos foram recrutados para gerar força em um nível semelhante durante a amplitude de movimento do exercício excêntrico isocinético utilizado nas sessões de treino do nosso estudo. Dessa forma, a similaridade de ativação pode ser um importante fator que poderia explicar porque nem o RF e nem o VL apresentaram uma resposta morfológica mais exacerbada durante ou após o nosso programa de treinamento excêntrico.

O VL e os outros músculos uni-articulares do complexo extensor do joelho possuem fibras mais longas que o RF¹⁷⁷. Porém, estudos com corredores^{181,182} evidenciaram que tanto os músculos mono- quanto os bi-articulares não atingem os comprimentos mais críticos da relação força-comprimento durante contrações executadas na posição sentada até 90° de flexão de joelho. Isso significa que o programa de treinamento excêntrico realizado em nosso estudo (30° a 90° de flexão de joelho) provavelmente representou um exercício que não atingiu os comprimentos mais vulneráveis ao dano muscular dos músculos RF e VL¹⁴⁴. Assim, caso esses músculos tenham sido exercitados em uma porção semelhante da relação força-comprimento (ou seja, fase ascendente, região de platô e, talvez, parte inicial da fase descendente), esses músculos podem ter experienciado índices semelhantes de dano muscular induzido pelo exercício após as sessões de treino, o que poderia explicar as similares adaptações na arquitetura muscular.

É interessante notar que exercícios voltados ao fortalecimento do quadríceps femoral realizados em cadeia cinética aberta e fechada conduzem a respostas agudas distintas¹⁸³, assim como exercícios de cadeia cinética aberta executados em condições isotônicas e isocinéticas¹³². Em outras palavras, outros tipos de exercício

de extensão de joelho provavelmente produziriam distintas magnitudes de adaptação em relação às observadas em nosso estudo. Portanto, embasado nas evidências prévias de que as adaptações ao treinamento excêntrico levam a importantes implicações clínicas para a prevenção e reabilitação de lesões musculoesqueléticas, desempenho de atletas e funcionalidade de indivíduos idosos, é importante determinar a contribuição de cada variável do treinamento (por exemplo, tipo de exercício, amplitude de movimento, velocidade angular, volume de treino, etc.) para as respostas do sistema neuromuscular com o intuito de potencializar os benefícios desse tipo de exercício.

Em conclusão, os resultados do presente estudo demonstraram que o aumento da espessura muscular do RF e do VL em resposta ao treinamento excêntrico de extensores de joelho foi relacionado ao incremento do comprimento fascicular e não a alguma alteração mensurável do ângulo de penação. As adaptações na arquitetura muscular de extensores de joelho puderam ser identificadas com apenas quatro semanas de treinamento excêntrico. Mesmo que os músculos RF e VL apresentem diferenças marcantes em sua configuração geométrica e funcionalidade, um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico realizado com exercício de cadeia cinética aberta em dinamômetro isocinético não provocou adaptações heterogêneas entre esses músculos sinergistas da extensão de joelho.

CONCLUSÕES DA TESE

O estudo de revisão da literatura compilou informações de 26 artigos originais acerca do treinamento excêntrico de extensores de joelho em sujeitos saudáveis. Foram apresentados os métodos implementados pelos pesquisadores nos programas de treinamento excêntrico, de modo a abordar aspectos relacionados à periodização dos programas de treinamento e às particularidades do exercício realizado em condições isocinéticas e isotônicas. Espera-se que essas informações auxiliem pesquisadores e profissionais de saúde no planejamento, prescrição e monitoramento dos programas de treinamento excêntrico para o músculo quadríceps femoral.

O estudo de revisão também focou sua atenção sobre as adaptações induzidas pelo treinamento excêntrico na força, ativação e estrutura dos músculos extensores de joelho. Embora uma série de aspectos relacionados às respostas neuromusculares ao treinamento excêntrico tenha sido contemplada pelos estudos avaliados, os achados da literatura não permitiam que fosse determinado o comportamento temporal das adaptações do sistema neuromuscular. Resultados controversos foram encontrados em relação às modificações promovidas na arquitetura muscular e uma lacuna foi identificada em relação à adaptação específica de cada músculo extensor de joelho. Esses aspectos serviram de motivação para o desenvolvimento dos dois estudos originais que compõem a presente tese de Doutorado.

Apesar de o exercício excêntrico ser comumente proposto como uma alternativa de treinamento para diferentes populações, entre as quais atletas, idosos e indivíduos em reabilitação musculoesquelética, nossos estudos originais foram desenvolvidos com adultos saudáveis destreinados e em condições isocinéticas. Temos ciência de que um programa de treinamento excêntrico desenvolvido em condições isotônicas e/ou com sujeitos pertencentes às populações supramencionadas, assim como a utilização de testes de campo de desempenho físico/esportivo ou testes clínicos de funcionalidade, poderiam prover informações mais diretamente aplicáveis à atuação dos profissionais de saúde. No entanto, os

estudos originais que integram o presente documento não foram desenvolvidos com a intenção de propor um protocolo de treinamento excêntrico para ser aplicado nessas populações. Nossa linha de investigação possui um caráter um pouco mais básico, de modo que nossos estudos são voltados à compreensão de alguns dos mecanismos que conduzem aos benefícios almejados pelos clínicos.

