

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

**EFEITOS DO TREINAMENTO EXCÊNTRICO ISOCINÉTICO SOBRE AS**  
**PROPRIEDADES MUSCULOTENDÍNEAS DE FLEXORES PLANTARES DE**  
**INDIVÍDUOS SAUDÁVEIS**

**Jeam Marcel Geremia**

**PORTO ALEGRE - RS**  
**2016**

**Jeam Marcel Geremia**

**EFEITOS DO TREINAMENTO EXCÊNTRICO ISOCINÉTICO SOBRE AS  
PROPRIEDADES MUSCULOTENDÍNEAS DE FLEXORES PLANTARES DE  
INDIVÍDUOS SAUDÁVEIS**

**Tese de doutorado apresentada à Escola de  
Educação Física, Fisioterapia e Dança da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
como requisito para a obtenção do título de  
Doutor em Ciências do Movimento Humano**

**Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Vaz**

**PORTO ALEGRE - RS  
2016**

CIP - Catalogação na Publicação

Geremia, Jean Marcel  
Efeitos do treinamento excêntrico isocinético  
sobre as propriedades musculotendíneas de flexores  
plantares de indivíduos saudáveis. / Jean Marcel  
Geremia. -- 2016.  
96 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, 2016.

1. Exercício excêntrico. 2. Flexores plantares. 3.  
Torque. 4. Espessura muscular. 5. Rigidez tendínea.  
I. Vaz, Marco Aurélio, orient. II. Título.

**Jeam Marcel Geremia**

**EFEITOS DO TREINAMENTO EXCÊNTRICO ISOCINÉTICO SOBRE AS  
PROPRIEDADES MUSCULOTENDÍNEAS DE FLEXORES PLANTARES DE  
INDIVÍDUOS SAUDÁVEIS**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dra. Anna Raquel Silveira Gomes - UFPR**

**Prof. Dra. Clarice Sperotto dos Santos Rocha - UFRGS**

**Prof. Dr. Ronei Silveira Pinto - UFRGS**

**PORTO ALEGRE - RS  
2016**

## **AGRADECIMENTOS**

- Aos meus pais, Aristides e Dinacir, que sempre buscaram o melhor para seus filhos. Todas as vitórias de minha vida são dedicadas a vocês. Tenham a certeza que sempre fizemos tudo certo na educação dos seus filhos.
- Ao meu irmão, Alessandro, minha cunhada, Andressa, e meu sobrinho, Eduardo, por serem parte de uma base tão sólida de minha vida. Muito obrigado por todo apoio e incentivo.
- A minha namorada Ana, que sempre foi um dos pilares durante esta trajetória, estando presente nos melhores e piores momentos. Muito obrigado por toda a paciência e parceria, sempre.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Aurélio Vaz, por todos os ensinamentos e oportunidades durante estes 10 anos de GPBiC. Seus conselhos e advertências foram essenciais para minha formação. Foi (e continua sendo) um prazer poder trabalhar com uma pessoa como você.
- Aos professores, e grandes amigos, Dr. Fábio Juner Lanferdini e Dr. Bruno Manfredini Baroni. A parceria de vocês foi fundamental para o sucesso deste estudo. Tenham a certeza que vocês são grandes exemplos que buscarei seguir todos os dias.
- Ao professor, Dr. Rodrigo Rico Bini, por toda ajuda no processo de elaboração do estudo e no processamento dos dados. Sua participação foi essencial para o desenvolvimento do estudo.
- A prof. Me. Mayra Casa Nova, pela parceria e amizade de tantos anos. Muito obrigado pelo teu incansável auxílio, em todos os momentos, ao longo destes anos.
- Aos professores, Me. Matias Fröhlich, Francesca Sonda e a bolsista Amanda de Lima por toda a dedicação e empenho nas coletas e análise dos dados, bem como no treinamento dos indivíduos.
- Ao prof. Dr. Maarten F. Bobbert, por todos os seus ensinamentos. Muito obrigado por toda ajuda durante este processo e pela preocupação em me tornar um cientista melhor.
- A todos os indivíduos que realizaram o período de treinamento. Muito obrigado pela paciência, responsabilidade e comprometimento.
- Aos professores, Dr. Fernando Diefenthaler e Dr. Felipe Pivetta Carpes, pelos primeiros e constantes ensinamentos. Vocês são grandes mestres para mim e exemplos de seres humanos, professores e pesquisadores.

- Aos colegas do GPBiC, os quais foram minha família durante muitos anos em Porto Alegre.
- A Faculdade Sogipa de Educação Física e a Universidade de Santa Cruz, que me proporcionaram colocar em prática o conhecimento adquirido ao longo de tantos anos.
- Aos professores da ESEFID/UFRGS, Dr. Flávio Antônio de Souza Castro, Dr. Ronei Silveira Pinto, Dr. Álvaro Reischak de Oliveira, Dr. Alberto Repold Filho e Dr. Leonardo Tartaruga, referências como professores e pesquisadores.
- Aos funcionários da ESEFID/UFRGS, em especial do PPGCMH e do LAPEX, por toda a disponibilidade e auxílio.
- A CAPES pela bolsa de estudos.
- A banca examinadora desta tese, prof. Dra. Anna Raquel Gomes, prof. Dra. Clarice Rocha e prof. Dr. Ronei Silveira Pinto.

Dedicada aos meus pais, os quais sempre fizeram de tudo pelos seus filhos.

## RESUMO

O exercício excêntrico tem sido utilizado na prevenção/reabilitação de lesões e em programas de treinamento de força para melhorar o condicionamento físico de indivíduos saudáveis. O entendimento das adaptações causadas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares se justifica: 1) pela importância desta musculatura na manutenção de posturas e no ciclo da marcha; 2) pela alta incidência de lesões do tendão de Aquiles; e 3) pelo uso sistemático deste tipo de treinamento em programas de prevenção e reabilitação do tríceps sural. Assim, a presente tese de doutorado busca verificar os efeitos do treinamento excêntrico nas propriedades neuromecânicas e morfológicas dos músculos flexores plantares. No capítulo I foram compiladas informações acerca das adaptações neuromusculares dos flexores plantares e do tendão de Aquiles de indivíduos saudáveis submetidos à programas de treinamento excêntrico. Os estudos encontrados indicam que o treinamento excêntrico pode aumentar a produção de força e ativação muscular, especialmente em testes excêntricos. No entanto, resultados conflitantes e lacunas identificadas na literatura motivaram a realização de dois estudos originais. Os objetivos dos estudos originais foram: 1) determinar a temporalidade das adaptações na ativação e massa muscular de flexores plantares, bem como sua contribuição para os ganhos de força em contrações excêntricas, isométricas e concêntricas ao longo do programa de treinamento (Capítulo II); e 2) avaliar os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles de indivíduos saudáveis (Capítulo III). Vinte participantes do sexo masculino realizaram um programa de treinamento excêntrico isocinético (duas vezes por semana, 3-5 séries de 10 repetições máximas). As avaliações das propriedades neuromecânicas e morfológicas dos flexores plantares foram realizadas a cada quatro semanas. Ao final de 12 semanas, o programa de treinamento excêntrico aumentou a produção de torque máximo excêntrico, isométrico e concêntrico; aumentou a atividade eletromiográfica máxima excêntrica e isométrica; e aumentou a espessura muscular. Além disso, os ângulos do pico de torque excêntrico e concêntrico foram deslocados para posições em que os músculos estavam mais alongados. O torque máximo e a espessura muscular aumentaram progressivamente até a oitava semana de treinamento. A ativação neural durante contrações excêntricas e isométricas aumentou após quatro semanas de treino e permaneceu constante até o final do treinamento, enquanto que a ativação neural durante contrações concêntricas permaneceu inalterada durante todo o período de treinamento. Além disso, houve aumento da área de secção transversa, da rigidez e do módulo de Young do tendão de Aquiles. Os incrementos na rigidez e no módulo de Young foram observados após quatro semanas de treinamento, enquanto que o aumento significativo da área de secção transversa tendínea ocorreu após oito semanas de treinamento. Quando tomados em conjunto, estes resultados nos possibilitam entender de que forma as adaptações neuromecânicas e morfológicas dos flexores plantares ocorrem. O aumento da força isométrica e excêntrica nas primeiras quatro semanas de treinamento parece ocorrer devido a adaptações neurais, musculares e tendíneas. No entanto, após maiores períodos de treinamento (i.e. acima de quatro semanas), o aumento da força ocorre devido a incrementos na massa muscular e na rigidez tendínea. Além disso, a ausência de adaptações neurais evidencia que os ganhos de força concêntrica podem estar relacionados apenas com adaptações musculares e tendíneas.

**Palavras-chave:** exercício excêntrico, flexores plantares, torque, EMG, espessura muscular, rigidez tendínea.

## ABSTRACT

Eccentric exercises are commonly used in prevention, rehabilitation and conditioning training programs. Understanding the adaptations caused by eccentric training on the plantar flexor muscles is justified by: 1) the importance of these muscles in maintaining posture and during gait cycle; 2) the high incidence of Achilles tendon injuries; and 3) the systematic use of this type of training in triceps surae prevention and rehabilitation programs. Thus, the present PhD thesis aims to verify the effects of eccentric training in neuromechanical and morphological properties of the plantar flexor muscles. Chapter I compiled information about the neuromuscular adaptations of the plantar flexors and Achilles tendon of healthy subjects undergoing eccentric training programs. The studies found indicate that eccentric training can increase the production of muscle strength and muscle activation, especially in eccentric tests. The studies found indicate that eccentric training can increase muscle strength and muscle activation, especially in eccentric tests. The purposes of the original studies were: 1) to determine the adaptations time course in plantar flexors activation and muscle mass, as well as their contribution to the strength gains in eccentric, isometric and concentric contractions during the training program (Chapter II); and 2) to evaluate the effects of 12 weeks of eccentric training on Achilles tendon morphological, mechanical and material properties in healthy subjects (Chapter III). Twenty male subjects performed an eccentric isokinetic training program (twice a week, 3-5 sets of 10 maximal repetitions). Plantar flexor neuromechanical and morphological evaluations were performed every 4 weeks. The 12-week training program led to increases in maximum eccentric, isometric and concentric torques; maximum eccentric and isometric electromyographic activity; and muscle thickness. The angles of peak torque in eccentric and concentric tests were shifted towards longer muscle lengths. Maximum torque and muscle thickness increased progressively until the 8<sup>th</sup> training week. Eccentric and isometric activation increased up to the 4<sup>th</sup> training week and remained constant until the 12<sup>th</sup> training week, while no change was found in concentric activation. In addition, Achilles tendon cross-sectional area, stiffness and Young's modulus were increased. The increases in stiffness and Young's modulus were observed after four weeks of training, while the significant increase in tendon cross-sectional area occurred after eight weeks of training. Taken together, these results allow us to understand how the neuromechanical and morphologic adaptations occur in the plantar flexors muscles subjected to a 12-week eccentric training program. The increase in isometric and eccentric strength in the first four weeks of training seems to be related to neural, morphological and tendinous adaptations. However, after longer training periods (i.e. up to four weeks), the strength increase is due to increases in muscle mass and tendon stiffness. Moreover, the absence of evidence in terms of neural adaptations during concentric contractions suggest that the concentric strength gains seem to be related only with muscle and tendon adaptations.

**Key-words:** eccentric exercise, plantar flexors muscles, torque, EMG, muscle thickness, tendon stiffness.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Típica curva da relação <i>stress-strain</i> de um tendão submetido a teste de força tensional .....	<b>32</b>
<b>Figura 2.</b> Desenho experimental do estudo: cinco avaliações neuromusculares dos músculos flexores plantares; um período controle de quatro semanas; e um período de 12 semanas de treinamento excêntrico .....	<b>47</b>
<b>Figura 3.</b> Medida da espessura muscular (EM).....	<b>51</b>
<b>Figura 4.</b> Torque de flexão plantar nos testes isométrico e isocinéticos..	<b>54</b>
<b>Figura 5.</b> Ativação elétrica dos flexores plantares nos testes isométrico e isocinéticos .....	<b>55</b>
<b>Figura 6.</b> Espessura muscular dos flexores plantares.....	<b>56</b>
<b>Figura 7.</b> Junção miotendínea do músculo gastrocnêmio medial em repouso e durante uma contração voluntária máxima isométrica. Um marcador foi posicionado na pele para verificar possíveis movimentos do transdutor de ultrassonografia.....	<b>66</b>
<b>Figura 8.</b> Marcadores reflexivos posicionados no membro inferior do indivíduo e na plataforma do dinamômetro isocinético os quais permitiram que os movimentos articulares fossem avaliados. Um marcador foi posicionado na pele, o qual permitiu detectar possíveis movimentos do transdutor de ultrassonografia durante as contrações isométricas em rampa. <b>67</b>	
<b>Figura 9.</b> Modelo bidimensional dos segmentos pé e perna, o qual permitiu calcular o ângulo de flexão plantar durante as contrações isométricas em rampa .....	<b>68</b>
<b>Figura 10.</b> Avaliação do braço de momento do tendão de Aquiles..	<b>69</b>
<b>Figura 11.</b> Relações força-deformação e <i>stress-strain</i> nos períodos Controle, Pré, Pós-4, Pós-8 e Pós-12 .....	<b>73</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Programas de treinamento excêntrico, apresentados pela literatura, dos músculos flexores plantares.....	<b>21</b>
<b>Tabela 2.</b> Adaptações neurais, morfológicas e tendíneas geradas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares .....	<b>37</b>
<b>Tabela 3.</b> Adaptações na força muscular geradas pelo treinamento excêntrico de flexores plantares .....	<b>41</b>
<b>Tabela 4.</b> Periodização do programa de treinamento excêntrico.....	<b>52</b>
<b>Tabela 5.</b> Média ( $\pm$ dp) da flexão dorsal máxima (FD <sub>máx</sub> ) e ângulo do pico do torque durante testes máximos excêntricos (APT <sub>exc</sub> ) e concêntricos (APT <sub>con</sub> ) .....	<b>56</b>
<b>Tabela 6.</b> Propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles (média $\pm$ dp).....	<b>74</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

- $\Sigma EM$  – Somatório das espessuras dos músculos flexores plantares
- $\Sigma EMG_{con}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares durante testes concêntricos
- $\Sigma EMG_{con_0^\circ}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de  $0^\circ$  do tornozelo durante testes concêntricos
- $\Sigma EMG_{con\_APT}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de pico de torque concêntrico do momento pré-treino
- $\Sigma EMG_{exc}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares durante testes excêntricos
- $\Sigma EMG_{exc_0^\circ}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de  $0^\circ$  do tornozelo durante testes excêntricos
- $\Sigma EMG_{exc\_APT}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de pico de torque excêntrico do momento pré-treino durante testes excêntricos
- $\Sigma EMG_{iso}$  – Somatório da ativação elétrica dos flexores plantares durante testes isométricos
- 1-RM** – Uma repetição máxima
- ANOVA** – Análise de variância
- AP** – Ângulo de penetração
- APT<sub>con</sub>** – Ângulo do pico de torque concêntrico
- APT<sub>exc</sub>** – Ângulo do pico de torque excêntrico
- AST** – Área de secção transversa
- ASTA** – Área de secção transversa anatômica
- ASTF** – Área de secção transversa fisiológica
- CEP** – Comitê de ética em pesquisa
- CF** – Comprimento de fascículo
- CON** – Testes concêntricos
- CON<sub>coa</sub>** – Coativação muscular durante testes concêntricos
- Controle** – Avaliação antes do período controle
- CT** – Comprimento do tendão
- CVMI** – Contração voluntária máxima isométrica
- d1** – Distância entre o centro do maléolo medial e o transdutor de ultrassonografia
- d2** – Distância entre o tendão de Aquiles e a superfície da pele
- EM** – Espessura muscular
- EMG** – Eletromiografia
- EXC** – Testes excêntricos

**EXC<sub>coa</sub>** – Coativação muscular durante testes excêntricos

**FD<sub>máx</sub>** – Flexão dorsal máxima

**GL** – Gastrocnêmio lateral

**GM** – Gastrocnêmio medial

**ICC** – Índice de correlação intraclasse

**ISO** – Testes isométricos

**ISO<sub>coa</sub>** – Coativação muscular durante testes isométricos

**JMT** – Junção miotendínea

**mm** – milímetros

**mm<sup>2</sup>** – milímetros quadrados

**Módulo de Young<sub>ABS</sub>** – inclinação da curva *stress-strain* calculada a partir de uma amplitude absoluta de força comum para todos os participantes (entre 50% e 100% do pico de força máxima isométrica do participante mais fraco)

**Módulo de Young<sub>REL</sub>** – inclinação da curva *stress-strain* obtida entre 50% e 100% do pico de força máxima isométrica

**MPa** – Mega Pascal

**N** – Newton

**N/mm** – Newton por milímetro

**Nm** – Newton metro

**Pós-12** – Avaliação após 12 semanas de treinamento

**Pós-4** – Avaliação após quatro semanas de treinamento

**Pós-8** – Avaliação após oito semanas de treinamento

**Pré** – Avaliação após o período controle e antes do treinamento

**PT<sub>con</sub>** – Pico de torque concêntrico

**PT<sub>exc</sub>** – Pico de torque excêntrico

**PT<sub>iso</sub>** – Pico de torque isométrico

**RF** – Reto femoral

**Rigidez<sub>ABS</sub>** – inclinação da curva força-deformação calculada a partir de uma amplitude absoluta de força comum para todos os participantes (entre 50% e 100% do pico de força máxima isométrica do participante mais fraco)