Nossos resultados reforçam a premissa de que o treinamento excêntrico possui um forte efeito de especificidade sobre os incrementos de força e ativação muscular. Apesar de o treinamento excêntrico ser capaz de aumentar a força concêntrica, essa resposta não pode ser atribuída a adaptações de ordem neural. O aumento de força isométrica e excêntrica pode ser em grande parte explicado pela soma dos incrementos de ativação e massa muscular, mas nossos resultados sugerem que outros mecanismos contribuem para o ganho de força em fases mais avançadas de um programa de treinamento excêntrico. O aumento da espessura dos músculos RF e VL ocorre em função do aumento do comprimento de fascículo e não do ângulo de penetração fascicular. Além disso, embora esses músculos apresentem propriedades estruturais e funcionais distintas, a magnitude e cronologia das modificações na geometria fascicular induzidas por um programa de treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético é semelhante.

Por fim, conclui-se que a ação excêntrica não pode ser considerada simplesmente uma contração muscular executada no sentido contrário à ação concêntrica. Exercícios excêntricos possuem respostas agudas específicas e, quando realizados de forma sistematizada, conduzem a adaptações específicas na ativação, estrutura e capacidade de produção de força do músculo esquelético. Essas adaptações do sistema neuromuscular podem ter repercussões importantes sobre a funcionalidade do indivíduo, de modo que estudos futuros devem concentrar sua atenção sobre a definição dos protocolos de treinamento mais eficientes para cada tipo de população.

REFERÊNCIAS

1. ACSM. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009;41(3):687-708.
2. Moritani T, deVries HA. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med* 1979;58(3):115-130.
3. Badillo JJG, Ayestarán E. Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo. Barcelona: INDE Publicaciones; 2002.
4. Sale DG. Neural Adaptation to Strength Training. . In: Komi P, editor. *Strength and Power in Sport: Olympic Encyclopedia of Sports Medicine, Volume III*. 2nd ed. Oxford, UK: Blackwell Science; 2003.
5. Gabriel DA, Kamen G, Frost G. Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices. *Sports Med* 2006;36(2):133-149.
6. MacDougall JD. Hypertrophy and Hyperplasia. In: Komi P, editor. *Strength and Power in Sport: Olympic Encyclopedia of Sports Medicine, Volume III* 2nd ed. Oxford, UK: Blackwell Science; 2003.
7. Wernbom M, Augustsson J, Thomee R. The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med* 2007;37(3):225-264.
8. Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *J Strength Cond Res* 2010;24(10):2857-2872.
9. Edman KA, Elzinga G, Noble MI. Enhancement of mechanical performance by stretch during tetanic contractions of vertebrate skeletal muscle fibres. *The Journal of physiology* 1978;281:139-155.
10. Edman KA. Double-hyperbolic force-velocity relation in frog muscle fibres. *The Journal of physiology* 1988;404:301-321.
11. Harry JD, Ward AW, Heglund NC, Morgan DL, McMahon TA. Cross-bridge cycling theories cannot explain high-speed lengthening behavior in frog muscle. *Biophys J* 1990;57(2):201-208.

12. Lombardi V, Piazzesi G. The contractile response during steady lengthening of stimulated frog muscle fibres. *The Journal of physiology* 1990;431:141-171.
13. Thomson DB, Chapman AE. The mechanical response of active human muscle during and after stretch. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1988;57(6):691-697.
14. Dudley GA, Harris RT, Duvoisin MR, Hather BM, Buchanan P. Effect of voluntary vs. artificial activation on the relationship of muscle torque to speed. *J Appl Physiol* 1990;69(6):2215-2221.
15. Westing SH, Seger JY, Thorstensson A. Effects of electrical stimulation on eccentric and concentric torque-velocity relationships during knee extension in man. *Acta Physiol Scand* 1990;140(1):17-22.
16. Gulch RW, Fuchs P, Geist A, Eisold M, Heitkamp HC. Eccentric and posteccentric contractile behaviour of skeletal muscle: a comparative study in frog single fibres and in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991;63(5):323-329.
17. Webber S, Kriellaars D. Neuromuscular factors contributing to in vivo eccentric moment generation. *J Appl Physiol* 1997;83(1):40-45.
18. Baroni BM, Stocchero CMA, Santo RCE, Ritzel CH, Vaz MA. The effect of contraction type on muscle strength, work and fatigue in maximal isokinetic exercise. *Isokinetics and Exercise Science* 2011;19(3):215-220.
19. Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(4):674-688.
20. Ben-Sira D, Ayalon A, Tavi M. The effects of different types of strength training on concentric strength in women. *J Strength Cond Res* 1995;9(3):143-148.
21. Blazevich AJ, Cannavan D, Coleman DR, Horne S. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol* 2007;103(5):1565-1575.
22. Blazevich AJ, Horne S, Cannavan D, Coleman DR, Aagaard P. Effect of contraction mode of slow-speed resistance training on the maximum rate of force development in the human quadriceps. *Muscle Nerve* 2008;38(3):1133-1146.

23. Higbie EJ, Cureton KJ, Warren GL, 3rd, Prior BM. Effects of concentric and eccentric training on muscle strength, cross-sectional area, and neural activation. *J Appl Physiol* 1996;81(5):2173-2181.
24. Hortobagyi T, Barrier J, Beard D, Braspennincx J, Koens P, Devita P, Dempsey L, Lambert J. Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. *J Appl Physiol* 1996b;81(4):1677-1682.
25. Hortobagyi T, Hill JP, Houmard JA, Fraser DD, Lambert NJ, Israel RG. Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J Appl Physiol* 1996a;80(3):765-772.
26. Housh DJ, Housh TJ, Weir JP, Weir LL, Evetovich TK, Donlin PE. Effects of unilateral eccentric-only dynamic constant external resistance training on quadriceps femoris cross-sectional area. *J Strength Cond Res* 1998;12(3):192-198.
27. Mahieu NN, McNair P, Cools A, D'Haen C, Vandermeulen K, Witvrouw E. Effect of eccentric training on the plantar flexor muscle-tendon tissue properties. *Med Sci Sports Exerc* 2008;40(1):117-123.
28. Miller LE, Pierson LM, Nickols-Richardson SM, Wootten DF, Selmon SE, Ramp WK, Herbert WG. Knee extensor and flexor torque development with concentric and eccentric isokinetic training. *Res Q Exerc Sport* 2006;77(1):58-63.
29. Nickols-Richardson SM, Miller LE, Wootten DF, Ramp WK, Herbert WG. Concentric and eccentric isokinetic resistance training similarly increases muscular strength, fat-free soft tissue mass, and specific bone mineral measurements in young women. *Osteoporos Int* 2007;18(6):789-796.
30. Poletto PR, Santos HH, Salvini TF, Coury HJCG, Hansson GA. Peak torque and knee kinematics during gait after eccentric isokinetic training of quadriceps in healthy subjects. *Rev Bras Fisioter* 2008;12(4):331-337.
31. Raue U, Terpstra B, Williamson DL, Gallagher PM, Trappe SW. Effects of short-term concentric vs. eccentric resistance training on single muscle fiber MHC distribution in humans. *Int J Sports Med* 2005;26(5):339-343.
32. Rocha CSS, Baroni BM, Lanferdini FJ, Freitas CR, Frasson VB, Vaz MA. Specificity of strength gains after 12 weeks of isokinetic eccentric training in healthy men. *Isokinetics and Exercise Science* 2011;19(3):221-226.

33. Santos HH, Avila MA, Hanashiro DN, Camargo PR, Salvini TF. The effects of knee extensor eccentric training on functional tests in healthy subjects. *Rev Bras Fisioter* 2010;14(4):276-283.
34. Schroeder ET, Hawkins SA, Jaque SV. Musculoskeletal adaptations to 16 weeks of eccentric progressive resistance training in young women. *J Strength Cond Res* 2004;18(2):227-235.
35. Seger JY, Arvidsson B, Thorstensson A. Specific effects of eccentric and concentric training on muscle strength and morphology in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1998;79(1):49-57.
36. Seger JY, Thorstensson A. Effects of eccentric versus concentric training on thigh muscle strength and EMG. *Int J Sports Med* 2005;26(1):45-52.
37. Smith RC, Rutherford OM. The role of metabolites in strength training. I. A comparison of eccentric and concentric contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1995;71(4):332-336.
38. Sorichter S, Mair J, Koller A, Secnik P, Parrak V, Haid C, Muller E, Puschendorf B. Muscular adaptation and strength during the early phase of eccentric training: influence of the training frequency. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29(12):1646-1652.
39. Spurway NC, Watson H, McMillan K, Connolly G. The effect of strength training on the apparent inhibition of eccentric force production in voluntarily activated human quadriceps. *Eur J Appl Physiol* 2000;82(5-6):374-380.
40. Tomberlin JP, Basford JR, Schwen EE, Orte PA, Scott SC, Laughman RK, Ilstrup DM. Comparative study of isokinetic eccentric and concentric quadriceps training. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 1991;14(1):31-36.
41. Weir JP, Housh DJ, Housh TJ, Weir LL. The effect of unilateral eccentric weight training and detraining on joint angle specificity, cross-training, and the bilateral deficit. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 1995;22(5):207-215.
42. Colson S, Pousson M, Martin A, Van Hoecke J. Isokinetic elbow flexion and coactivation following eccentric training. *Journal of electromyography and*

kinesiology : official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology 1999;9(1):13-20.