**Rigidez<sub>ativa</sub>** – Rigidez tendínea obtida durante contrações musculares

**Rigidez<sub>passiva</sub>** – Rigidez tendínea obtida durante alongamentos passivos

**Rigidez<sub>REL</sub>** – inclinação da curva força-deformação obtida entre 50% e 100% do pico de força máxima isométrica

**RMS** – *Root mean square*

**SENIAM** – *Surface electromyography for the non-invasive assessment of muscles*

**SO** – Sóleo

**T<sub>con\_0°</sub>** – Pico de torque concêntrico avaliado no ângulo de 0° do tornozelo

**T<sub>con\_APT</sub>** – Pico de torque concêntrico avaliado no ângulo de pico de torque concêntrico do momento pré-treino

**T<sub>exc\_0°</sub>** – Pico de torque excêntrico avaliado no ângulo de 0° do tornozelo

**T<sub>exc\_APT</sub>** – Pico de torque excêntrico avaliado no ângulo de pico de torque excêntrico do momento pré-treino

**US** – Ultrassonografia

**VL** – Vasto lateral

**VM** – Vasto medial

**W** – Watts

## SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO I – Revisão de literatura .....</b>	<b>19</b>
CONTEXTUALIZAÇÃO.....	19
ADAPTAÇÕES NEURAI CAUSADAS PELO TREINAMENTO EXCÊNTRICO.....	22
ADAPTAÇÕES MUSCULARES CAUSADAS PELO TREINAMENTO EXCÊNTRICO.....	25
ADAPTAÇÕES TENDÍNEAS CAUSADAS PELO TREINAMENTO EXCÊNTRICO .....	31
ADAPTAÇÕES NA PRODUÇÃO DE FORÇA MUSCULAR CAUSADAS PELO TREINAMENTO EXCÊNTRICO .....	38
ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA.....	42
<b>CAPÍTULO II - Cronologia das adaptações neuromecânicas e morfológicas do tríceps sural ao treinamento excêntrico.....</b>	<b>44</b>
RESUMO.....	44
INTRODUÇÃO .....	45
MÉTODOS.....	46
Participantes .....	46
Desenho Experimental .....	47
Avaliação do torque de flexão plantar.....	48
Avaliação da ativação elétrica muscular .....	49
Avaliação da massa muscular .....	50
Programa de treinamento excêntrico.....	51

Análise estatística.....	53
RESULTADOS.....	53
DISCUSSÃO .....	56
<b>CAPÍTULO III - Efeitos do treinamento excêntrico do tríceps sural nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles.....</b>	<b>61</b>
RESUMO.....	61
INTRODUÇÃO.....	62
MÉTODOS.....	63
Participantes .....	63
Desenho Experimental .....	64
Avaliação das propriedades morfológicas do tendão de Aquiles.....	64
Avaliação da deformação tendínea durante contrações isométricas máximas.....	65
Correção do deslocamento tendíneo causado pela rotação do tornozelo .....	66
Correção do torque de flexão plantar por meio da ativação elétrica muscular .....	68
Avaliação do braço de momento do tendão de Aquiles .....	69
Propriedades mecânicas e materiais do tendão de Aquiles .....	70
Programa de treinamento excêntrico.....	70
Análise estatística.....	72
RESULTADOS.....	72
DISCUSSÃO .....	75
<b>CONCLUSÕES DA TESE .....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>

## APRESENTAÇÃO

O treinamento excêntrico tem sido muito utilizado nas últimas décadas tanto em programas de prevenção/reabilitação quanto no treinamento de indivíduos saudáveis. Entretanto, os mecanismos adaptativos dos flexores plantares a esse tipo de treinamento ainda não foram totalmente elucidados. A presente tese de doutorado pretende responder uma série de perguntas em relação a esse tipo de treinamento e seus efeitos na unidade músculo-tendão dos músculos flexores plantares, a saber: (1) A capacidade de ativação muscular durante contrações dinâmicas e isométricas é alterada pelo treinamento excêntrico? (2) Quais as adaptações que ocorrem na morfologia muscular ao longo de 12 semanas de treinamento excêntrico dos músculos flexores plantares? (3) As propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles são afetadas pelo treinamento excêntrico? (4) O treinamento excêntrico promove diferentes ganhos de força durante contrações dinâmicas (concêntricas e excêntricas) e isométricas máximas nos flexores plantares? (5) Qual o curso das possíveis adaptações da ativação elétrica muscular, da morfologia do tríceps sural, das propriedades do tendão de Aquiles e da força dos flexores plantares durante um período de treinamento excêntrico?

Com o intuito de responder as perguntas acima, um estudo de revisão e dois estudos originais foram conduzidos durante o período de doutorado do prof. Jean Marcel Geremia. Os estudos foram desenvolvidos junto ao setor de Plasticidade Neuromuscular do Laboratório de Pesquisa do Exercício (LAPEX) da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança (ESEFID) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Assim, o conteúdo desta tese é apresentado por meio de três capítulos.

O Capítulo I apresenta uma revisão de literatura a respeito das principais alterações causadas pelo treinamento excêntrico na capacidade de ativação elétrica muscular, na morfologia do tríceps sural, nas propriedades do tendão de Aquiles e na produção de força dos flexores plantares.

O Capítulo II descreve o experimento que teve como objetivo verificar as adaptações na atividade elétrica, na morfologia e na força dos músculos flexores plantares após um programa de treinamento excêntrico. Além disso, a temporalidade destas adaptações foi avaliada durante 12 semanas treinamento excêntrico.

O Capítulo III descreve o experimento que teve como objetivo avaliar as propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles após um programa de treinamento

excêntrico. Por fim, a temporalidade das adaptações tendíneas foi avaliada durante 12 semanas de treinamento excêntrico.

Após a descrição dos capítulos, uma breve sessão é dedicada à apresentação das conclusões da tese e das principais contribuições destes estudos para a literatura científica.

## INTRODUÇÃO

O exercício excêntrico tem sido utilizado na prevenção de lesões musculoesqueléticas (Goode et al., 2015), em programas de reabilitação (Alfredson et al., 1998; Mafi et al., 2001; Langberg et al., 2007) e durante programas de treinamento de força para melhorar o condicionamento físico de indivíduos saudáveis (Baroni et al., 2015). Quando utilizados de forma sistemática (i.e., treinamento), os exercícios excêntricos têm mostrado ganhos de força mais proeminentes em comparação aos exercícios resistidos convencionais (Walker et al., 2016) e aos exercícios concêntricos (Roig et al., 2009). Além disso, os exercícios excêntricos, além de causar hipertrofia muscular de forma mais rápida (Norrbrand et al., 2008), parecem gerar adaptações específicas na arquitetura muscular (Reeves et al., 2009). Essas vantagens dão suporte ao uso do exercício excêntrico em programas de treinamento voltados ao condicionamento físico, prevenção e reabilitação de lesões musculoesqueléticas.

O tríceps sural é um grupo muscular largamente exposto ao exercício excêntrico (Alfredson et al., 1998; Kingma et al., 2007). Assim, um melhor entendimento das adaptações causadas pelo treinamento excêntrico neste grupo muscular se justifica: 1) pela importância desta musculatura na manutenção de posturas e no ciclo da marcha; 2) pela alta incidência de lesões do tendão de Aquiles; e 3) pelo uso sistemático deste tipo de treinamento em programas de prevenção e reabilitação (Barstow et al., 2003; Couppé et al., 2015; Lantto et al., 2015). No entanto, não há consenso na literatura acerca do efeito do treinamento excêntrico sobre as propriedades neuromecânicas e morfológicas dos flexores plantares. Estudos têm evidenciado aumento (Duclay et al., 2009) ou manutenção (Mouraux et al., 2000; Raj et al., 2012; Fouré et al., 2013) da massa muscular após períodos de treinamento excêntrico. Resultados conflitantes também são encontrados em relação às adaptações promovidas sobre a ativação neural nos três tipos de contração muscular (Pensini et al., 2002; Fouré et al., 2013). Enquanto o treinamento excêntrico parece promover o aumento da ativação elétrica durante contrações excêntricas e manutenção desta variável durante contrações concêntricas (Pensini et al., 2002), estudos têm encontrado aumento (Pensini et al., 2002) ou manutenção (Fouré et al., 2013) da atividade elétricas muscular durante ações isométricas. Essas inconsistências dificultam a compreensão dos mecanismos responsáveis pelos ganhos de força reportados em contrações excêntricas (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002), isométricas (Pensini et al., 2002; Duclay et al., 2009; Raj et al., 2012) e concêntricas (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002). Além disso, embora já existam evidências acerca da cronologia das adaptações ao treinamento isoínercial (concêntrico/excêntrico) (Urlando e Hawkins, 2007) e isométrico de flexores plantares (Kubo

et al., 2010, 2012), há uma lacuna na literatura acerca da temporalidade de adaptação desse grupo muscular ao treinamento excêntrico.

O treinamento excêntrico também tem sido muito utilizado no processo de reabilitação de lesões tendíneas (Alfredson et al., 1998; Kingma et al., 2007). As tendinopatias (tendinites/tendinoses) são bastante comuns, especialmente entre atletas e independente do nível competitivo (Maffulli et al., 2004; Couppé et al., 2015). Além disso, as rupturas totais do tendão de Aquiles têm aumentado nos últimos anos (Huttunen et al. 2014; Lantto et al. 2015). Estudos têm encontrado redução da rigidez tendínea em pacientes com tendinopatia (Arya e Kulig, 2010) e após rupturas do tendão de Aquiles (Geremia et al., 2015). A redução da rigidez tendínea pode gerar redução do comprimento ativo do músculo, causando redução da produção de força de acordo com a relação força-comprimento muscular (Kubo et al., 2001; Maganaris, 2003; Kay e Blazevich, 2009). Em outras palavras, um tendão mais complacente pode levar a uma redução no comprimento dos fascículos musculares, reduzindo a excursão desses fascículos, que terão menor capacidade de produzir força ao longo da amplitude total de movimento. Além disso, uma menor rigidez tendínea acarreta em redução da taxa de produção de força muscular (Bojsen-Møller et al., 2005). Este atraso na transferência de força pode afetar o equilíbrio e a estabilidade corporal, reduzindo o tempo de reação e aumentando o risco de quedas (Waugh et al., 2014). Embora alguns estudos evidenciem que o exercício excêntrico pode aumentar a rigidez tendínea (Duclay et al., 2009; Kay et al., 2016), outros têm encontrado manutenção (Mahieu et al., 2008) ou redução (Morrissey et al., 2011) desta variável após um período de treinamento excêntrico. A heterogeneidade dos treinamentos quanto à sua duração, frequência semanal, volume (séries x repetições) e intensidade (sobrecarga), pode causar diferentes estímulos mecânicos no tendão, o que explicaria estes resultados conflitantes.

As alterações nas propriedades mecânicas tendíneas parecem estar relacionadas com a intensidade do exercício (Bohm et al., 2015), uma vez que a rigidez tendínea aumenta após treinamentos de alta intensidade (Arampatzis et al., 2007; Bohm et al., 2015). Considerando que as contrações excêntricas promovem maior sobrecarga no complexo músculo-tendão que contrações isométricas e concêntricas (Herzog et al., 2015), parece razoável esperar que o treinamento excêntrico possa causar maiores e/ou mais rápidas adaptações tendíneas que outras modalidades de exercício. Estas informações permitem determinar as adaptações nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais tendíneas causadas pelo treinamento excêntrico, além do tempo em que estas ocorrem, gerando informações importantes para o desenvolvimento de programas de prevenção/reabilitação e treinamento físico. A literatura

apresenta indícios de que o aumento da rigidez tendínea pode ocorrer tanto em períodos curtos (Duclay et al., 2009; Kay et al., 2016), como em períodos mais longos de treinamento (Fouré et al., 2013). No entanto, não foram encontrados estudos que avaliaram o tempo mínimo/necessário para que o treinamento excêntrico cause adaptações no tendão de Aquiles. Apenas três estudos (Urlando e Hawkins, 2007; Kubo et al., 2010; Kubo et al., 2012) avaliaram a cronologia das adaptações causadas pelo treinamento no tendão de Aquiles. Enquanto Urlando e Hawkins (2007) não encontraram diferenças significativas nas propriedades mecânicas tendíneas após oito semanas de treinamento isoinercial (concêntrico-excêntrico), os achados de Kubo (2010; 2012) sugerem que três meses de treinamento isométrico são necessários para que ocorra aumento significativo na rigidez do tendão de Aquiles. Um recente modelo de adaptação tendínea ao treinamento (Wiesinger et al., 2015), sugere que o aumento da rigidez tendínea está mais relacionado com mudanças nas propriedades materiais (e.g. aumento da síntese de proteínas na matriz extracelular, aumento da densidade do colágeno, alterações nas ondulações das fibras de colágeno e aumento da síntese de proteoglicanas) do que nas propriedades morfológicas (hipertrofia), especialmente nas primeiras semanas de treinamento (Bohm et al., 2015; Wiesinger et al., 2015). Poucos estudos avaliaram a contribuição das propriedades materiais e morfológicas nas adaptações ocorridas no tendão de Aquiles após programas de treinamento (Rosager et al., 2002; Houghton et al., 2013; Wiesinger et al., 2015). No entanto, estas contribuições não foram avaliadas após programas de treinamento excêntrico.

Assim, os objetivos da presente tese de doutorado foram: 1) compilar informações acerca das adaptações neuromusculares dos flexores plantares e do tendão de Aquiles de indivíduos saudáveis submetidos à programas de treinamento excêntrico (Capítulo I); 2) determinar a temporalidade das adaptações na ativação e massa muscular de flexores plantares, bem como sua contribuição para os ganhos de força em contrações excêntricas, isométricas e concêntricas máximas ao longo do programa de treinamento (Capítulo II); e 3) avaliar os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico nas propriedades mecânicas, materiais e morfológicas do tendão de Aquiles de indivíduos saudáveis (Capítulo III).

## CAPÍTULO I

### REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura acerca das principais alterações causadas pelo treinamento excêntrico na capacidade de ativação elétrica muscular, na morfologia do tríceps sural, nas propriedades do tendão de Aquiles e na produção de força dos flexores plantares.

#### Contextualização

O tendão de Aquiles é o maior e mais forte tendão do corpo humano (Maffulli e Almekinders, 2007). Apesar da sua alta capacidade de suportar forças tensionais (Järvinen et al., 2005), o tendão de Aquiles é um dos tendões que mais sofre lesões no corpo humano (Wren et al., 2001; Harris e Peduto, 2006). As rupturas agudas do tendão de Aquiles são relativamente comuns na população adulta e sua incidência tem aumentado nos últimos anos (Huttunen et al., 2014; Lantto et al., 2015). Inserido em diversos programas de prevenção e reabilitação, o exercício excêntrico vem sendo utilizado como uma das ferramentas que possibilita rápida recuperação do sistema musculoesquelético (Albert, 2002). Além disso, de acordo com Barstow et al. (2003), programas de treinamento que não enfatizam ações excêntricas musculares não preparam os indivíduos para as cargas excêntricas que ocorrem durante algumas atividades de vida diária, favorecendo a ocorrência de lesões.

O treinamento excêntrico tem sido objeto de diversos estudos na última década (Blazevich et al., 2007; Duclay et al., 2009; Reeves et al., 2009; Morrissey et al., 2011; Baroni et al., 2013a; Fouré et al., 2013). Grande parte deste interesse se dá pela importância deste método de treino durante processos de prevenção e reabilitação de lesões (Albert, 2002; Maffulli et al., 2008; Rompe et al., 2009; Petersen et al., 2011). Entretanto, os estudos que avaliaram os efeitos do treinamento excêntrico em parâmetros neuromusculares apresentam grande variação em sua metodologia, principalmente no que se refere ao número (8-35), idade (20-68 anos) e sexo (masculino e feminino) de participantes, ao número de semanas (4-16), ao número de sessões de treino por semana (2-7), ao tipo de implemento utilizado (dinamômetros isocinéticos, máquinas, pesos livres, peso corporal), ao volume de treinamento (3 séries x 5 repetições – 6 séries x 10 repetições), à intensidade (120% de 1-RM – peso corporal) e à velocidade de execução dos exercícios (10°/s – 240°/s). Essa grande variabilidade metodológica dificulta a comparação dos resultados obtidos, uma vez que a

sobrecarga imposta aos músculos e tendões envolvidos em cada estudo foi diferente. A tabela 1 apresenta um resumo das características dos indivíduos, bem como dos métodos de treinamento utilizados nos principais estudos desta revisão, evidenciando essa variabilidade metodológica.

De acordo com os princípios que regem o treinamento físico, as adaptações nos tecidos ocorrem quando demandas impostas pelo treinamento são superiores às usualmente utilizadas (Kraemer e Ratamess, 2004). Além disso, a especificidade das respostas depende da especificidade do treinamento realizado (Kraemer e Ratamess, 2004; Zatsiorsky e Kraemer, 2006). Dessa forma, considerando as características do treinamento excêntrico, espera-se que este produza adaptações específicas no sistema neuromuscular e, conseqüentemente, na produção de força.

**Tabela 1.** Programas de treinamento excêntrico utilizados pelos estudos envolvendo os músculos flexores plantares.

	<b>N</b>	<b>Sexo</b>	<b>Idade</b>	<b>Período</b>	<b>Frequência</b>	<b>Volume</b>	<b>Intensidade</b>	<b>Exercício</b>	<b>ADM</b>	<b>Velocidade</b>
Duclay et al. (2009)	10	M	24	7	ni	6 x 6	120% 1-RM	FP/LP	50/60°	15-20°/s
Fouré et al. (2013)	11	M	21	14	6-7	3 x 15	PC	FP	ni	6s
Gomes et al. (2016)	15	M-F	33	5	3	3 x 10	Máxima	DI	30°	240°/s
Kay et al. (2016)	13	M	20	6	2	5 x 12	Máxima	DI	30°	10°/s
Mahieu et al. (2008)	35	M-F	23	6	6	3 x 15	PC	FP	ni	6s
Morrissey et al. (2011)	19	M-F	22	6	3	3x15	PC	FP	ni	2s
Mouraux et al. (2000)	10	M-F	25	6	3	3-6 x 10	30-80% PTextc	DI	ni	30-90°/s
Pensini et al. (2002)	8	M	23	4	4	6 x 6	120% 1-RM	FP	50/60°	15-20°/s
Raj et al. (2012)	13	M-F	68	16	2	3 x 5	100% 1-RM	FP	ni	ni

N = número de sujeitos; Idade = média da idade dos sujeitos (anos); Período = número de semanas de treinamento; Frequência = número de sessões de treino por semana; Volume = número de séries por sessão x número de repetições por séries; Exercício = tipo de exercício executado durante o treinamento; ADM = amplitude de movimento articular do tornozelo; Velocidade = velocidade angular (exercício isocinético) ou tempo de execução das contrações excêntricas; M = masculino; F = feminino; 1-RM = teste de 1 repetição máxima; PC = peso corporal (a progressão da carga, utilizando pesos livres ou máquinas de flexão plantar, era realizada de acordo com o desconforto percebido pelos sujeitos) PTextc = pico de torque excêntrico; DI = dinamômetro isocinético; FP = implementos que permitem o movimento de flexão plantar; LP = equipamento de leg press; ni = não informado.

## **Adaptações neurais causadas pelo treinamento excêntrico**

O músculo esquelético é um tecido altamente adaptável às demandas que lhe são impostas (Fração e Vaz, 2000). Herzog et al. (1991) citam que a adaptação muscular pode ser atribuída a três fatores: a) alterações extrínsecas musculares (mudanças no padrão de ativação muscular); b) alterações intrínsecas musculares (alterações morfológicas) ou ainda; c) a combinação destes fatores. Dessa forma, para um melhor entendimento das adaptações geradas pelo treinamento excêntrico, faz-se necessário avaliar as possíveis alterações na atividade neural causadas por este tipo de treino.

Entre os principais parâmetros neurais avaliados está a capacidade máxima de ativação neural da musculatura agonista (Higbie et al., 1996; Hortobágyi et al., 1996a, Hortobágyi et al., 1996b, Pensini et al., 2002, Blazevich et al., 2008; Fouré et al., 2013). Baroni et al. (2013a) avaliaram a capacidade de ativação máxima dos músculos extensores do joelho após um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico, realizado em dinamômetro isocinético em indivíduos do sexo masculino. A obtenção da ativação elétrica máxima se deu por meio de eletromiografia (EMG) de superfície dos músculos vasto lateral (VL), vasto medial (VM) e reto femoral (RF), durante testes excêntricos, concêntricos e isométricos máximos. A quantificação da ativação neural foi realizada por meio do somatório dos valores RMS dos três músculos. Após o período de treinamento, os autores encontraram aumento da ativação máxima dos músculos avaliados nos testes isométrico (28,6%) e excêntrico (33,1%). A ativação durante o teste concêntrico não apresentou aumento significativo (13,6%).

Os achados de Baroni et al. (2013a) vão ao encontro dos resultados apresentados por Hibie et al. (1996). Neste estudo os autores submeteram os extensores do joelho de 19 mulheres saudáveis a um programa de treinamento excêntrico em dinamômetro isocinético. O treinamento teve duração de 12 semanas, sendo realizado três vezes por semana. O volume de treino foi de três séries de 10 repetições, com velocidade angular fixa em 60°/s. A ativação máxima dos músculos VL e VM foi avaliada por meio de EMG de superfície durante testes concêntricos e excêntricos realizados em dinamômetro isocinético. Os dados de ativação dos dois músculos foram somados e utilizados para avaliar o grau de ativação neural. Após o período de treinamento, houve aumento (16,7%) da ativação neural durante o teste excêntrico, enquanto que durante o teste concêntrico o aumento não foi significativo (7,1%).

O comportamento da ativação neural dos músculos extensores do joelho, encontrado nos estudos de Baroni et al. (2013a) e Hibie et al. (1996), corroboram com os achados de Pensini et al. (2002), os quais avaliaram o efeito do treinamento excêntrico nos músculos

flexores plantares de oito indivíduos do sexo masculino. O programa de treino teve duração de quatro semanas, sendo realizado quatro vezes por semana. Cada indivíduo realizou seis séries de seis contrações excêntricas a 120% de 1-RM (uma repetição máxima) concêntrica. O treinamento foi realizado em um implemento específico para o treino deste grupo muscular. A ativação neural dos músculos gastrocnêmio medial (GM), gastrocnêmio lateral (GL) e sóleo (SO) foi avaliada antes e após o programa de treinamento, durante testes que envolviam contrações concêntricas, excêntricas e isométricas, realizados em dinamômetro isocinético. Após o período de treinamento, houve aumento significativo da ativação neural para os três músculos avaliados (GM = 76%; GL = 12%; SO = 86%) durante o teste isométrico. Além disso, o músculo GM apresentou aumento 51% da ativação neural durante o teste excêntrico (o que não ocorreu com os outros músculos avaliados). Por fim, não houve alteração significativa na ativação neural dos três músculos durante a realização do teste concêntrico.

Os achados de Hibie et al. (1996), Pensini et al. (2002) e Baroni et al. (2013a) vão ao encontro de outros estudos que também encontraram aumento da ativação neural durante contrações excêntricas e isométricas, mas não encontraram qualquer alteração durante contrações concêntricas (Hortobágyi et al., 1996a, Hortobágyi et al., 1996b). Entretanto, o aumento da ativação durante contrações isométricas parece não ser um consenso na literatura. Blazevich et al. (2008) submeteram 12 indivíduos a um programa de treinamento excêntrico para os extensores do joelho, como descrito por Blazevich et al. (2007). Ao final de 10 semanas de treino, os autores não encontraram alterações na ativação neural dos músculos VL, VM e RF.

O aumento da ativação neural durante os testes excêntricos pode estar relacionado com o princípio da especificidade do treinamento, no qual a especificidade das respostas depende da especificidade do treinamento realizado. De acordo com Hortobágyi et al. (1996a), indivíduos destreinados possuem ativação muscular incompleta durante contrações excêntricas. Isso pode contribuir para uma maior capacidade de adaptação neural nos estágios iniciais do treinamento (Hortobágyi et al., 1996a), ao passo que os ganhos neurais parecem se estabilizar após a aprendizagem motora do exercício excêntrico. Apesar de alguns estudos serem contraditórios, existem fortes indícios que indicam aumento da ativação neural durante contrações isométricas após programas de treinamento excêntrico. No entanto, esta adaptação não é constatada quando contrações concêntricas são realizadas. Segundo Baroni et al. (2013a), durante o treinamento, especialmente em dinamômetros isocinéticos, ações isométricas musculares são necessárias no momento de iniciar cada contração excêntrica, enquanto que contrações concêntricas não são realizadas durante as sessões de treino. Dessa

forma, o comportamento da ativação neural durante os testes excêntricos e isométricos pode ser justificado pela realização do exercício durante as sessões de treinamento, sugerindo a grande relação entre as adaptações neurais e o tipo de contração muscular (Baroni et al., 2013a).

Muitos dos achados referentes à adaptação neural após programas de treinamento excêntrico foram obtidos nos músculos extensores do joelho (Higbie et al., 1996; Hortobágyi et al., 1996a, Hortobágyi et al., 1996b, Baroni et al., 2013a), enquanto que poucos foram os estudos que avaliaram este comportamento nos músculos flexores plantares (Pensini et al., 2002; Fouré et al., 2013). O estudo de Pensini et al. (2002) demonstrou que a adaptação neural ocorrida nos músculos flexores plantares é semelhante àquela encontrada nos músculos extensores do joelho. No entanto, os resultados encontrados por Fouré et al. (2013) vão de encontro aos achados de Pensini et al. (2002). No estudo de Fouré et al. (2013), 11 indivíduos do sexo masculino foram inseridos em um programa de 14 semanas de treinamento excêntrico para os músculos flexores plantares. Os exercícios foram realizados com os indivíduos na ponta dos pés e com os joelhos estendidos, sendo as contrações excêntricas executadas em cima de uma caixa, a qual permitia o movimento para baixo do calcanhar (ou uma dorsiflexão do tornozelo). A ativação neural dos músculos GM, GL e SO foi obtida durante contrações isométricas voluntárias máximas. Ao final das 14 semanas de treino excêntrico, não foram encontradas diferenças na ativação neural dos três músculos avaliados. De acordo com os autores, a maior parte das adaptações decorrentes do treinamento excêntrico afetam principalmente as propriedades intrínsecas musculares, bem como os tecidos tendíneos.

As diferenças existentes nos programas treinamento excêntrico realizados nos estudos de Pensini et al. (2002) e Fouré et al. (2013) talvez possam explicar os resultados conflitantes encontrados. Primeiramente, Pensini et al. (2002) aplicaram um programa de treino excêntrico durante quatro semanas (quatro sessões por semana; total de 16 sessões), enquanto que o treino de Fouré et al. (2013) teve duração de 14 semanas (total de 34 sessões). Apesar do treinamento de Pensini et al. (2002) ter menor duração, os autores utilizaram um implemento específico para o treino dos músculos flexores plantares, permitindo que a carga utilizada fosse sempre controlada (120% de 1-RM concêntrica), enquanto que o aumento da intensidade no estudo Fouré et al. (2013) foi realizado aumentando o número de repetições por exercício. Além disso, enquanto os sujeitos do estudo de Pensini et al. (2002) realizaram um total de 550 a 600 contrações excêntricas durante o período de treinamento, os indivíduos do estudo de Fouré et al. (2013) realizaram um total de ~6800 ações excêntricas. Dessa forma, apesar de ambos os estudos realizarem programas de treinamento excêntrico, estes possuíam

diferentes volumes e intensidades, o que poderia explicar os resultados conflitantes encontrados.

Em suma, os estudos têm mostrado que as adaptações neurais podem ocorrer entre quatro e oito semanas de treinamento excêntrico (Pensini et al., 2002; Baroni et al., 2013a), assim como em períodos mais longos (Higbie et al., 1996). Além disso, parece existir um consenso na literatura referente ao aumento da ativação neural durante testes excêntricos. No entanto, existem algumas incertezas quanto às adaptações causadas pelo treinamento excêntrico na ativação neural durante contrações isométricas e concêntricas. Além disso, a literatura é escassa quanto à avaliação da cronologia das adaptações neurais após programas de treinamento excêntrico (Baroni et al., 2013a), em especial no que tange aos efeitos sobre os músculos flexores plantares.

### **Adaptações musculares causadas pelo treinamento excêntrico**

A adaptação muscular também pode ser atribuída a alterações morfológicas musculares (Herzog et al., 1991). Isto ocorre devido à alta plasticidade do tecido muscular, o qual pode apresentar ganhos ou perdas de tecido contrátil conforme a variação de carga a que esta estrutura é submetida (Narici, 1999). Assim, as adaptações ocorridas na morfologia do músculo esquelético podem alterar a arquitetura muscular (Duclay et al., 2009; Reeves et al., 2009; Baroni et al., 2013b).

Entende-se por arquitetura muscular o arranjo geométrico com o qual as fibras são dispostas em relação à linha de ação da força produzida pelo músculo (Lieber e Fridén, 2000). Entre os principais parâmetros da arquitetura muscular estão o comprimento do fascículo (CF), o ângulo de penação (AP) e a espessura muscular (EM) (Fukunaga et al., 1997; Narici e Cerretelli, 1998; Blazevich et al., 2007, Baroni et al., 2013a, Baroni et al., 2013b). O CF é definido como o comprimento da trajetória fascicular entre a inserção do fascículo nas aponeuroses superficial e profunda dos músculos. O ângulo originado entre a aponeurose profunda do músculo e a linha de inserção dos fascículos musculares é considerado como o AP. A distância entre a aponeurose profunda e aponeurose superficial é adotada como a EM (Baroni et al., 2013a, Baroni et al., 2013b).

Moore et al. (2011) citam que o treinamento excêntrico causa hipertrofia do músculo esquelético. Os estudos realizados por Lynn et al. (1998) e Butterfield et al. (2005), utilizando modelo animal, demonstraram que o treinamento excêntrico aumenta o número de sarcômeros dispostos em série nas fibras musculares. Assumindo-se que um aumento no número de

sarcômeros em série gera um aumento no CF muscular, então esta alteração do número de sarcômeros em série pode ser avaliada indiretamente em humanos por meio de ultrassonografia (US) (Reeves et al., 2009; Baroni et al., 2013b).

As adaptações na morfologia do músculo esquelético após um programa de treinamento excêntrico foram alvo do estudo de Baroni et al. (2013b). Os autores submeteram 20 sujeitos do sexo masculino a um programa de treinamento excêntrico para os músculos extensores do joelho. O treinamento apresentou duração de 12 semanas, sendo realizado duas vezes por semana em um dinamômetro isocinético. Durante o período de treinamento, foi solicitado que os indivíduos realizassem contrações máximas excêntricas dos músculos extensores do joelho na velocidade de 60°/s. Nas primeiras quatro semanas de treino, os indivíduos realizaram três séries de 10 repetições. O número de repetições foi mantido em 10 durante todo o programa de intervenção, enquanto o número de séries foi aumentado para quatro e cinco, respectivamente, após quatro e oito semanas do início do programa de treinamento. Como resultado, os autores encontraram aumento do CF do músculo VL, em relação à situação de pré-treinamento, após quatro (5,4%), oito (6,5%) e 12 (7,0%) semanas de treinamento. Resultado semelhante foi encontrado para o músculo RF, no qual o CF aumentou após quatro (7,4%), oito (10%) e 12 (9,7%) semanas de treino.

Os dados de Baroni et al. (2013b) corroboram com os resultados encontrados no estudo de Reeves et al. (2009), no qual os autores submeteram os músculos extensores do joelho de idosos a um programa de treinamento excêntrico de 14 semanas. Os indivíduos foram treinados na máquina extensora de joelhos e no *leg press* com uma frequência de três sessões semanais. Cada indivíduo realizou duas séries de 10 repetições com intensidade em 80% de cinco repetições máximas excêntricas. Ao final das 14 semanas, os autores encontraram aumento de 20% no CF do músculo VL.

O comportamento do CF dos músculos extensores do joelho, encontrado nos estudos de Reeves et al. (2009) e Baroni et al. (2013b), foi semelhante aos achados de Duclay et al. (2009), que avaliaram o efeito do treinamento excêntrico na morfologia do músculo GM. Duclay et al. (2009) submeteram 10 indivíduos saudáveis do sexo masculino a um programa de treinamento excêntrico para os músculos flexores plantares. O treinamento teve duração de sete semanas, totalizando 18 sessões. Os indivíduos foram treinados em dois aparelhos distintos: um implemento específico para o treino dos músculos flexores plantares e um *leg press*. O volume de treino foi de seis séries de seis contrações excêntricas, com intensidade de 120% de 1-RM concêntrica. Após o período de treinamento, houve aumento do CF do músculo GM em repouso. Tais resultados indicam que adaptações semelhantes no CF podem

ocorrer em diferentes músculos, assim como em diferentes faixas etárias, quando submetidos ao treinamento excêntrico.

As adaptações ocorridas no CF podem estar relacionadas com as altas cargas impostas pelo treinamento, as quais podem ter induzido um grande alongamento das fibras musculares, servindo como estímulo para adição de sarcômeros em série (Reeves et al., 2009). De acordo com Proske et al. (2001) e Baroni et al. (2013b), uma resposta aguda comumente encontrada após repetidas contrações excêntricas é o dano muscular induzido pelo exercício, o qual ativa o processo de reparo do tecido por meio da adição de sarcômeros em série na fibra muscular. Dessa forma, as alterações encontradas no CF dos estudos citados podem estar associadas com o aumento do número de sarcômeros em série como resposta de reparo tecidual e proteção contra novos danos.