43. Duclay J, Martin A, Duclay A, Cometti G, Pousson M. Behavior of fascicles and the myotendinous junction of human medial gastrocnemius following eccentric strength training. *Muscle Nerve* 2009;39(6):819-827.
44. Kaminski TW, Wabbersen CV, Murphy RM. Concentric versus enhanced eccentric hamstring strength training: clinical implications. *Journal of athletic training* 1998;33(3):216-221.
45. Mayhew TP, Rothstein JM, Finucane SD, Lamb RL. Muscular adaptation to concentric and eccentric exercise at equal power levels. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27(6):868-873.
46. Martin A, Martin L, Morlon B. Changes induced by eccentric training on force-velocity relationships of the elbow flexor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1995;72(1-2):183-185.
47. Michaut A, Babault N, Pousson M. Specific effects of eccentric training on muscular fatigability. *Int J Sports Med* 2004;25(4):278-283.
48. Miller LE, Wootten DF, Nickols-Richardson SM, Ramp WK, Steele CR, Cotton JR, Carneal JP, Herbert WG. Isokinetic training increases ulnar bending stiffness and bone mineral in young women. *Bone* 2007;41(4):685-689.
49. Moore DR, Young M, Phillips SM. Similar increases in muscle size and strength in young men after training with maximal shortening or lengthening contractions when matched for total work. *Eur J Appl Physiol*.
50. Mouraux D, Stallenberg B, Dugaillya PM, Brassinne E. The effect of submaximal eccentric isokinetic training on strength and cross sectional area of the human achilles tendon. *Isokinetics and Exercise Science* 2000;8:161-167.
51. Nosaka K, Newton M. Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34(1):63-69.
52. Nelson RT, Bandy WD. Eccentric Training and Static Stretching Improve Hamstring Flexibility of High School Males. *Journal of athletic training* 2004;39(3):254-258.

53. Paddon-Jones D, Leveritt M, Lonergan A, Abernethy P. Adaptation to chronic eccentric exercise in humans: the influence of contraction velocity. *Eur J Appl Physiol* 2001;85(5):466-471.
54. Pensini M, Martin A, Maffiuletti NA. Central versus peripheral adaptations following eccentric resistance training. *Int J Sports Med* 2002;23(8):567-574.
55. Potier TG, Alexander CM, Seynnes OR. Effects of eccentric strength training on biceps femoris muscle architecture and knee joint range of movement. *Eur J Appl Physiol* 2009;105(6):939-944.
56. Pousson M, Van Hoecke J, Goubel F. Changes in elastic characteristics of human muscle induced by eccentric exercise. *Journal of biomechanics* 1990;23(4):343-348.
57. Shepstone TN, Tang JE, Dallaire S, Schuenke MD, Staron RS, Phillips SM. Short-term high- vs. low-velocity isokinetic lengthening training results in greater hypertrophy of the elbow flexors in young men. *J Appl Physiol* 2005;98(5):1768-1776.
58. Hortobagyi T, Devita P, Money J, Barrier J. Effects of standard and eccentric overload strength training in young women. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(7):1206-1212.
59. Kilgallon M, Donnelly AE, Shafat A. Progressive resistance training temporarily alters hamstring torque-angle relationship. *Scand J Med Sci Sports* 2007;17(1):18-24.
60. Krentz JR, Farthing JP. Neural and morphological changes in response to a 20-day intense eccentric training protocol. *Eur J Appl Physiol* 2010;110(2):333-340.
61. Elmer S, Hahn S, McAllister P, Leong C, Martin J. Improvements in multi-joint leg function following chronic eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports*.
62. Flann KL, LaStayo PC, McClain DA, Hazel M, Lindstedt SL. Muscle damage and muscle remodeling: no pain, no gain? *The Journal of experimental biology* 2011;214(Pt 4):674-679.
63. Lastayo PC, Reich TE, Urquhart M, Hoppeler H, Lindstedt SL. Chronic eccentric exercise: improvements in muscle strength can occur with little demand for oxygen. *The American journal of physiology* 1999;276(2 Pt 2):R611-615.

64. Norrbrand L, Fluckey JD, Pozzo M, Tesch PA. Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *Eur J Appl Physiol* 2008;102(3):271-281.
65. Seynnes OR, de Boer M, Narici MV. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *J Appl Physiol* 2007;102(1):368-373.
66. Barstow IK, Bishop MD, Kaminski TW. Is enhanced-eccentric resistance training superior to traditional training for increasing elbow flexor strength? *Journal of Sports Science and Medicine* 2003;2:62-69.
67. Farthing JP, Chilibeck PD. The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *Eur J Appl Physiol* 2003a;89(6):578-586.
68. Farthing JP, Chilibeck PD. The effect of eccentric training at different velocities on cross-education. *Eur J Appl Physiol* 2003b;89(6):570-577.
69. Gillies EM, Putman CT, Bell GJ. The effect of varying the time of concentric and eccentric muscle actions during resistance training on skeletal muscle adaptations in women. *Eur J Appl Physiol* 2006;97(4):443-453.
70. Hortobagyi T, Lambert NJ, Hill JP. Greater cross education following training with muscle lengthening than shortening. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29(1):107-112.
71. Morrissey D, Roskilly A, Twycross-Lewis R, Isinkaye T, Screen H, Woledge R, Bader D. The effect of eccentric and concentric calf muscle training on Achilles tendon stiffness. *Clinical rehabilitation* 2011;25(3):238-247.
72. Brughelli M, Mendiguchia J, Nosaka K, Idoate F, Arcos AL, Cronin J. Effects of eccentric exercise on optimum length of the knee flexors and extensors during the preseason in professional soccer players. *Phys Ther Sport* 2010;11(2):50-55.
73. Friedmann-Bette B, Bauer T, Kinscherf R, Vorwald S, Klute K, Bischoff D, Muller H, Weber MA, Metz J, Kauczor HU, Bartsch P, Billeter R. Effects of strength training with eccentric overload on muscle adaptation in male athletes. *Eur J Appl Physiol* 2010;108(4):821-836.