No entanto, outros estudos que avaliaram o efeito do treinamento excêntrico na morfologia muscular apresentam dados que vão de encontro aos achados de Reeves et al. (2009), Baroni et al. (2013b) e Duclay et al. (2009). Raj et al. (2012) submeteram 13 indivíduos idosos (de ambos os sexos) a um programa de treinamento excêntrico para os músculos extensores de joelho e flexores plantares. O treinamento teve duração de 16 semanas, sendo realizado duas vezes por semana. Um aparelho *leg press* 45° foi utilizado no treinamento dos músculos extensores do joelho, enquanto que um aparelho *leg press* foi utilizado tanto para o treinamento dos músculos extensores do joelho quanto para os músculos flexores plantares. O volume de treino foi de três séries de cinco repetições, com intensidade de 100% de 1-RM concêntrica. Após as 16 semanas, os autores não encontraram diferenças significativas no CF dos músculos VL e GM. Estes achados vão ao encontro dos resultados obtidos no estudo de Fouré et al. (2013). Neste estudo, a morfologia dos músculos flexores plantares de onze indivíduos saudáveis foi avaliada após treinamento excêntrico. Como resultado, os autores não encontraram diferenças no CF dos músculos GM, GL e SO após o período de treinamento. Os motivos para essas diferenças entre os estudos podem estar relacionados com o tipo de exercício escolhido para a realização do treinamento excêntrico, assim como com a sobrecarga mecânica a que foram submetidos os músculos flexores plantares, que parece ter sido diferente em função dos diferentes equipamentos utilizados no treinamento nos estudos. Dessa forma, apesar de haver evidências acerca do aumento do CF causado pelo treinamento excêntrico, parecem existir algumas controvérsias na literatura no que tange a resposta do CF frente a este tipo de treino.

Além do aumento do número de sarcômeros dispostos em série, o dano muscular pode levar a um aumento do número de sarcômeros em paralelo na fibra do músculo (Byrne et al.,

2004; Baroni et al., 2013b), o que pode alterar o AP. Blazevich et al. (2007) submeteram 11 indivíduos jovens a um programa de treinamento excêntrico dos músculos extensores do joelho. O treinamento teve duração de 10 semanas, sendo realizado três vezes por semana em um dinamômetro isocinético. Os sujeitos realizaram quatro (semanas 1-3), cinco (semanas 4-7), ou seis (semanas 8-10) séries de seis repetições máximas excêntricas na velocidade de 30°/s. A avaliação do AP do músculo VL foi realizada nas semanas zero, cinco e 10 por meio de US. Houve aumento no AP após cinco (11,9%) e 10 (21,4%) semanas de treinamento. Os achados de Duclay et al. (2009) vão ao encontro dos resultados de Blazevich et al. (2007), os quais encontraram aumento do AP do músculo GM, após sete semanas de treinamento excêntrico dos músculos flexores plantares.

O aumento do AP após um período de treinamento pode estar relacionado com a resposta hipertrófica da musculatura devido ao aumento do número de sarcômeros em paralelo na fibra muscular (Blazevich, 2006; Blazevich et al., 2007). Tal adaptação leva a um aumento do diâmetro da fibra muscular, ocasionando um aumento do AP (Byrne et al., 2004; Baroni et al., 2013b). Kawakami et al. (1993) encontraram aumento do AP em músculos hipertrofiados, mostrando a estreita relação entre a produção de força e esta variável da arquitetura muscular. De acordo com Blazevich (2006), o AP provavelmente aumenta a produção de força por três maneiras: primeiro, para um mesmo volume muscular, um músculo com maior AP terá sua área de secção transversa fisiológica (ASTF) aumentada, permitindo um aumento de tecido contrátil (sarcômeros em paralelo). Segundo, o AP aumenta a força por permitir que as fibras fiquem próximas do seu comprimento ótimo e, terceiro, por ter um tempo de encurtamento reduzido durante a contração (relacionada com o CF), a velocidade de encurtamento será menor, o que ocasiona aumento da força segundo a relação força-velocidade. Dessa forma, em músculos com maiores AP, uma maior produção de força pode se dar tendo em vista a adição de grande quantidade de material contrátil.

Apesar dos estudos de Blazevich et al. (2007) e Duclay et al. (2009) terem encontrado aumento no AP após um programa de treinamento excêntrico, outros estudos não obtiveram os mesmos resultados. Reeves et al. (2009) não encontraram alterações no AP do músculo VL após 14 semanas de treinamento excêntrico (pré-treino: 13,8°; pós-treino: 14,4°;  $p > 0,05$ ). Estes resultados corroboram com os achados de Baroni et al. (2013b), que não encontraram diferenças significativas no AP dos músculos VL (pré-treino: 17,3°; pós-treino: 17,2°;  $p = 0,54$ ) e RF (pré-treino: 8,7°; pós-treino: 8,7°;  $p = 0,70$ ) após 12 semanas de treinamento excêntrico. O comportamento do AP nos músculos extensores do joelho encontrado por Reeves et al. (2009) e Baroni et al. (2013b) vão ao encontro dos achados de Fouré et al.

(2013), que avaliaram o efeito do treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares. Neste estudo os autores não encontraram diferenças significativas no AP do GM (pré-treino: 22,7°; pós-treino: 21,6°;  $p>0,05$ ), GL (pré-treino: 13,3°; pós-treino: 12,6°;  $p>0,05$ ) e SO (pré-treino: 33,5°; pós-treino: 31,9°;  $p>0,05$ ). Estes resultados corroboram com os achados de Raj et al. (2012), que não encontraram diferenças no AP do músculo GM após 16 semanas de treinamento excêntrico (pré-treino: 19,6°; pós-treino: 18,9°;  $p>0,05$ ).

A manutenção do AP não é um resultado esperado após um período de treinamento excêntrico, uma vez que as altas cargas geradas durante o treinamento são consideradas como estímulo para a adição de sarcômeros em paralelo. Dessa forma, os autores têm encontrado dificuldades em responder tal comportamento. Baroni et al. (2012b) sugerem que este comportamento pode acontecer devido ao erro de medida embutido na análise de imagens de US. De acordo com os autores, a resposta adaptativa do AP devido ao treinamento de força é bastante próxima do erro de medida da técnica de análise, o que poderia explicar estudos que encontraram incrementos em marcadores de hipertrofia, sem mudanças no AP. Além disso, a manutenção do AP pode estar associada às possíveis alterações no conteúdo de gordura intramuscular decorrentes do treinamento de força. De acordo com Meyer et al. (2004) e Addison et al. (2014), o aumento de gordura intramuscular pode afetar a orientação das fibras musculares, causando, por exemplo, aumento do AP. Após um período de treinamento de força pode haver redução da gordura intramuscular e, conseqüentemente, aumento do tecido contrátil (i.e. aumento do número de sarcômeros em paralelo), o que não revelaria aumento do AP, uma vez que o novo tecido contrátil ocuparia o lugar do tecido adiposo perdido.

O aumento da EM é uma resposta esperada após o treinamento de força (Baroni et al., 2013b), uma vez que pode ocorrer adição no número de sarcômeros em série e/ou paralelo na fibra muscular. Muitos estudos avaliaram a EM após programas de treinamento excêntrico, e constataram aumento desta variável (Blazevich et al., 2007; Duclay et al., 2009; Reeves et al., 2009, Raj et al., 2012; Baroni et al., 2013a, Baroni et al., 2013b). No entanto, alguns estudos não têm encontrado aumento de massa muscular após períodos de treinamento excêntrico. Housh et al. (1998) submeteram nove indivíduos jovens do sexo masculino a um programa de treino excêntrico. O treinamento teve duração de oito semanas, sendo realizado três vezes por semana. Os indivíduos foram treinados na máquina extensora de joelhos, sendo a carga de treino de três a cinco séries de seis repetições, com intensidade de 80% de 1-RM excêntrica. A área de secção transversa anatômica (ASTA) dos músculos extensores do joelho foi avaliada por meio de ressonância magnética. Após o término do programa de treino, não foi

encontrado aumento significativo na ASTA, indicando ausência de efeito hipertrófico muscular.

Os achados de Housh et al. (1998) vão ao encontro dos resultados de Mouraux et al. (2000). Estes autores submeteram 10 indivíduos jovens (quatro mulheres e seis homens) a um programa de treinamento excêntrico submáximo para os músculos flexores plantares. O treinamento foi realizado em dinamômetro isocinético, durante seis semanas, sendo realizado três vezes por semana. Durante o período de treinamento, os indivíduos realizaram de três (semanas 1, 2 e 3) a seis (semanas 4, 5 e 6) séries de 10 repetições, com intensidade entre 30% a 80% do pico de torque excêntrico. A ASTA do músculo gastrocnêmio foi obtida por meio de ressonância magnética. Após o período de treinamento, os autores não encontraram diferenças significativas na ASTA do músculo gastrocnêmio, indicando a ausência de hipertrofia muscular.

O número de sarcômeros alinhados em paralelo está relacionado com a capacidade de produção de força máxima do músculo esquelético. Quando músculos possuem fibras arranjadas em paralelo (i.e. fibras que não são oblíquas em relação à linha de ação do músculo ou sem ângulo de penação), a ASTA pode ser utilizada como parâmetro representativo de alterações no número de sarcômeros em paralelo. No entanto, em músculos penados (como por exemplo, os gastrocnêmios e o VL) a ASTA não representa o corte perpendicular de todas as fibras musculares. Dessa forma, esta variável não pode ser utilizada como parâmetro indicativo de mudanças no número de sarcômeros em paralelo. No caso de músculos penados, o parâmetro que melhor indica alterações no número de sarcômeros em paralelo é a ASTF (Lieber e Fridén, 2000). Sendo assim, a utilização da ASTA nos estudos de Housh et al. (1998) e Mouraux et al. (2000) pode não ter mostrado possíveis alterações no número de sarcômeros em paralelo ocorridas após o período de treinamento excêntrico.

Em síntese, apesar de a literatura apontar alguns estudos que não encontraram aumento do CF, existem fortes indícios que o treinamento excêntrico pode causar incremento no CF e EM. A adição de sarcômeros em série na fibra muscular parece ser o principal motivo para tais adaptações. Quanto ao comportamento do AP, parece não existir um consenso na literatura se esta variável sofre alterações após períodos de treinamento excêntrico, uma vez que evidências de limitações metodológicas podem explicar a ausência de incremento nesta variável.

As alterações na morfologia muscular podem estar presentes nas primeiras quatro ou cinco semanas, bem como permanecerem alteradas após períodos mais longos de treinamento (Blazevich et al., 2007; Baroni et al., 2013a). No entanto, poucos foram os estudos que

avaliaram a cronologia das alterações musculares durante programas de treinamento excêntrico (Blazevich et al., 2007; Baroni et al., 2013a; Baroni et al., 2013b). Além disso, estes estudos voltaram suas atenções para as adaptações ocorridas nos músculos extensores do joelho. Dessa forma, não foram encontrados estudos que procurassem entender o curso das adaptações na morfologia de músculos flexores plantares, submetidos a um período de quinze semanas de treinamento excêntrico.

### **Adaptações tendíneas causadas pelo treinamento excêntrico**

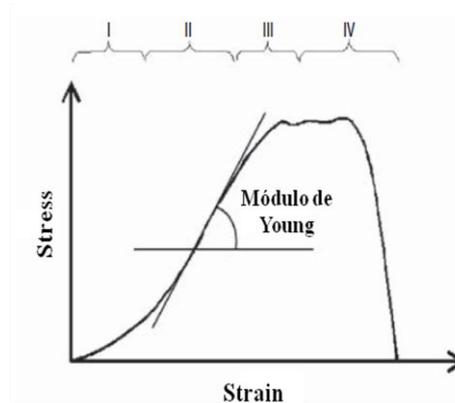
Tendões são tecidos fibrosos densos que conectam o músculo ao osso (Nigg e Herzog, 1999). São compostos primariamente por feixes altamente organizados de colágeno, representando 70% do peso seco, sendo 95% de colágeno do tipo I (Maffulli, 1999). Além do colágeno, os tendões são constituídos de uma pequena quantidade de elastina, proteoglicanas e glicoproteínas adesivas (Sharma e Maffulli, 2005; Doral et al., 2010). As fibras de colágeno são arranjadas em fascículos tendo orientação predominantemente longitudinal (Maffulli, 1999; Richards, et al. 2001; Harris e Peduto, 2006).

Os tendões são estruturas especializadas responsáveis por transferir forças entre o músculo e o osso, e agem absorvendo forças externas limitando o dano muscular (Sharma e Maffulli, 2005; Urlando e Hawkins, 2007). Além disso, possuem grande força mecânica, boa flexibilidade e um ótimo nível de elasticidade (Sharma e Maffulli, 2005). Apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos, dependendo de características morfológicas, fisiológicas e mecânicas dos músculos e ossos aos quais estão conectados (Nigg e Herzog, 1999). Mudanças na atividade física podem alterar a frequência, duração e/ou magnitude de forças aplicadas pelo músculo esquelético no tendão, como ocorre após um período de treinamento de força (Urlando e Hawkins, 2007; Duclay et al., 2009; Seynnes et al., 2009), gerando possíveis adaptações nas propriedades mecânicas tendíneas.

As propriedades mecânicas dos tendões, *in vitro*, têm sido estudadas utilizando métodos que envolvem o alongamento de tendões isolados até a falha total. Durante o teste, o alongamento tendíneo e a força aplicada neste tecido são obtidos, e quatro diferentes respostas tendíneas podem ser identificadas. A porção inicial, região I, caracteriza-se por ser côncava (*toe region*) e está relacionada à redução da ondulação (ou com o estiramento inicial) das fibras de colágeno com o aumento da tensão. A partir deste ponto, onde se encontra a região II, os tendões se deformam de forma linear e as fibras se tornam mais paralelas. A partir da região III, a curva deixa de ser linear sendo o ponto em que começam a ocorrer danos

estruturais nas fibras. Com o aumento da tensão os danos estruturais aumentam significativamente até que, na região IV, a falha do tecido ocorre rapidamente, até o ponto de falha final (Maffulli e Almekinders, 2007). A partir deste teste as relações força-deformação e *stress-strain* podem ser obtidas, as quais ajudam a demonstrar o comportamento mecânico tendíneo (Sharma e Maffulli, 2005; Maffulli e Almedinders, 2007).

A relação força-deformação quantifica a deformação ocorrida no tendão em função de uma força aplicada. O formato da curva força-deformação pode ser diferente entre as espécies, devido às diferenças nas dimensões dos tendões. Dessa forma, a normalização da relação força-deformação pelas dimensões do tendão gera a relação *stress-strain*, a qual ajuda a demonstrar o comportamento mecânico tendíneo (Sharma e Maffulli, 2005) entre diferentes espécies. O *stress* é obtido por meio da normalização da força aplicada no tendão pela área de seção transversa desta estrutura. O *strain* é obtido por meio da normalização da variação do comprimento do tendão (subtração entre o comprimento final e o comprimento inicial) pelo comprimento inicial desta estrutura. A partir das relações força-deformação e *stress-strain* podem ser obtidos a rigidez e o módulo de Young de tendões, respectivamente. A rigidez tendínea é calculada a partir da relação força-deformação, e é considerada uma medida do desempenho de tensão de toda a estrutura tendínea. O módulo de Young é obtido por meio da relação *stress-strain* e reflete as propriedades materiais de um tendão (Figura 1).



**Figura 1.** Típica curva da relação *stress-strain* de um tendão submetido a teste de força tensional. I: *toe region* (região dos dedos); II: região linear (região elástica); III e IV: regiões de falha do tecido. O módulo de Young é calculado a partir da inclinação da região linear da curva. Adaptado de Maffulli e Almekinders, 2007.

Métodos de avaliação das propriedades mecânicas tendíneas *in vivo* permitem a investigação de adaptações funcionais ocorridas no tendão (Maganaris et al., 2008). A avaliação das propriedades mecânicas tendíneas pode ser realizada por meio de mobilizações passivas articulares, sendo a deformação tendínea, obtida por US, e a força gerada pelo tendão mensurada (Morse et al., 2008; Abellana et al., 2009; Mizuno et al., 2011; Nakamura et al.,

2011). As propriedades mecânicas tendíneas também podem ser mensuradas durante contrações isométricas musculares (Magnusson et al., 2001; Geremia et al., 2015). Segundo Maganaris et al. (2008), este método é baseado no acompanhamento em tempo real, por meio de US, de um ponto de referência da unidade músculo-tendão durante contrações isométricas. A força muscular aplicada no tendão é medida por meio de dinamometria. Durante as contrações isométricas podem ocorrer rotações articulares, independente da fixação externa, que causam movimentos indesejados de flexão plantar, os quais superestimam a deformação tendínea (Magnusson et al., 2001). Desta forma, alguns estudos têm buscado avaliar o movimento articular durante as contrações e minimizar os seus efeitos por meio de relações entre estes movimentos e a deformação tendínea gerada (Magnusson et al., 2001; Muramatsu et al., 2001; Magnusson et al., 2003). Além disso, a musculatura antagonista é ativada durante as contrações, o que influencia na mensuração da força agonista (Mademli e Arampatzis, 2005). Dessa forma, estudos tem feito a correção do torque agonista por meio da estimativa do torque antagonista (Mademli et al., 2004; Mademli e Arampatzis, 2005; Arya e Kulig, 2010; Geremia et al., 2015). Esta estimativa é realizada por meio de uma relação direta entre ativação elétrica muscular antagonista e torque (Arya e Kulig, 2010). Após a correção do torque agonista, a deformação longitudinal tendínea é mensurada em função da força muscular aplicada.

A avaliação *in vivo* permite, por exemplo, avaliar precisamente mudanças nas características biomecânicas de tendões após períodos de treinamento (Urlando e Hawkins, 2007; Maganaris et al., 2008; Duclay et al., 2009; Seynnes et al., 2009). De acordo com Fouré et al. (2013), o treinamento excêntrico é um estímulo mecânico frequentemente utilizado no contexto clínico, durante a reabilitação de pacientes que possuem lesões tendíneas. Dessa forma, o entendimento das adaptações geradas pelo treinamento excêntrico nas propriedades mecânicas tendíneas é fundamental, uma vez que este conhecimento pode ser útil na prescrição de programas de reabilitação.

Duclay et al. (2009) avaliaram as propriedades mecânicas do tendão do músculo gastrocnêmio medial de indivíduos saudáveis após programa de treinamento excêntrico. Após sete semanas de treinamento, os indivíduos apresentaram aumento da rigidez tendínea. O estudo de Duclay et al. (2009) vai ao encontro dos achados de Kay et al. (2016), os quais apresentaram aumento de 31% da rigidez do tendão de Aquiles após seis semanas de treinamento excêntrico isocinético. Estes resultados corroboram com outros estudos que avaliaram as propriedades mecânicas tendíneas após um período de treinamento de força, encontrando aumento da rigidez e do módulo de Young (Reeves et al., 2003; Maganaris et al.,

2004; Fouré et al., 2013). De acordo com Kannus et al. (1997), o treinamento físico altera as propriedades do tendão, tornando estas estruturas mais fortes e resistentes à lesão. Além disso, o estresse mecânico causado pelo alongamento das estruturas tendíneas pode promover o aumento da produção de colágeno do tipo I (Duclay et al., 2009), o que pode modificar as propriedades mecânicas do tendão, explicando as adaptações tendíneas decorrentes do treinamento. Este aumento da rigidez tendínea pode ocorrer devido a alterações nas propriedades materiais (i.e. módulo de Young), nas propriedades morfológicas (i.e. hipertrofia), ou em ambas. Wiesinger et al. (2015) sugerem que o aumento da rigidez tendínea está mais relacionado com mudanças nas propriedades materiais do que nas propriedades morfológicas, especialmente nas primeiras semanas de treinamento (Bohm et al., 2015; Wiesinger et al., 2015).

Apesar dos estudos de Duclay et al. (2009) e Kay et al. (2016) apresentarem aumento da rigidez tendínea após o treino excêntrico, estes achados vão de encontro aos resultados de Morrissey et al. (2011). Estes autores submeteram 19 indivíduos saudáveis (seis homens e 13 mulheres) a um programa de treinamento excêntrico para os músculos flexores plantares. O treinamento teve duração de seis semanas, sendo os exercícios realizados de acordo com o estudo de Alfredson et al. (1998), no qual os indivíduos permaneciam na ponta dos pés, sendo as contrações excêntricas executadas durante o movimento para baixo do calcanhar, os quais permaneciam livres até atingir o maior alongamento possível dos músculos flexores plantares (dorsiflexão máxima do tornozelo). A avaliação das propriedades mecânicas do tendão de Aquiles foi obtida durante contrações isométricas voluntárias máximas, sendo a junção miotendínea do músculo GM avaliada durante o teste. Após seis semanas de treinamento excêntrico houve redução na rigidez tendínea (pré: 20,9 N/mm; pós: 17,2 N/mm) e no módulo de Young (pré: 57,9 MPa; pós: 48,4 MPa). Segundo os autores, a repetição de cargas poderia gerar grandes deformações na estrutura tendínea, semelhante ao que ocorre durante programa de alongamentos balísticos, o que poderia explicar o aumento da deformação do tendão e, conseqüentemente, a redução da rigidez. No entanto, os autores enfatizam que a comparação dos resultados deve ser feita com cuidado, pois, embora o treinamento excêntrico tenha algumas semelhanças com alongamentos balísticos, as velocidades de execução podem ser diferentes, o que pode afetar os resultados.

Apesar de Mahieu et al. (2008) aplicarem um programa de treinamento semelhante a Morrissey et al. (2011), os resultados encontrados foram distintos. Mahieu et al. (2008) submeteram 35 indivíduos saudáveis (18 homens e 17 mulheres) a um programa de treinamento excêntrico para os músculos flexores plantares. O treinamento apresentou

duração de seis semanas, sendo realizado diariamente, e com carga de treino de três séries de 15 repetições. As propriedades mecânicas do tendão de Aquiles foram obtidas por meio de contrações isométricas voluntárias máximas e, concomitantemente, a aponeurose do músculo GM foi rastreada por meio de US. O treinamento excêntrico não promoveu alterações na rigidez tendínea (pré: 45,4 N/mm; pós: 49,7 N/mm), o que levou os autores a sugerirem que o treinamento excêntrico não afeta as características mecânicas tendíneas.

Apesar de alguns estudos terem encontrados fortes indícios que o treinamento de força aumenta a rigidez tendínea (Reeves et al., 2003; Maganaris et al., 2004; Duclay et al., 2009; Fouré et al., 2013; Kay et al., 2016), outros, no entanto, encontraram resultados que indicam redução (Morrissey et al., 2011) ou manutenção (Mahieu et al., 2008) da complacência tendínea após períodos de treinamento. As diferenças encontradas entre os estudos podem estar relacionadas com o tempo de treinamento. Os programas de treinamento de força de Mahieu et al. (2008), Morrissey et al. (2011) e Fouré et al. (2013) foram semelhantes. No entanto, Fouré et al. (2013) submeteram os indivíduos a 14 semanas de treinamento excêntrico, enquanto que Mahieu et al. (2008) e Morrissey et al. (2011) aplicaram o treinamento por seis semanas. Isso sugere que, diferente do que se observa para o tecido muscular, o tecido tendíneo necessita de períodos mais longos de sobrecarga durante um programa de treinamento a fim de que possam ser geradas alterações na estrutura tendínea com impacto nas propriedades mecânicas do tecido tendíneo.

Além do tempo, os métodos de treinamento podem explicar algumas diferenças encontradas entre os estudos. Duclay et al. (2009) e Kay et al. (2016) aplicaram programas de treinamento excêntrico de sete e seis semanas, respectivamente, período de tempo semelhante a Mahieu et al. (2008) e Morrissey et al. (2011). No entanto, os estudos de Duclay et al. (2009) e Kay et al. (2016) utilizaram maiores intensidades de treinamento (120% de 1-RM concêntrica e 12 contrações excêntricas isocinéticas máximas, respectivamente), enquanto que nos estudos de Mahieu et al. (2008) e Morrissey et al. (2011) os indivíduos realizaram uma a três séries de 15 repetições excêntricas, sendo a intensidade dos exercícios controlada conforme a dificuldade dos indivíduos. Estudos que buscaram avaliar os efeitos de diferentes sobrecargas no tendão de Aquiles (55% - 90% da contração voluntária máxima) (Arampatzis et al., 2007) e no tendão patelar (80% de 1-RM concêntrica-excêntrica e 80% de 1-RM excêntrica) (Malliaras et al., 2013) suportam a ideia de que são necessários treinamentos com alta intensidade para aumentar a rigidez tendínea. De acordo com Bohm et al. (2015), a magnitude da sobrecarga aplicada no tendão é o principal fator de adaptação tendínea ao treinamento de força. Arampatzis et al. (2007, 2010) sugerem que existe um limiar para que o

estímulo mecânico influencie a homeostase da matriz extracelular e regule as adaptações anabólicas da célula. Dessa forma, um estímulo mecânico adequado promove a síntese de um colágeno mais forte e deforma os fibroblastos (promovendo a síntese de proteínas por meio da transdução mecânica), alterando os componentes da matriz extracelular. Portanto, o aumento da rigidez tendínea parece estar associado a maiores intensidades e/ou duração do treinamento excêntrico.

A literatura apresenta indícios que o aumento da rigidez tendínea pode ocorrer tanto em períodos curtos (Duclay et al., 2009; Kay et al., 2016), como em períodos mais longos de treinamento (Fouré et al., 2013). Além disso, alguns resultados controversos referentes à adaptação tendínea podem ser explicados pelas diferenças metodológicas existentes entre os estudos. Por fim, dados sobre a cronologia das adaptações no tendão de Aquiles causadas pelo treinamento de força são escassos na literatura (Urlando e Hawkins, 2007; Kubo et al., 2010; Kubo et al., 2012). Não foram encontrados estudos que avaliassem a cronologia das adaptações do tendão de Aquiles após períodos de treinamento excêntrico. Assim, existem lacunas importantes a serem preenchidas na literatura referentes à adaptação tendínea dos flexores plantares após programas de treinamento excêntrico.

Um resumo das adaptações neurais (atividade eletromiográfica) durante contrações máximas, morfológicas (geometria fascicular e massa muscular) e tendíneas (propriedades mecânicas e morfológicas) advindas do treinamento excêntrico e discutidas acima são apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2.** Adaptações neurais, morfológicas e tendíneas geradas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares.

	Adaptações Neurais	Adaptações Morfológicas	Adaptações tendíneas
Duclay et al. (2009)	-	CF= ↑20%; AP= ↑8%; EM= ↑14%;	Rigidez <sub>ativa</sub> = ↑28%
Fouré et al. (2013)	ISO <sub>GM-SOL-GL</sub> = ns	CF <sub>GM-SOL-GL</sub> = ns AP <sub>GM-SOL-GL</sub> = ns EM <sub>GM-SOL-GL</sub> = ns	Rigidez <sub>ativa</sub> = ns Rigidez <sub>passiva</sub> = ↑22% AST= ns CT <sub>SOL-GL</sub> = ns CT <sub>GM</sub> = ↓3%
Gomes et al. (2016)	-	-	AST= ns
Kay et al. (2016)	-	-	Rigidez <sub>ativa</sub> = ↑31%
Mahieu et al. (2008)	-	-	Rigidez <sub>ativa</sub> = ns
Morrissey et al. (2011)	-	-	Rigidez <sub>ativa</sub> = ↓18% AST= ni Módulo de Young= ↓16%
Mouraux et al. (2000)	-	ASTA= ns	AST= ns
Pensini et al. (2002)	EXC <sub>coa</sub> = ↓22% CON <sub>coa</sub> = ↓27% ISO <sub>coa</sub> = ns; EXC <sub>GM</sub> = ↑51%; EXC <sub>SOL-GL</sub> = ns; ISO <sub>GM</sub> = ↑76%; ISO <sub>SOL</sub> = ↑86%; ISO <sub>GL</sub> = ↑12%; CON <sub>GM-SOL-GL</sub> = ns	-	-
Raj et al. (2012)	-	CF= ns; AP= ns; EM= ns;	-

ISO = testes isométricos; EXC = testes excêntricos; CON = testes concêntricos; CF = comprimento de fascículo; AP = ângulo de penação; EM = espessura muscular; ASTA = área de secção transversa anatômica; AST = área de secção transversa; CT = comprimento de tendão; Rigidez<sub>ativa</sub> = rigidez tendínea obtida durante contrações musculares; Rigidez<sub>passiva</sub> = rigidez tendínea obtida durante alongamentos passivos; coa = coativação; GM = gastrocnêmio medial; GL = gastrocnêmio lateral; SOL = sóleo; ns = não significativo; ni = não informado. Obs: em estudos que não apresentaram os valores no texto ou em tabelas, os incrementos percentuais foram obtidos por meio da análise de figuras com auxílio do software ImageJ (National Institute of Health, USA).

## **Adaptações na produção de força muscular causadas pelo treinamento excêntrico**

As adaptações causadas pelo treinamento excêntrico na produção de força máxima muscular foram avaliadas em diversos estudos (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002; Blazeovich et al., 2007; Poletto et al., 2008; Duclay et al., 2009; Baroni et al., 2013a).

Tomberlin et al. (1991) submetem 21 sujeitos a um programa de treinamento excêntrico para os músculos extensores do joelho. O treinamento teve duração de seis semanas, sendo realizado três vezes por semana, em dinamômetro isocinético. Durante o período de treinamento excêntrico, foi solicitado que os indivíduos realizassem três séries de 10 repetições máximas com velocidade de 100°/s. Ao final das seis semanas de treinamento houve aumento de 53% do torque excêntrico dos músculos extensores do joelho. Estes achados vão ao encontro dos resultados encontrados por Hortobágyi et al. (1996b), os quais submetem 14 indivíduos do sexo feminino a um período de seis semanas de treinamento excêntrico para os músculos extensores do joelho. O treinamento foi realizado em dinamômetro isocinético, com frequência de quatro vezes por semana, carga de treino de quatro séries de seis a 10 repetições submáximas, com velocidade de 60°/s. Após o período de treinamento houve aumento significativo da produção de força muscular de 42% (pré-treino: 527 N; pós-treino: 749 N) durante contrações excêntricas máximas.

Poucos estudos avaliaram a produção de força máxima excêntrica dos músculos flexores plantares após programas de treinamento excêntrico. Mouraux et al. (2000) submetem 10 indivíduos jovens a um programa de treinamento excêntrico submáximo para os músculos flexores plantares. O treinamento foi realizado em dinamômetro isocinético, durante seis semanas. Durante o período de treinamento, os indivíduos realizaram de três a seis séries de 10 repetições, com intensidade entre 30% a 80% do pico de torque excêntrico. A produção de torque excêntrico máximo foi avaliada nas velocidades de 30°/s, 60°/s e 90°/s. Após seis semanas houve aumento na produção de torque excêntrico nas três velocidades avaliadas. A velocidade de 30°/s apresentou um aumento de 38% (pré-treino: 136 Nm, pós-treino: 187 Nm), 60°/s aumentou 20% (pré-treino: 128 Nm, pós-treino: 154 Nm) e 90°/s apresentou um incremento de 36% (pré-treino: 124 Nm, pós-treino: 169 Nm).

Os resultados encontrados por Mouraux et al. (2000) corroboram com os achados de Pensini et al. (2002), os quais avaliaram o efeito do treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares. Oito indivíduos do sexo masculino realizaram um programa de treinamento excêntrico com duração de quatro semanas. O treinamento consistiu na realização de seis séries de seis contrações excêntricas a 120% de 1-RM concêntrica, realizado em um

implemento específico para o treino dos músculos flexores plantares. A velocidade de treino utilizada foi de 15°/s a 20°/s. Como resultado, os autores encontraram aumento significativo de 16% na produção de torque excêntrico na comparação das situações pré- (99 Nm) e pós-treinamento (115 Nm).

É consenso na literatura que a produção de força muscular excêntrica aumenta após um período de treinamento excêntrico. Outros estudos que avaliaram a produção de força em testes excêntricos também encontraram aumento desta variável após um período de treinamento (Hortobágyi et al., 1996a; Hortobágyi et al., 1996b; Blazevich et al., 2007; Poletto et al., 2008; Rocha et al., 2011; Baroni et al., 2013a). De acordo com Baroni et al. (2013a), o aumento da produção de força muscular durante contrações excêntricas máximas é esperado, uma vez que isto está relacionado com a especificidade do treinamento. No entanto, a literatura é controversa quanto ao ganho de força máxima concêntrica após programas de treinamento excêntrico.

No estudo de Symons et al. (2005) nove indivíduos idosos, de ambos os sexos, realizaram um programa de treinamento excêntrico dos músculos extensores do joelho durante 12 semanas. Foram realizadas três sessões de treino por semana em dinamômetro isocinético, sendo realizadas três séries de 10 repetições cada, com velocidade de 90°/s. Ao final das 12 semanas de treinamento excêntrico, os autores encontraram um aumento de 10% na produção de torque concêntrico. Estes achados corroboram com os resultados encontrados por Schroeder et al. (2004). Neste estudo, 28 mulheres jovens foram submetidas a programas de 16 semanas de treino excêntrico dos músculos extensores do joelho. Os sujeitos foram divididos em dois grupos: enquanto um grupo (n=14) realizou treinamento excêntrico de baixa intensidade (três séries de 10 repetições; intensidade: 75% de 1-RM concêntrica), o outro grupo (n=14) realizou treinamento excêntrico de alta intensidade (três séries de seis repetições; intensidade: 125% de 1-RM concêntrica). O treinamento foi realizado duas vezes por semana na máquina extensora de joelhos. A produção de força dos músculos extensores do joelho foi avaliada por meio do teste de 1-RM. O grupo submetido ao treinamento excêntrico de baixa intensidade teve um aumento de 24% na produção de torque concêntrico, enquanto o grupo que realizou o treinamento de alta intensidade teve um aumento de 19% nesta variável.

O aumento do torque concêntrico também foi encontrado após programas de treinamento excêntrico para os músculos flexores plantares. Pensini et al. (2002) encontraram aumento de 16% no torque concêntrico (velocidade: 60°/s) após quatro semanas de treinamento excêntrico. Resultado semelhante foi encontrado por Mouraux et al (2000), os

quais constataram aumento de 18% no torque concêntrico, avaliado na velocidade de 60°/s, após seis semanas de treino excêntrico. O estudo de Baroni et al. (2013a) encontrou aumento da produção de torque concêntrico após período de treinamento excêntrico. Após 12 semanas de treino, os autores constataram que o aumento do torque concêntrico encontrado foi acompanhado de aumento na espessura dos músculos extensores do joelho, no entanto sem alterar a ativação elétrica muscular. Dessa forma, de acordo com Baroni et al. (2013a), o aumento da força concêntrica está relacionado com adaptações morfológicas musculares, mas não com alterações na capacidade de ativação máxima muscular.