74. Jonhagen S, Ackermann P, Saartok T. Forward lunge: a training study of eccentric exercises of the lower limbs. *J Strength Cond Res* 2009;23(3):972-978.
75. Mjolsnes R, Arnason A, Osthagen T, Raastad T, Bahr R. A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players. *Scand J Med Sci Sports* 2004;14(5):311-317.
76. Mont MA, Cohen DB, Campbell KR, Gravare K, Mathur SK. Isokinetic concentric versus eccentric training of shoulder rotators with functional evaluation of performance enhancement in elite tennis players. *Am J Sports Med* 1994;22(4):513-517.
77. Petersen J, Thorborg K, Nielsen MB, Budtz-Jorgensen E, Holmich P. Preventive effect of eccentric training on acute hamstring injuries in men's soccer: a cluster-randomized controlled trial. *Am J Sports Med*;39(11):2296-2303.
78. Vikne H, Refsnes PE, Ekmark M, Medbo JI, Gundersen V, Gundersen K. Muscular performance after concentric and eccentric exercise in trained men. *Med Sci Sports Exerc* 2006;38(10):1770-1781.
79. Hortobagyi T, DeVita P. Favorable neuromuscular and cardiovascular responses to 7 days of exercise with an eccentric overload in elderly women. *The journals of gerontology Series A, Biological sciences and medical sciences* 2000;55(8):B401-410.
80. LaStayo PC, Ewy GA, Pierotti DD, Johns RK, Lindstedt S. The positive effects of negative work: increased muscle strength and decreased fall risk in a frail elderly population. *The journals of gerontology Series A, Biological sciences and medical sciences* 2003;58(5):M419-424.
81. Valour D, Rouji M, Pousson M. Effects of eccentric training on torque-angular velocity-power characteristics of elbow flexor muscles in older women. *Experimental gerontology* 2004;39(3):359-368.
82. Symons TB, Vandervoort AA, Rice CL, Overend TJ, Marsh GD. Effects of maximal isometric and isokinetic resistance training on strength and functional mobility in older adults. *The journals of gerontology Series A, Biological sciences and medical sciences* 2005;60(6):777-781.

83. Melo RC, Quiterio RJ, Takahashi AC, Silva E, Martins LE, Catai AM. High eccentric strength training reduces heart rate variability in healthy older men. *British journal of sports medicine* 2008;42(1):59-63.
84. Onambele GL, Maganaris CN, Mian OS, Tam E, Rejc E, McEwan IM, Narici MV. Neuromuscular and balance responses to flywheel inertial versus weight training in older persons. *Journal of biomechanics* 2008;41(15):3133-3138.
85. Mueller M, Breil FA, Vogt M, Steiner R, Lippuner K, Popp A, Klossner S, Hoppeler H, Dapp C. Different response to eccentric and concentric training in older men and women. *Eur J Appl Physiol* 2009;107(2):145-153.
86. Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Experimental physiology* 2009;94(7):825-833.
87. Mueller M, Breil FA, Lurman G, Klossner S, Fluck M, Billeter R, Dapp C, Hoppeler H. Different molecular and structural adaptations with eccentric and conventional strength training in elderly men and women. *Gerontology* 2011;57(6):528-538.
88. Purtsi J, Vihko V, Kankaanpaa A, Havas E. The motor-learning process of older adults in eccentric bicycle ergometer training. *J Aging Phys Act* 2012;20(3):345-362.
89. Raj IS, Bird SR, Westfold BA, Shield AJ. Effects of eccentrically biased versus conventional weight training in older adults. *Med Sci Sports Exerc* 2012;44(6):1167-1176.
90. Vandervoort AA. Aging of the human neuromuscular system. *Muscle Nerve* 2002;25(1):17-25.
91. Doherty TJ. Invited review: Aging and sarcopenia. *J Appl Physiol* 2003;95(4):1717-1727.
92. Stone MH, Karatzaferi C. Connective Tissue and Bone Response to Strength Training. In: Komi P, editor. *Strength and Power in Sport: Olympic Encyclopedia of Sports Medicine*, Volume III. 2nd ed. Oxford, UK: Blackwell Science; 2003.
93. Pull MG, Ranson C. Eccentric muscle actions: Implications for injury prevention and rehabilitation. *Physical Therapy in Sport* 2007;8:88-97.