Apesar de alguns estudos apresentaram aumento da produção de força concêntrica após períodos de treinamento excêntrico, outros estudos não encontraram este resultado. Raue et al. (2005) submeteram seis indivíduos jovens do sexo masculino a um programa de treinamento excêntrico para os músculos extensores do joelho. O treinamento foi realizado na máquina extensora de joelhos, e a produção de força máxima concêntrica foi avaliada por meio do teste de 1-RM. O período de treinamento foi de quatro semanas, sendo realizado três vezes por semana. Os indivíduos realizaram quatro séries de oito repetições, com intensidade entre 75% e 100% de 1-RM. Ao final das quatro semanas de treinamento, apesar do valor 7% maior na produção de força máxima concêntrica, este aumento não foi significativo. Os resultados encontrados por Raue et al. (2005) após um treinamento excêntrico de curta duração (quatro semanas), foram semelhantes aos encontrados por Rocha et al. (2011), os quais aplicaram um programa de treino excêntrico por um período de tempo maior (12 semanas). Rocha et al. (2011) avaliaram os efeitos de um período de treinamento excêntrico em indivíduos jovens e saudáveis do sexo masculino. O treinamento foi realizado em dinamômetro isocinético, com velocidade de 60°/s, durante 12 semanas. Os indivíduos realizaram três sessões de treino por semana (com exceção da primeira semana, na qual foram realizadas apenas duas sessões), sendo constituídas de duas a cinco séries de sete a nove repetições excêntricas máximas. A produção de torque concêntrico foi avaliada nas velocidades de 60°/s, 120°/s, 180°/s, 240°/s e 300°/s. Ao final das 12 semanas de treinamento não houve alteração na produção de torque concêntrico máximo em todas as velocidades avaliadas.

De acordo com Reeves et al. (2009), a ausência de alterações na produção de força concêntrica evidencia a especificidade das repostas do treinamento. O conceito de especificidade do treinamento vai ao encontro de outros estudos que também aplicaram treinamento excêntrico e não encontraram alterações na produção de força concêntrica (Tomberlin et al., 1991; Hortobágyi et al., 1996a, Hortobágyi et al., 1996b, Seger e

Thorstensson, 2005). No entanto, não foram encontrados estudos que, após um programa de treinamento excêntrico para os músculos flexores plantares, mostrassem redução ou manutenção da produção de força concêntrica.

Resultados controversos também são encontrados no que tange a resposta da produção de força isométrica máxima após períodos de treinamento excêntrico. Enquanto alguns estudos apresentam aumento da produção de força isométrica (Pensini et al., 2002; Blazevich et al., 2008; Duclay et al., 2009; Rocha et al., 2011; Baroni et al., 2013a), outros estudos não têm encontrado alterações significativas neste parâmetro (Seger et al., 1998; Reeves et al., 2009). Dos estudos mencionados anteriormente, apenas Pensini et al. (2002) e Duclay et al. (2009) avaliaram a produção de força isométrica dos músculos flexores plantares, demonstrando que o treinamento excêntrico destes músculos pode gerar aumento desta variável. Este comportamento pode estar relacionado com adaptações neurais (Pensini et al., 2002), musculares e tendíneas (Duclay et al., 2009). As adaptações na produção de força muscular (excêntrica, isométrica e concêntrica) advindas do treinamento excêntrico e discutidas acima são apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3.** Adaptações na força muscular geradas pelo treinamento excêntrico de flexores plantares.

	<b><math>\Delta\%</math> da força (entre pré- e pós-treinamento)</b>		
	<b>EXC</b>	<b>ISO</b>	<b>CON</b>
Duclay et al. (2009)	-	↑13%	-
Mouraux et al. (2000)	↑20-38% <sup>VD</sup>	-	↑18-35% <sup>VD</sup>
Pensini et al. (2002)	↑16%	↑30%	↑14%

$\Delta\%$  = alteração percentual; EXC = testes excêntricos; ISO = testes isométricos; CON = testes concêntricos; <sup>VD</sup> = velocidade dependente.

Estudos têm demonstrado que incrementos na força podem acontecer entre quatro e oito semanas de treinamento excêntrico (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002, Blazevich et al., 2007; Duclay et al., 2009; Santos et al., 2010; Baroni et al., 2013a). Além disso, estudos que utilizaram períodos mais longos de treinamento encontraram aumento da produção de força após 12 (Rocha et al., 2011; Baroni et al., 2013a) e 14 semanas (Reeves et al., 2009). No entanto, poucos estudos observaram as adaptações cronológicas na produção de força muscular (Blazevich et al., 2007; Baroni et al., 2013a).

Em resumo, o treinamento excêntrico parece promover incrementos significativos na produção de força excêntrica. Assim, a especificidade do treinamento poderia responder por

tal resultado. No entanto, as alterações ocorridas na produção de força concêntrica e isométrica são controversas. Além disso, apesar dos estudos apresentarem resultados que indicam ganhos de força a curto, médio e longo prazo, poucos foram os estudos que avaliaram a cronologia destas adaptações. Ainda, não foram encontrados estudos que avaliassem a cronologia das adaptações na força geradas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares. Assim, poucos foram os estudos que avaliaram as adaptações na força muscular dos flexores plantares geradas pelo treinamento excêntrico.

### **Análise crítica da literatura**

De acordo com a literatura, o treinamento excêntrico pode gerar alterações neuromusculares. Enquanto o aumento da ativação neural durante testes excêntricos máximos é frequentemente encontrado, existem dados conflitantes a respeito desta variável durante testes isométricos e concêntricos máximos. Além disso, existem fortes indícios que este tipo de treinamento afeta a morfologia muscular, aumentando o CF e a EM. No entanto, as adaptações que podem ocorrer no AP dos fascículos musculares são controversas.

Além de alterações neuromusculares, o treinamento excêntrico pode causar adaptações nas propriedades tendíneas. Entretanto, os resultados encontrados são bastante controversos, uma vez que estudos encontraram aumento, redução ou manutenção da rigidez tendínea após períodos de treinamento excêntrico. Por fim, as alterações causadas na força muscular também são conflitantes. Enquanto o aumento da força durante testes excêntricos surge como um resultado comum entre os estudos, não existe um consenso no que tange aos incrementos na produção de força durante testes isométricos e concêntricos.

A revisão da literatura sobre as adaptações causadas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares de indivíduos saudáveis evidencia uma série de limitações. Muitos resultados conflitantes são encontrados uma vez que raros são os consensos quanto à adaptação neural, muscular e tendínea geradas pelo treinamento excêntrico nestes músculos. Grande parte destes conflitos está relacionada com diferenças nos programas de treinamento. Apesar dos estudos utilizarem programas de treinamento com contrações excêntricas, muitos não se preocupam em destacar que seus resultados estão atrelados também a outras variáveis importantes do treinamento. Os estudos apresentam grandes diferenças entre si em parâmetros como: período de treinamento (4-16 semanas), frequência (2-7 vezes por semana), volume (3 x 5 – 6 x 10), intensidade (120% de 1-RM – peso corporal) e tipo de exercício (*leg press* – dinamômetros isocinéticos). Por fim, a velocidade de contração muscular é outra variável

importante do treinamento que apresenta grandes variações entre os estudos. A maior parte dos estudos controla a velocidade pelo tempo de execução da contração (2 – 6 segundos). Dos estudos considerados, poucos (Mouraux et al., 2000; Gomes et al., 2016; Kay et al., 2016) controlaram a velocidade de contração por meio de dinamometria isocinética.

Dessa forma, os resultados encontrados, muitas vezes, podem não ser explicados apenas pelo tipo de contração muscular envolvida, mas sim, por diferenças em outras variáveis importantes do treinamento. Além disso, dados sobre a cronologia das adaptações musculotendíneas causadas pelo treinamento de força são escassos na literatura (Urlando e Hawkins, 2007; Kubo et al., 2010; Kubo et al., 2012). No entanto, estes estudos avaliaram a cronologia destas adaptações no treinamento de força isoinercial (concêntrico/excêntrico) (Urlando e Hawkins, 2007) e isométrico (Kubo et al., 2010; Kubo et al., 2012). Dessa forma, não foram encontrados estudos que avaliassem a cronologia das adaptações do tendão de Aquiles após períodos de treinamento excêntrico. Assim, existem lacunas importantes a serem preenchidas na literatura em relação ao curso das adaptações neuromusculares, tendíneas e na produção de força causadas pelo treinamento exclusivamente excêntrico.

## CAPÍTULO II

### **Cronologia das adaptações neuromecânicas e morfológicas do tríceps sural ao treinamento excêntrico**

#### **RESUMO**

Os exercícios excêntricos são muito utilizados em programas de prevenção, reabilitação e de condicionamento físico. No entanto, os seus efeitos nas propriedades neuromecânicas e morfológicas dos músculos flexores plantares não estão totalmente elucidados. O objetivo do presente estudo foi avaliar a magnitude e a cronologia das adaptações ocorridas nas propriedades neuromecânicas e morfológicas do tríceps sural durante um programa de treinamento excêntrico. Vinte participantes do sexo masculino realizaram um programa de treinamento excêntrico isocinético (duas vezes por semana, 3-5 séries de 10 repetições máximas, com velocidade de 30°/s). As avaliações das propriedades neuromecânicas (torque e atividade eletromiográfica) e morfológicas (espessura muscular) dos flexores plantares foram realizadas a cada quatro semanas. Ao final de 12 semanas, o programa de treinamento excêntrico aumentou significativamente a produção de torque máximo excêntrico (32%), isométrico (13%) e concêntrico (20%); aumentou a atividade eletromiográfica máxima excêntrica (32%) e isométrica (14%); e aumentou a espessura muscular (14%). Além disso, ao final do treinamento, os ângulos do pico de torque excêntrico e concêntrico foram deslocados para posições em que os músculos estavam mais alongados. O torque máximo e a espessura muscular aumentaram progressivamente até a oitava semana de treinamento. A ativação neural durante contrações excêntricas e isométricas aumentou após quatro semanas de treino, e permaneceu constante até o final do treinamento. A ativação neural durante contrações concêntricas permaneceu inalterada durante todo o período de treinamento. Assim, estes resultados sugerem que: 1) os ganhos na produção de força excêntrica e isométrica podem ser explicados pelo aumento da ativação neural e da massa muscular, enquanto que o aumento do torque concêntrico não parece não ser atribuído à adaptações neurais; 2) o treinamento excêntrico pode deslocar o ângulo do pico de torque para maiores comprimentos musculares; 3) as adaptações neurais encontradas nas contrações excêntricas e isométricas ocorrem predominantemente nas primeiras quatro semanas de treinamento, enquanto que as adaptações morfológicas ocorrem progressivamente até a oitava semana de treino.

**Palavras-chaves:** treinamento de força, exercício excêntrico, flexores plantares, torque, EMG, espessura muscular.

## INTRODUÇÃO

Evidências recentes têm demonstrado a especificidade mecânica e fisiológica das ações musculares excêntricas em relação às isométricas e concêntricas (Herzog et al., 2015). Embora os mecanismos ainda não estejam completamente elucidados, as contrações excêntricas se caracterizam por serem as ações musculares de maior capacidade de produção de força (Herzog, 2014). Quando utilizados de forma sistemática (i.e., treinamento), os exercícios excêntricos (ou com ênfase na fase excêntrica) têm mostrado ganhos de força mais proeminentes em comparação aos exercícios resistidos convencionais (Walker et al., 2016) e aos exercícios concêntricos (Roig et al., 2009). Ainda, os exercícios excêntricos além de promover o aumento da massa muscular de forma mais rápida (Norrbrand et al., 2008) parecem gerar adaptações específicas na arquitetura muscular (Reeves et al., 2009). Essas vantagens, dentre outras [e.g, menor gasto metabólico (Peñailillo et al., 2013)] dão suporte ao uso do exercício excêntrico em programas de treinamento voltados ao condicionamento físico, prevenção e reabilitação de lesões musculoesqueléticas.

A literatura científica apresenta um acervo considerável de estudos acerca das adaptações promovidas pelo treinamento excêntrico nos músculos extensores de joelho (para revisão, ver Baroni et al., 2015). O entendimento sobre o tipo, a magnitude e a cronologia das respostas desse grupo muscular a diferentes intervenções com sobrecarga excêntrica permite que os profissionais de saúde desenvolvam programas de treinamento mais eficientes e seguros. Por essa razão, o nosso grupo de pesquisa desenvolveu estudos afim de elucidar as adaptações neuromecânicas e morfológicas dos músculos extensores do joelho ao treinamento excêntrico (Baroni et al., 2013a; Baroni et al., 2013b). No entanto, o treinamento pode gerar adaptações distintas na produção de força e na massa muscular de diferentes músculos (Mulder et al., 2009), de modo que os resultados encontrados para os extensores de joelho não podem ser simplesmente extrapolados para os demais grupos musculares.

O tríceps sural é um grupo muscular largamente exposto ao exercício excêntrico em programas de reabilitação de lesões do tendão de Aquiles (para revisão, ver Kingma et al., 2007). No entanto, não há consenso na literatura acerca do efeito do treinamento excêntrico sobre as propriedades neuromecânicas e morfológicas dos flexores plantares. Resultados conflitantes são encontrados em relação às adaptações promovidas sobre a ativação neural nos três tipos de contração muscular (Pensini et al., 2002; Fouré et al., 2013). Além disso, estudos têm evidenciado aumento (Duclay, et al. 2009) ou manutenção (Mouraux, et al. 2000; Raj, et al. 2012; Fouré, et al. 2013) da massa muscular após programas de treinamento excêntrico. Essas inconsistências dificultam a compreensão dos mecanismos responsáveis pelos ganhos

de força reportados em contrações excêntricas (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002), isométricas (Pensini et al., 2002; Duclay et al., 2009; Raj et al., 2012) e concêntricas (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2000). Além disso, embora já existam evidências acerca da cronologia das adaptações ao treinamento isométrico de flexores plantares (Kubo et al., 2010; Kubo et al., 2012), não foram encontrados estudos que avaliassem a temporalidade de adaptação desse grupo muscular ao treinamento excêntrico. Esta informação é de extrema relevância pois, além do entendimento das adaptações causadas pelo treinamento excêntrico, se faz necessário compreender em que momento tais adaptações ocorrem.

Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico isocinético sobre as propriedades neuromecânicas e morfológicas dos músculos flexores plantares de indivíduos saudáveis. Especificamente, nos propusemos a responder as seguintes perguntas: (1) Quais adaptações são causadas pelo treinamento excêntrico na ativação neural, morfologia e na produção de força dos músculos flexores plantares? (2) Quantas semanas de treinamento são necessárias para que estas adaptações ocorram?

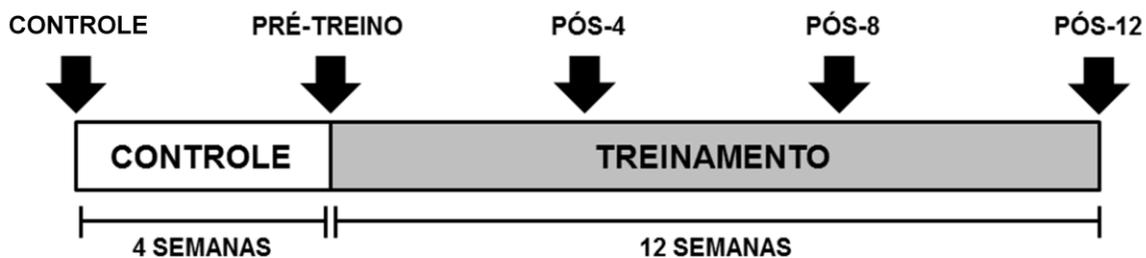
## **MÉTODOS**

### **Participantes**

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (nr. 787.347). O software G\*Power (*Kiel University, Germany*) calculou um número mínimo de 15 indivíduos (*effect size* = 0.30; nível de significância = 0.05; poder = 0.80) (Rhea et al., 2004; Faul et al., 2007; Baroni et al., 2013a). Indivíduos saudáveis e fisicamente ativos do sexo masculino (18-35 anos) foram convidados a participar do estudo. Foram excluídos do estudo: (1) indivíduos que realizaram treinamento de membros inferiores até seis meses antes da coleta de dados; (2) indivíduos com a presença de lesões musculoesqueléticas em membros inferiores e/ou superiores; (3) indivíduos com qualquer contra-indicação à realização de exercícios máximos (doenças cardiovasculares, musculoesqueléticas, respiratórias ou neurológicas); (4) indivíduos que apresentassem dificuldade de entendimento e/ou execução dos protocolos de testes e treinamento no dinamômetro isocinético; (5) indivíduos que não compareceram a duas sessões de treinamento (ou seja, cada indivíduo teve direito a faltar uma única sessão durante o período de treinamento). Todos os indivíduos incluídos no estudo assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido previamente aprovado pelo CEP da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## Desenho Experimental

As propriedades neuromecânicas e morfológicas do tríceps sural foram avaliadas em cinco momentos: no início do estudo (Controle); após quatro semanas de período controle (Pré) no qual os participantes foram instruídos a não alterar sua rotina de atividades físicas; após quatro (Pós-4), oito (Pós-8) e doze (Pós-12) semanas de treinamento excêntrico (Tabela 4). O desenho experimental adotado pelo estudo não necessita de um grupo controle, uma vez que os indivíduos realizaram um período controle de quatro semanas imediatamente antes do início do programa de treinamento excêntrico (Baroni et al., 2013a; Baroni et al., 2013b) (Figura 2). Um intervalo de uma semana foi garantido entre a última sessão treinamento e a sessão de avaliação (Fouré et al., 2013).



**Figura 2.** Desenho experimental do estudo: cinco avaliações neuromusculares dos músculos flexores plantares (indicado pelas setas); um período controle de quatro semanas; e um período de 12 semanas de treinamento excêntrico. Adaptado de Baroni et al. 2013a.