94. Lorenz D, Reiman M. The role and implementation of eccentric training in athletic rehabilitation: tendinopathy, hamstring strains, and acl reconstruction. *International journal of sports physical therapy* 2011;6(1):27-44.
95. LaStayo PC, Woolf JM, Lewek MD, Snyder-Mackler L, Reich T, Lindstedt SL. Eccentric muscle contractions: their contribution to injury, prevention, rehabilitation, and sport. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 2003;33(10):557-571.
96. Guilhem G, Cornu C, Guevel A. Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise. *Ann Phys Rehabil Med* 2010a;53(5):319-341.
97. McHugh MP, Tyler TF, Greenberg SC, Gleim GW. Differences in activation patterns between eccentric and concentric quadriceps contractions. *J Sports Sci* 2002;20(2):83-91.
98. Linnamo V, Moritani T, Nicol C, Komi PV. Motor unit activation patterns during isometric, concentric and eccentric actions at different force levels. *Journal of electromyography and kinesiology : official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 2003;13(1):93-101.
99. Moritani T, Muramatsu S, Muro M. Activity of motor units during concentric and eccentric contractions. *Am J Phys Med* 1987;66(6):338-350.
100. Westing SH, Cresswell AG, Thorstensson A. Muscle activation during maximal voluntary eccentric and concentric knee extension. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991;62(2):104-108.
101. Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J, Dyhre-Poulsen P. Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction: effects of resistance training. *J Appl Physiol* 2000;89(6):2249-2257.
102. Enoka RM. Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *J Appl Physiol* 1996;81(6):2339-2346.
103. Friden J, Lieber RL. Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiol Scand* 2001;171(3):321-326.

104. Proske U, Morgan DL. Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of physiology* 2001;537(Pt 2):333-345.
105. Clarkson PM, Hubal MJ. Exercise-induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil* 2002;81(11 Suppl):S52-69.
106. Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: theoretical and applied implications. *Sports Med* 2004;34(1):49-69.
107. Morgan DL, Allen DG. Early events in stretch-induced muscle damage. *J Appl Physiol* 1999;87(6):2007-2015.
108. Allen DG. Eccentric muscle damage: mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiol Scand* 2001;171(3):311-319.
109. Cheung K, Hume P, Maxwell L. Delayed onset muscle soreness : treatment strategies and performance factors. *Sports Med* 2003;33(2):145-164.
110. Howatson G, van Someren KA. The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med* 2008;38(6):483-503.
111. McHugh MP. Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: the protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports* 2003;13(2):88-97.
112. McHugh MP, Tetro DT. Changes in the relationship between joint angle and torque production associated with the repeated bout effect. *J Sports Sci* 2003;21(11):927-932.
113. Howatson G, Van Someren K, Hortobagyi T. Repeated bout effect after maximal eccentric exercise. *Int J Sports Med* 2007;28(7):557-563.
114. Chen TC, Chen HL, Lin MJ, Wu CJ, Nosaka K. Muscle damage responses of the elbow flexors to four maximal eccentric exercise bouts performed every 4 weeks. *Eur J Appl Physiol* 2009;106(2):267-275.
115. Foley JM, Jayaraman RC, Prior BM, Pivarnik JM, Meyer RA. MR measurements of muscle damage and adaptation after eccentric exercise. *J Appl Physiol* 1999;87(6):2311-2318.

116. Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. How long does the protective effect on eccentric exercise-induced muscle damage last? *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(9):1490-1495.
117. Nosaka K, Newton MJ, Sacco P. Attenuation of protective effect against eccentric exercise-induced muscle damage. *Can J Appl Physiol* 2005;30(5):529-542.
118. Petersen J, Thorborg K, Nielsen MB, Budtz-Jorgensen E, Holmich P. Preventive effect of eccentric training on acute hamstring injuries in men's soccer: a cluster-randomized controlled trial. *Am J Sports Med* 2011;39(11):2296-2303.
119. Askling C, Karlsson J, Thorstensson A. Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scand J Med Sci Sports* 2003;13(4):244-250.
120. Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Hamstring strain injuries: factors that lead to injury and re-injury. *Sports Med* 2012;42(3):209-226.
121. Alfredson H, Pietila T, Jonsson P, Lorentzon R. Heavy-load eccentric calf muscle training for the treatment of chronic Achilles tendinosis. *Am J Sports Med* 1998;26(3):360-366.
122. Fredberg U, Bolvig L, Andersen NT. Prophylactic training in asymptomatic soccer players with ultrasonographic abnormalities in Achilles and patellar tendons: the Danish Super League Study. *Am J Sports Med* 2008;36(3):451-460.
123. van der Plas A, de Jonge S, de Vos RJ, van der Heide HJ, Verhaar JA, Weir A, Tol JL. A 5-year follow-up study of Alfredson's heel-drop exercise programme in chronic midportion Achilles tendinopathy. *British journal of sports medicine* 2012;46(3):214-218.
124. Coury HJ, Brasileiro JS, Salvini TF, Poletto PR, Carnaz L, Hansson GA. Change in knee kinematics during gait after eccentric isokinetic training for quadriceps in subjects submitted to anterior cruciate ligament reconstruction. *Gait & posture* 2006;24(3):370-374.
125. Gerber JP, Marcus RL, Dibble LE, Greis PE, Burks RT, Lastayo PC. Safety, feasibility, and efficacy of negative work exercise via eccentric muscle activity