As propriedades neuromecânicas e morfológicas do tríceps sural foram obtidas a partir de medidas realizadas com o indivíduo sentado na cadeira de um dinamômetro isocinético (Biodex System 3 Pro, Biodex Medical Systems, USA) em uma posição de referência, com o joelho totalmente estendido e o quadril flexionado em  $85^\circ$  ( $0^\circ$  = quadril totalmente estendido). O eixo de rotação do tornozelo foi alinhado com o eixo de rotação do dinamômetro e o pé foi fixado no dinamômetro. Faixas de velcro foram utilizadas para fixar o pé, a perna na cadeira do dinamômetro e estabilizar o tronco e o quadril. As imagens de ultrassonografia (US) foram obtidas com o indivíduo em repouso, e a ativação muscular foi avaliada durante contrações voluntárias máximas isométricas e isocinéticas na posição de referência.

Os dados de US foram obtidos por meio de um transdutor linear (60mm; 7.5 MHz) conectado a um sistema de US (SSD 4000, 51 Hz, Aloka Inc., Tokyo, Japan). Inicialmente, com o participante deitando em decúbito dorsal em uma maca, os locais de obtenção das imagens de US e as posições de fixação dos eletrodos de eletromiografia (EMG) foram identificados. Após isso, o participante foi posicionado sentado na cadeira do dinamômetro isocinético e as propriedades morfológicas do tríceps sural foram determinadas. Por fim, os

eletrodos de EMG foram posicionados e contrações voluntárias máximas isométricas, concêntricas e excêntricas (nesta ordem) foram realizadas.

### **Avaliação do torque de flexão plantar**

O torque voluntário máximo isométrico, concêntrico e excêntrico de flexão plantar foi avaliado no dinamômetro isocinético com o participante na posição de referência. Antes da avaliação do torque máximo, os participantes realizaram um aquecimento em cicloergômetro com duração de dez minutos, com potência constante de 100 W (Duclay et al., 2009). Após, os indivíduos foram posicionados no dinamômetro isocinético e realizaram um aquecimento específico (contrações concêntricas submáximas de flexão plantar e dorsal; 1 série x 10 repetições a 120°/s).

A avaliação do torque isométrico compreendeu três contrações voluntárias máximas de flexão plantar na posição articular de 0° (superfície do pé perpendicular à perna). Cada contração isométrica teve duração de cinco segundos e um período de repouso de dois minutos foi respeitado entre as contrações. O valor do pico de torque de cada contração foi verificado 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 que 10%.

A avaliação do torque concêntrico compreendeu três contrações concêntricas máximas de flexão plantar, realizadas de forma consecutiva com uma velocidade angular de 30°/s e amplitude de movimento de 50°, iniciada a partir de 80% da flexão dorsal máxima (FDmáx) de cada participante. O modo concêntrico/concêntrico do dinamômetro isocinético foi utilizado, sendo o movimento de flexão dorsal realizado de forma passiva. Os participantes iniciavam a contração concêntrica de flexores plantares quando o tornozelo atingia a posição inicial (80% da FDmáx). O teste foi repetido duas vezes com um intervalo de dois minutos de repouso entre os testes.

O torque excêntrico foi avaliado por meio de três contrações excêntricas máximas, realizadas de forma consecutiva com velocidade angular de 30°/s com a mesma amplitude de movimento realizada nos testes concêntricos. Para a realização do teste foi utilizado o modo concêntrico/excêntrico do dinamômetro isocinético. A fase concêntrica do movimento foi executada de forma passiva e os participantes iniciavam a contração excêntrica ativa de flexores plantares quando o tornozelo atingia a posição inicial (iniciada a partir 80% da FDmáx). O teste foi repetido duas vezes com um intervalo de dois minutos de repouso entre os testes.

Durante todos testes de força um estímulo verbal padronizado foi realizado como forma de motivar os participantes a atingirem sua força máxima. Os mais altos valores de pico de torque obtidos durante os testes isométricos ( $PT_{iso}$ ), concêntricos ( $PT_{con}$ ) e excêntricos ( $PT_{exc}$ ) foram utilizados para a análise estatística. O ângulo do pico de torque também foi obtido nas condições concêntrica ( $APT_{con}$ ) e excêntrica ( $APT_{exc}$ ). O sincronismo entre os dados de torque e a posição articular durante as contrações foi realizado pelo sistema de aquisição de dados (*Windaq, Dataq Instruments Inc., USA*). Além disso, considerando que o pico de torque dos flexores plantares ocorre em maiores graus de flexão dorsal (Gravel et al., 1990), e que o treinamento excêntrico pode aumentar flexão dorsal máxima (Mahieu et al., 2008), o aumento do pico do torque isocinético causado pelo treinamento excêntrico poderia ocorrer por causa das alterações na flexão dorsal máxima. Dessa forma, o torque máximo isocinético também foi avaliado no ângulo específico de  $0^\circ$  nas contrações concêntricas ( $T_{con_0^\circ}$ ) e excêntricas ( $T_{exc_0^\circ}$ ) e no ângulo de pico de torque no momento pré de cada indivíduo [concêntrico ( $T_{con\_APT}$ ); excêntrico ( $T_{exc\_APT}$ )].

#### **Avaliação da ativação elétrica muscular**

A atividade elétrica dos músculos gastrocnêmio medial (GM), gastrocnêmio lateral (GL) e sóleo (SO) foi avaliada por meio de EMG (*AMT-8, Bortec Biomedical Ltd., Canada*). O sistema de EMG foi conectado ao sistema de aquisição de dados (*Windaq, Dataq Instruments Inc., USA*) e sincronizado com o dinamômetro isocinético, o que permitiu a avaliação da atividade elétrica durante os testes máximos isométricos, concêntricos e excêntricos.

A preparação da pele e o posicionamento dos eletrodos seguiram as recomendações da *Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles* (SENIAM). Eletrodos passivos (*Meditrace 100, Kendall, USA*) foram posicionados em configuração bipolar (20mm de distância inter-eletrodos) no GM (na porção mais proeminente do ventre muscular), no GL (1/3 da linha entre a cabeça da fíbula e o calcanhar) e no SO (2/3 da linha entre o côndilo medial do fêmur e o maléolo medial). Um eletrodo de referência foi fixado na superfície medial da tíbia. Pontos de referência anatômicos (e.g. maléolos), marcas na pele (cicatrizes e sardas) e os eletrodos de EMG foram mapeados em folhas de acetato, as quais foram utilizadas durante os diferentes dias de coleta de dados, como forma de garantir que todas as medidas foram obtidas no mesmo local (Narici et al., 1989; Baroni et al., 2013a).

Uma placa analógico-digital DI-720 de 16 bits de resolução (*Dataq Instruments Inc., USA*) foi utilizada para digitalizar os sinais de EMG com uma frequência de amostragem de

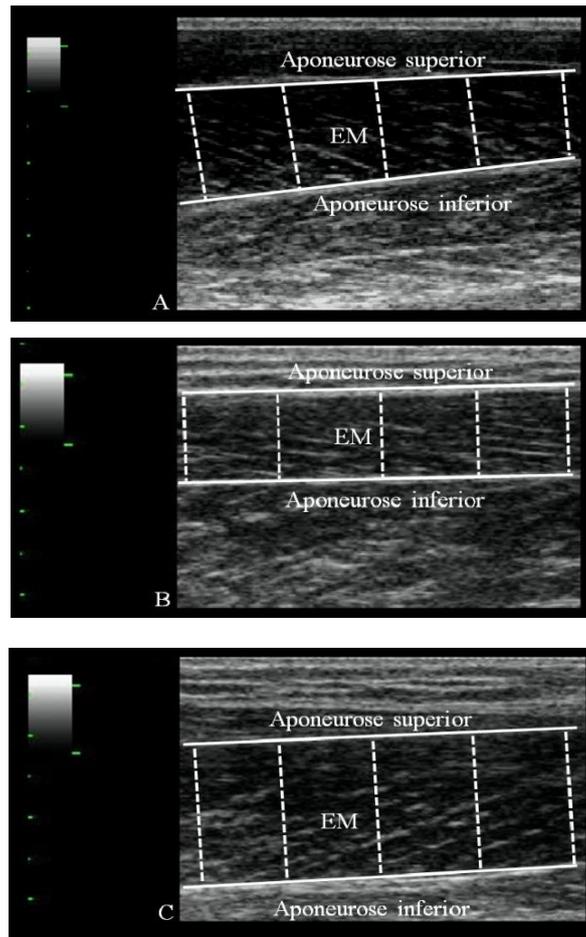
2000Hz. Os sinais de EMG foram filtrados (*Butterworth*, 20-500Hz), e os valores *Root Mean Square* (RMS) foram calculados em um segmento com um segundo de duração (obtido a partir de 0,5 segundo antes do pico do torque) por meio do *software* Matlab (*The MathWorks, Natick, MA, USA*). A soma dos valores RMS dos músculos GM, GL e SO em cada teste [ $PT_{iso}$  ( $\Sigma EMG_{iso}$ );  $PT_{con}$  ( $\Sigma EMG_{con}$ );  $PT_{exc}$  ( $\Sigma EMG_{exc}$ );  $T_{con_{0^\circ}}$  ( $\Sigma EMG_{con_{0^\circ}}$ );  $T_{exc_{0^\circ}}$  ( $\Sigma EMG_{exc_{0^\circ}}$ );  $T_{con_{APT}}$  ( $\Sigma EMG_{con_{APT}}$ ) e  $T_{exc_{APT}}$  ( $\Sigma EMG_{exc_{APT}}$ )] foi utilizada para a análise estatística com o objetivo de representar a ativação do tríceps sural para cada um dos testes (Simoneau et al., 2005).

### **Avaliação da massa muscular**

A espessura dos músculos GM, GL e SO foi avaliada por meio de US. A soma das espessuras dos três músculos ( $\Sigma EM$ ) foi considerada como representativa da massa muscular do tríceps sural.

Três imagens de US de cada músculo foram obtidas com o participante sentado na cadeira do dinamômetro, na posição de referência, com o tornozelo em  $0^\circ$ . O transdutor de US foi posicionado longitudinalmente às fibras musculares em 30% proximal (GM e GL) e 50% (SO) da distância entre a prega poplíteia e o centro do maléolo lateral (Kawakami et al., 1998; Fouré et al., 2011). Mapas de acetato foram utilizados como forma de garantir que todas as medidas foram obtidas no mesmo local do músculo (Baroni et al., 2013a). Em todos os locais de avaliação, a superfície do transdutor de US foi coberta com gel transmissor solúvel em água.

A distância entre as aponeuroses superficial e profunda foi mensurada em cinco locais diferentes ao longo de cada imagem de US (Figura 3), 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 de US de cada músculo foi considerado a espessura muscular final do GM, GL e SO. Todas as imagens de US foram analisadas por um mesmo investigador por meio do *software* ImageJ (*National Institute of Health, USA*).



**Figura 3.** Medida da espessura muscular (EM). As linhas contínuas indicam as aponeuroses superior e inferior, enquanto as linhas tracejadas indicam os locais de obtenção de cada uma das cinco medidas nos músculos gastrocnêmio medial (A), gastrocnêmio lateral (B) e sóleo (C).

### **Programa de treinamento excêntrico**

O programa de treinamento de 12 semanas foi constituído de três mesociclos de quatro semanas. O primeiro mesociclo teve sete sessões de treinamento, enquanto que o segundo e terceiro mesociclos tiveram oito sessões de treinamento cada. O menor número de sessões de treinamento no primeiro mesociclo foi utilizado com o objetivo de evitar o dano muscular excessivo na primeira semana de treinamento (Baroni et al., 2013a). Assim, o programa totalizou 23 sessões de treinamento (Tabela 4). Dessa forma, com exceção da primeira semana, as sessões de treinamento foram realizadas duas vezes por semana, respeitando um intervalo mínimo de 72 horas entre as sessões (segundas e quintas-feiras). O volume de treinamento foi aumentado de forma gradual por meio do aumento do número de séries em cada um dos mesociclos (Tabela 4).

**Tabela 4.** Periodização do programa de treinamento excêntrico isocinético.

Avaliação	Semana	Frequência	Intensidade	Séries	Repetições	Volume	Velocidade
Controle	-5	-	-	-	-	-	-
	-4	-	-	-	-	-	-
	-3	-	-	-	-	-	-
	-2	-	-	-	-	-	-
	-1	-	-	-	-	-	-
Pré	0	-	-	-	-	-	-
	1	1	Máxima	3	10	30	30°/s
	2	2	Máxima	3	10	60	30°/s
	3	2	Máxima	3	10	60	30°/s
	4	2	Máxima	3	10	60	30°/s
Pós-4	5	-	-	-	-	-	-
	6	2	Máxima	4	10	80	30°/s
	7	2	Máxima	4	10	80	30°/s
	8	2	Máxima	4	10	80	30°/s
	9	2	Máxima	4	10	80	30°/s
Pós-8	10	-	-	-	-	-	-
	11	2	Máxima	5	10	100	30°/s
	12	2	Máxima	5	10	100	30°/s
	13	2	Máxima	5	10	100	30°/s
	14	2	Máxima	5	10	100	30°/s
Pós-12	15	-	-	-	-	-	-

Controle: avaliação antes do período controle; Pré: Avaliação após o período controle e antes do treinamento; Pós-4: avaliação após quatro semanas de treinamento; Pós-8: avaliação após oito semanas de treinamento; Pós-12: avaliação após 12 semanas de treinamento.

Antes de cada sessão de treinamento, os indivíduos realizaram um aquecimento de 10 minutos em um cicloergômetro com potência constante de 100 W (Duclay et al., 2009). Após, um aquecimento específico (contrações concêntricas submáximas de flexão plantar e dorsal; 1 série x 10 repetições a 120°/s) foi realizado no dinamômetro isocinético (*Biodex System 3 Pro, Biodex Medical Systems, USA*). Após o aquecimento, o treinamento excêntrico dos músculos flexores plantares foi realizado. Uma amplitude de movimento de 50°, iniciada em 80% da  $FD_{máx}$ , foi utilizada para garantir que todos indivíduos realizassem o treinamento no mesmo comprimento muscular relativo. Este procedimento também foi utilizado como uma medida de segurança, com o objetivo evitar possíveis lesões musculares e/ou tendíneas na flexão dorsal máxima, posição na qual o torque máximo de flexão plantar é produzido. A  $FD_{máx}$  foi reavaliada passivamente, no dinamômetro isocinético, a cada quatro semanas para ajustar a amplitude de movimento.

Durante o treinamento, os indivíduos foram instruídos a resistir de forma máxima contra o movimento de flexão dorsal imposto pelo dinamômetro. Os indivíduos realizaram apenas contrações excêntricas durante o programa de treinamento. Ao final de cada contração excêntrica o pé era movimentado passivamente até a posição inicial da contração excêntrica seguinte. Os participantes foram encorajados a promover a contração máxima dos flexores plantares assim que o braço do dinamômetro atingisse a posição inicial. As repetições foram realizadas de forma contínua, sendo garantido um minuto de intervalo entre as séries. Os membros dominante e não-dominante foram treinados para evitar possíveis desequilíbrios musculares entre si. No entanto, apenas os membros dominantes (Elias et al., 1998) foram utilizados na análise dos dados.

### **Análise estatística**

Um coeficiente de correlação intraclassa (ICC) foi utilizado para verificar a reprodutibilidade teste-reteste entre os valores obtidos nas avaliações Controle e Pré-treino.

O  $\Sigma$ EM de seis indivíduos foi utilizado para determinar a confiabilidade das medidas. Os dados foram obtidos em dois dias diferentes com um intervalo de uma semana. A confiabilidade das medidas também foi obtida por meio do ICC.

Uma ANOVA para medidas repetidas foi utilizada para verificar os efeitos do treinamento ao longo do tempo. Um *post-hoc* de Bonferroni foi utilizado para identificar as diferenças entre as avaliações (Controle, Pré, Pós-4, Pós-8 e Pós-12) para cada variável. A análise estatística foi realizada por meio do *software* SPSS 17.0, e adotado um nível de significância de 5% ( $\alpha < 0,05$ ).