- following anterior cruciate ligament reconstruction. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 2007;37(1):10-18.
126. Gerber JP, Marcus RL, Dibble LE, Greis PE, Burks RT, LaStayo PC. Effects of early progressive eccentric exercise on muscle size and function after anterior cruciate ligament reconstruction: a 1-year follow-up study of a randomized clinical trial. *Physical therapy* 2009;89(1):51-59.
127. Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, Reid WD. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *British journal of sports medicine* 2009;43(8):556-568.
128. Jamurtas AZ, Theocharis V, Tofas T, Tsiokanos A, Yfanti C, Paschalis V, Koutedakis Y, Nosaka K. Comparison between leg and arm eccentric exercises of the same relative intensity on indices of muscle damage. *Eur J Appl Physiol* 2005;95(2-3):179-185.
129. Chen TC, Lin KY, Chen HL, Lin MJ, Nosaka K. Comparison in eccentric exercise-induced muscle damage among four limb muscles. *Eur J Appl Physiol* 2011;111(2):211-223.
130. Escamilla RF, Fleisig GS, Zheng N, Lander JE, Barrentine SW, Andrews JR, Bergemann BW, Moorman CT, 3rd. Effects of technique variations on knee biomechanics during the squat and leg press. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(9):1552-1566.
131. Stensdotter AK, Hodges PW, Mellor R, Sundelin G, Hager-Ross C. Quadriceps activation in closed and in open kinetic chain exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35(12):2043-2047.
132. Guilhem G, Cornu C, Guevel A. Muscle architecture and EMG activity changes during isotonic and isokinetic eccentric exercises. *Eur J Appl Physiol* 2011;111(11):2723-2733.
133. Blazeovich AJ, Gill ND, Zhou S. Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo. *J Anat* 2006;209(3):289-310.
134. Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D. Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles. An autopsy study. *Journal of the neurological sciences* 1973;18(1):111-129.

135. Bax L, Staes F, Verhagen A. Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris? A systematic review of randomised controlled trials. *Sports Med* 2005;35(3):191-212.
136. Faulkner JA. Terminology for contractions of muscles during shortening, while isometric, and during lengthening. *J Appl Physiol* 2003;95(2):455-459.
137. Gabbe BJ, Branson R, Bennell KL. A pilot randomised controlled trial of eccentric exercise to prevent hamstring injuries in community-level Australian Football. *J Sci Med Sport* 2006;9(1-2):103-109.
138. Guilhem G, Cornu C, Nordez A, Guevel A. A new device to study isolated eccentric exercise. *J Strength Cond Res* 2010b;24(12):3476-3483.
139. Padulo J, Mignogna P, Mignardi S, Tonni F, D'Ottavio S. Effect of different pushing speeds on bench press. *Int J Sports Med* 2012;33(5):376-380.
140. Brown LE. *Isokinetics in human performance*. Champaign, IL: Human Kinetics; 2000.
141. Kannus P. Isokinetic evaluation of muscular performance: implications for muscle testing and rehabilitation. *Int J Sports Med* 1994;15 Suppl 1:S11-18.
142. Hoeger WWK, Hopkins DR, Barette SL, Hale DF. Relationship between repetitions and selected percentages of one repetition maximum: a comparison between untrained and trained males and females. *Journal of Applied Sport Science Research* 1990;4(2):47-54.
143. Fleming BC, Oksendahl H, Beynon BD. Open- or closed-kinetic chain exercises after anterior cruciate ligament reconstruction? *Exercise and sport sciences reviews* 2005;33(3):134-140.
144. Nosaka K, Sakamoto K. Effect of elbow joint angle on the magnitude of muscle damage to the elbow flexors. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(1):22-29.
145. Chapman D, Newton M, Sacco P, Nosaka K. Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *Int J Sports Med* 2006;27(8):591-598.
146. Wilson GJ, Murphy AJ. The use of isometric tests of muscular function in athletic assessment. *Sports Med* 1996;22(1):19-37.

147. Butterfield TA, Leonard TR, Herzog W. Differential serial sarcomere number adaptations in knee extensor muscles of rats is contraction type dependent. *J Appl Physiol* 2005;99(4):1352-1358.
148. Kubo K, Ikebukuro T, Yata H, Tsunoda N, Kanehisa H. Time course of changes in muscle and tendon properties during strength training and detraining. *J Strength Cond Res* 2010;24(2):322-331.
149. de Boer MD, Maganaris CN, Seynnes OR, Rennie MJ, Narici MV. Time course of muscular, neural and tendinous adaptations to 23 day unilateral lower-limb suspension in young men. *The Journal of physiology* 2007;583(Pt 3):1079-1091.
150. De Luca CJ. The use of surface electromyography in biomechanics. *J Appl Biomech* 1997;13(2):135-163.
151. Lieber RL, Friden J. Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve* 2000;23(11):1647-1666.
152. Fukunaga T, Kawakami Y, Kuno S, Funato K, Fukashiro S. Muscle architecture and function in humans. *Journal of biomechanics* 1997;30(5):457-463.
153. Blazevich AJ, Sharp NC. Understanding muscle architectural adaptation: macro- and micro-level research. *Cells Tissues Organs* 2005;181(1):1-10.
154. Kadi F, Thornell LE. Concomitant increases in myonuclear and satellite cell content in female trapezius muscle following strength training. *Histochem Cell Biol* 2000;113(2):99-103.
155. Lavender AP, Nosaka K. Changes in fluctuation of isometric force following eccentric and concentric exercise of the elbow flexors. *Eur J Appl Physiol* 2006;96(3):235-240.
156. Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(5):783-790.
157. Lynn R, Talbot JA, Morgan DL. Differences in rat skeletal muscles after incline and decline running. *J Appl Physiol* 1998;85(1):98-104.
158. Lynn R, Morgan DL. Decline running produces more sarcomeres in rat vastus intermedius muscle fibers than does incline running. *J Appl Physiol* 1994;77(3):1439-1444.

159. Colliander EB, Tesch PA. Effects of eccentric and concentric muscle actions in resistance training. *Acta Physiol Scand* 1990;140(1):31-39.
160. Dudley GA, Tesch PA, Miller BJ, Buchanan P. Importance of eccentric actions in performance adaptations to resistance training. *Aviat Space Environ Med* 1991;62(6):543-550.
161. Hather BM, Tesch PA, Buchanan P, Dudley GA. Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. *Acta Physiol Scand* 1991;143(2):177-185.
162. Folland JP, Williams AG. The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med* 2007;37(2):145-168.
163. Kingma JJ, de Knikker R, Wittink HM, Takken T. Eccentric overload training in patients with chronic Achilles tendinopathy: a systematic review. *British journal of sports medicine* 2007;41(6):e3.
164. Visnes H, Bahr R. The evolution of eccentric training as treatment for patellar tendinopathy (jumper's knee): a critical review of exercise programmes. *British journal of sports medicine* 2007;41(4):217-223.
165. SENIAM. Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles. Volume 20122012.
166. Cadore EL, Izquierdo M, Pinto SS, Alberton CL, Pinto RS, Baroni BM, Vaz MA, Lanferdini FJ, Radaelli R, Gonzalez-Izal M, Bottaro M, Kruel LF. Neuromuscular adaptations to concurrent training in the elderly: effects of intrasession exercise sequence. *Age (Dordr)* 2012.
167. Mendis MD, Wilson SJ, Stanton W, Hides JA. Validity of real-time ultrasound imaging to measure anterior hip muscle size: a comparison with magnetic resonance imaging. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 2010;40(9):577-581.
168. Blazevich AJ, Gill ND, Deans N, Zhou S. Lack of human muscle architectural adaptation after short-term strength training. *Muscle Nerve* 2007;35(1):78-86.
169. Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. In vivo human muscle structure and function: adaptations to resistance training in old age. *Experimental physiology* 2004;89(6):675-689.

170. Proske U, Allen TJ. Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. *Exercise and sport sciences reviews* 2005;33(2):98-104.
171. Baroni BM, Leal Junior EC, De Marchi T, Lopes AL, Salvador M, Vaz MA. Low level laser therapy before eccentric exercise reduces muscle damage markers in humans. *Eur J Appl Physiol* 2010;110(4):789-796.
172. Blazevich AJ, Gill ND, Bronks R, Newton RU. Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 2003;35(12):2013-2022.
173. Langberg H, Ellingsgaard H, Madsen T, Jansson J, Magnusson SP, Aagaard P, Kjaer M. Eccentric rehabilitation exercise increases peritendinous type I collagen synthesis in humans with Achilles tendinosis. *Scand J Med Sci Sports* 2007;17(1):61-66.
174. Bojsen-Moller J, Magnusson SP, Rasmussen LR, Kjaer M, Aagaard P. Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J Appl Physiol* 2005;99(3):986-994.
175. Jones EJ, Bishop PA, Woods AK, Green JM. Cross-sectional area and muscular strength: a brief review. *Sports Med* 2008;38(12):987-994.
176. Erskine RM, Jones DA, Williams AG, Stewart CE, Degens H. Inter-individual variability in the adaptation of human muscle specific tension to progressive resistance training. *Eur J Appl Physiol* 2010;110(6):1117-1125.
177. Ward SR, Eng CM, Smallwood LH, Lieber RL. Are current measurements of lower extremity muscle architecture accurate? *Clinical orthopaedics and related research* 2009;467(4):1074-1082.
178. Kumagai K, Abe T, Brechue WF, Ryushi T, Takano S, Mizuno M. Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *J Appl Physiol* 2000;88(3):811-816.
179. Blazevich AJ. Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. *Sports Med* 2006;36(12):1003-1017.
180. Thom JM, Morse CI, Birch KM, Narici MV. Influence of muscle architecture on the torque and power-velocity characteristics of young and elderly men. *Eur J Appl Physiol* 2007;100(5):613-619.

181. Herzog W, Guimaraes AC, Anton MG, Carter-Erdman KA. Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. *Med Sci Sports Exerc* 1991;23(11):1289-1296.
182. Savelberg HH, Meijer K. Contribution of mono- and biarticular muscles to extending knee joint moments in runners and cyclists. *J Appl Physiol* 2003;94(6):2241-2248.
183. Enocson AG, Berg HE, Vargas R, Jenner G, Tesch PA. Signal intensity of MR-images of thigh muscles following acute open- and closed chain kinetic knee extensor exercise - index of muscle use. *Eur J Appl Physiol* 2005;94(4):357-363.