## **RESULTADOS**

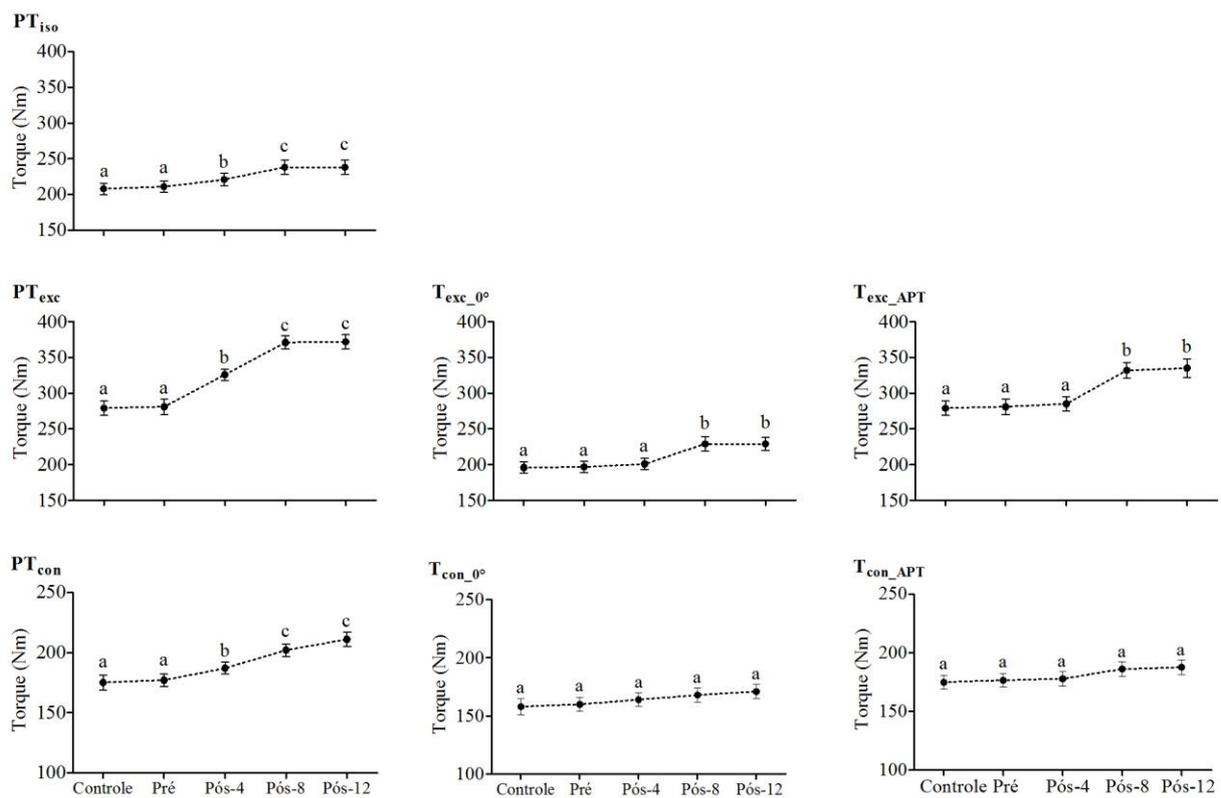
Vinte e quatro participantes iniciaram o programa de treinamento. Um indivíduo abandonou a intervenção por motivos pessoais, e três participantes foram excluídos devido à dores na articulação do tornozelo durante a intervenção. Assim, 20 participantes (idade:  $26 \pm 4$  anos; estatura:  $1.75 \pm 0.08$  m; massa corporal:  $75 \pm 9$  kg; membro direito:  $n=18$ ; membro esquerdo:  $n= 2$ ) completaram o programa de treinamento. Quatorze participantes completaram as 23 sessões de treinamento e seis participantes não compareceram em uma sessão por motivos pessoais (aderência: 99%).

Resultados quase perfeitos (Landis e Koch, 1977) de reprodutibilidade entre as avaliações Controle e Pré-treino foram observados em quase todos os testes:  $PT_{iso}$  ( $r=0.98$ );  $PT_{con}$  ( $r=0.99$ );  $PT_{exc}$  ( $r=0.92$ );  $\Sigma EMG_{iso}$  ( $r=0.87$ );  $\Sigma EMG_{con}$  ( $r=0.98$ );  $\Sigma EMG_{exc}$  ( $r=0.92$ );

$\Sigma\text{EMG}_{\text{con}_0^\circ}$  ( $r=0.89$ );  $\Sigma\text{EMG}_{\text{exc}_0^\circ}$  ( $r=0.91$ );  $\Sigma\text{EMG}_{\text{con\_APT}}$  ( $r=0.98$ );  $\Sigma\text{EMG}_{\text{exc\_APT}}$  ( $r=0.92$ );  $\text{APT}_{\text{exc}}$  ( $r=0.81$ );  $T_{\text{con}_0^\circ}$  ( $r=0.99$ );  $T_{\text{exc}_0^\circ}$  ( $r=0.84$ );  $T_{\text{con\_APT}}$  ( $r=0.99$ );  $T_{\text{exc\_APT}}$  ( $r=0.92$ );  $\Sigma\text{EM}$  ( $r=0.96$ ). Apenas o  $\text{APT}_{\text{con}}$  apresentou resultado substancial ( $r=0.75$ ) no teste de reprodutibilidade (Landis e Koch, 1977). As medidas de  $\Sigma\text{EM}$  ( $0.82$ ;  $p=0.040$ ) apresentaram alta confiabilidade (Landis e Koch, 1977).

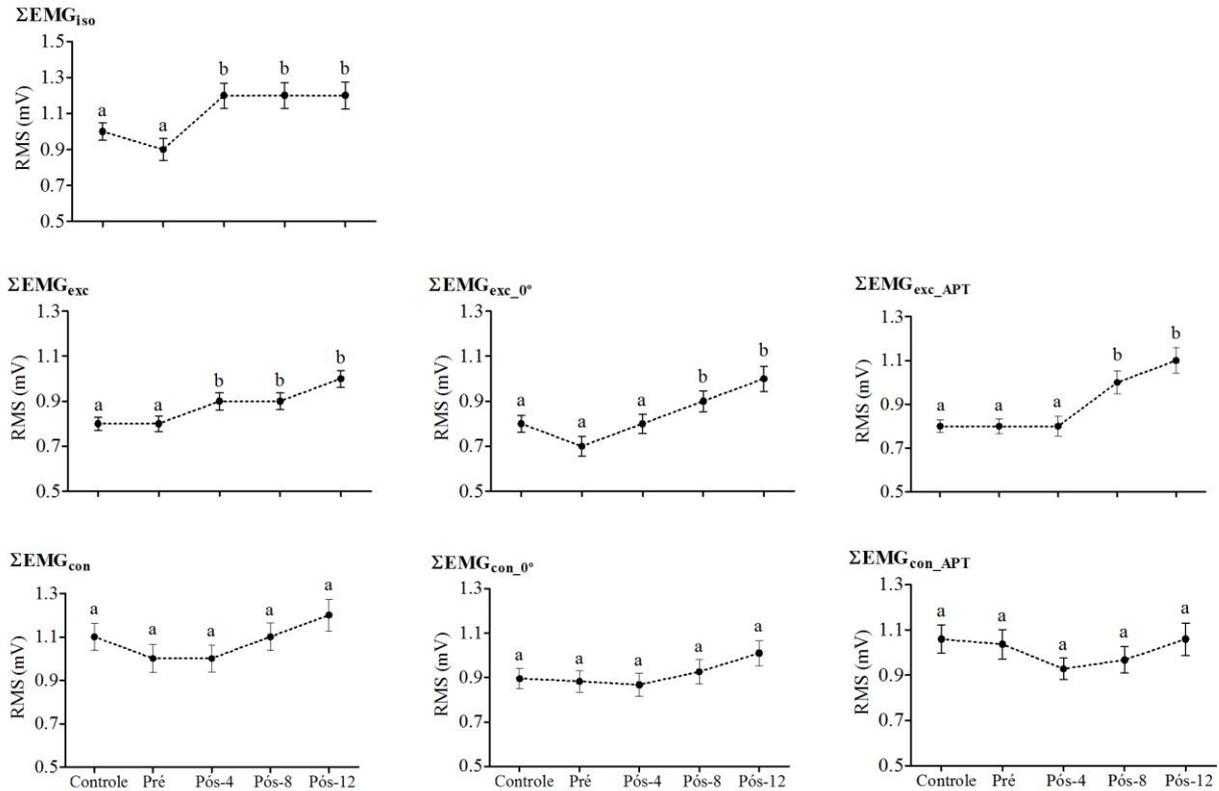
Não foram encontradas mudanças significativas no torque, EMG e espessura muscular durante o período controle (Controle vs. Pré) e entre os momentos Pós-8 e Pós-12.

As figuras 4-6 ilustram as alterações observadas ao longo do período de treinamento na força muscular (torque), na ativação elétrica (EMG) e massa muscular (espessura muscular) dos flexores plantares, respectivamente. Os  $\text{PT}_{\text{iso}}$ ,  $\text{PT}_{\text{con}}$  e o  $\text{PT}_{\text{exc}}$  aumentaram após quatro semanas de treinamento (5%, 6% e 16%, respectivamente), e entre Pós-4 e Pós-8 (7%, 8% e 14%, respectivamente). O aumento do  $T_{\text{exc}_0^\circ}$  (16%) e do  $T_{\text{exc\_APT}}$  (18%) ocorreram apenas após oito semanas de treinamento, enquanto que o  $T_{\text{con}_0^\circ}$  e o  $T_{\text{con\_APT}}$  permaneceram inalterados durante todo o período de treinamento (Figura 4).



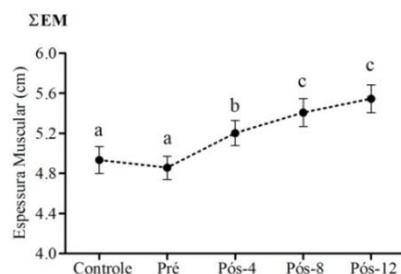
**Figura 4.** Torque de flexão plantar nos testes isométrico e isocinéticos.  $\text{PT}_{\text{iso}}$ : pico de torque isométrico;  $\text{PT}_{\text{exc}}$ : pico de torque excêntrico;  $\text{PT}_{\text{con}}$ : pico de torque concêntrico;  $T_{\text{exc}_0^\circ}$ : pico de torque excêntrico avaliado no ângulo de  $0^\circ$  do tornozelo;  $T_{\text{exc\_APT}}$ : pico de torque excêntrico avaliado no ângulo de pico de torque excêntrico do momento pré-treino;  $T_{\text{con}_0^\circ}$ : pico de torque concêntrico avaliado no ângulo de  $0^\circ$  do tornozelo;  $T_{\text{con\_APT}}$ : pico de torque concêntrico avaliado no ângulo de pico de torque concêntrico do momento pré-treino. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as avaliações ( $p \leq 0.05$ ).

O  $\Sigma EMG_{iso}$  e o  $\Sigma EMG_{exc}$  aumentaram significativamente em Pós-4 (23% e 21%, respectivamente), e não apresentaram diferenças significativas entre Pós-4 e Pós-8 (Figura 5). O  $\Sigma EMG_{exc_{0^\circ}}$  e o  $\Sigma EMG_{exc_{APT}}$  apresentaram um incremento significativo entre os períodos Pré e Pós-8 (27% e 30%). Não foram observadas diferenças significativas para os  $\Sigma EMG_{con}$ ,  $\Sigma EMG_{con_{0^\circ}}$ , e  $\Sigma EMG_{con_{APT}}$  durante o treinamento (Figura 5).



**Figura 5.** Ativação elétrica dos flexores plantares nos testes isométrico e isocinéticos.  $\Sigma EMG_{iso}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares durante testes isométricos;  $\Sigma EMG_{exc}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares durante testes excêntricos;  $\Sigma EMG_{con}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares durante testes concêntricos;  $\Sigma EMG_{exc_{0^\circ}}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de  $0^\circ$  do tornozelo durante testes excêntricos;  $\Sigma EMG_{exc_{APT}}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de pico de torque excêntrico do momento pré-treino durante testes excêntricos;  $\Sigma EMG_{con_{0^\circ}}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de  $0^\circ$  do tornozelo durante testes concêntricos;  $\Sigma EMG_{con_{APT}}$ : somatório da ativação elétrica dos flexores plantares no ângulo de pico de torque concêntrico do momento pré-treino. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as avaliações ( $p \leq 0.05$ ).

Aumentos significativos no  $\Sigma EM$  foram encontrados em Pós-4 (7%) e Pós-8 (11%) (Figura 6). A  $FD_{máx}$  e o  $APT_{exc}$  aumentaram progressivamente até o período Pós-8, e permaneceram inalterados em Pós-12 (Tabela 5). Aumentos significativos também ocorreram no  $APT_{con}$  nos períodos Pós-4 e Pós-12 (Tabela 5).



**Figura 6.** Espessura muscular dos flexores plantares ( $\Sigma$ EM). Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as avaliações ( $p \leq 0.05$ ).

**Tabela 5.** Média ( $\pm dp$ ) da flexão dorsal máxima (FD<sub>máx</sub>) e ângulo do pico do torque durante testes máximos excêntricos (APT<sub>exc</sub>) e concêntricos (APT<sub>con</sub>).

Variável	Controle	Pré	Pós-4	Pós -8	Pós -12
<b>FD<sub>máx</sub></b> (°)	-24.6 $\pm$ 5.3 <sup>a</sup>	-25.4 $\pm$ 5.9 <sup>a</sup>	-30.9 $\pm$ 4.6 <sup>b</sup>	-34.6 $\pm$ 4.6 <sup>c</sup>	-35.9 $\pm$ 3.7 <sup>c</sup>
<b>APT<sub>exc</sub></b> (°)	-17.3 $\pm$ 4.1 <sup>a</sup>	-17.4 $\pm$ 4.8 <sup>a</sup>	-22.0 $\pm$ 3.5 <sup>b</sup>	-24.7 $\pm$ 2.3 <sup>c</sup>	-26.4 $\pm$ 3.6 <sup>c</sup>
<b>APT<sub>con</sub></b> (°)	-6.1 $\pm$ 2.9 <sup>a</sup>	-6.8 $\pm$ 3.0 <sup>a</sup>	-10.4 $\pm$ 3.4 <sup>b</sup>	-11.9 $\pm$ 2.9 <sup>b</sup>	-15.2 $\pm$ 2.0 <sup>c</sup>

Controle: avaliação antes do período controle; Pré: Avaliação após o período controle e antes do treinamento; Pós-4: avaliação após quatro semanas de treinamento; Pós-8: avaliação após oito semanas de treinamento; Pós-12: avaliação após 12 semanas de treinamento. Os valores negativos indicam os ângulos de flexão dorsal. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as avaliações ( $p \leq 0.05$ ).

## DISCUSSÃO

O objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico sobre as propriedades neuromecânicas e morfológicas dos músculos flexores plantares de indivíduos saudáveis. Nossos principais achados foram que o treinamento excêntrico gerou: 1) aumento dos torques máximos isométricos, concêntricos e excêntricos (com diferentes magnitudes), mas não nos torques concêntricos avaliados em ângulos específicos; 2) aumento da ativação elétrica muscular durante os testes isométricos e excêntricos; 3) aumento da espessura muscular do tríceps sural; e 4) aumentos significativos na força, ativação e massa muscular foram observados em um curto período de treinamento (quatro semanas).

Os achados do presente estudo corroboram com evidências prévias de que o treinamento excêntrico é capaz de promover significativos aumentos do pico de torque isométrico (Blazevich et al., 2008; Duclay et al., 2009; Rocha et al., 2011; Baroni et al., 2013a) e concêntrico (Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002; Symons et al., 2005), além do esperado ganho no torque excêntrico (Tomberlin et al., 1991; Hortobágyi et al., 1996a; Mouraux et al., 2000; Pensini et al., 2002; Baroni et al., 2013a). O maior percentual de

aumento de torque excêntrico em comparação com o torque isométrico e concêntrico já era esperado em função de especificidade do treinamento excêntrico (Mouraux et al., 2000; Blazevich et al., 2007; Rocha et al., 2011; Baroni et al., 2013a). Além disso, tal qual observado em nosso estudo prévio envolvendo treinamento excêntrico dos extensores de joelho (Baroni et al., 2013a), aumentos de força nos três tipos de ação muscular já foram observadas nas primeiras semanas de intervenção. Porém, diferente do que foi verificado para os extensores de joelho (Baroni et al., 2013a), os picos de torque de flexores plantares não apresentaram alteração entre a oitava e a 12<sup>a</sup> semana de treinamento, o que talvez possa ser atribuído a ausência de adaptações neurais e morfológicas neste período.

O aumento da força nas primeiras semanas de programas de treinamento de força convencionais costuma ser mais associado a fatores neurais do que hipertróficos (Folland e Williams, 2007). Nossos achados sugerem que o aumento da capacidade de ativação muscular já nas primeiras semanas de treinamento contribuiu para os ganhos de força máxima em testes isométricos e excêntricos nesse período. Aparentemente, indivíduos destreinados possuem ativação muscular incompleta durante contrações excêntricas (Hortobágyi et al., 1996a). Isso pode contribuir para uma maior capacidade de adaptação neural nos estágios iniciais do treinamento (Hortobágyi et al., 1996a), ao passo que os ganhos neurais parecem se estabilizar após a aprendizagem motora do exercício excêntrico. Por sua vez, as adaptações na capacidade de ativação isométrica podem estar associadas à velocidade baixa de contração utilizada durante o período de treinamento (30°/s) (Pensini et al., 2002), e/ou ao fato de ações isométricas serem necessárias para iniciar cada contração excêntrica no dinamômetro isocinético (Baroni et al., 2013a), sendo, portanto utilizadas durante o programa de treinamento excêntrico.

De forma distinta ao que geralmente vem sendo reportado por estudos envolvendo o treinamento de força isoinercial (concêntrico-excêntrico) (Gabriel et al., 2006; Folland e Williams, 2007; Wernbom et al., 2007), os ganhos de força nas primeiras semanas do treinamento excêntrico parecem sofrer considerável influência da resposta hipertrófica muscular (Baroni et al., 2013a). Essa resposta hipertrófica acelerada do treinamento excêntrico em relação ao treinamento de força isoinercial (concêntrico-excêntrico) já foi mostrada por Norrbrand et al. (2008). Dada a relação entre tamanho do músculo e produção de força (Lieber e Fridén, 2000), esse ganho precoce de massa muscular parece se constituir em uma vantagem do treinamento excêntrico. Nesse sentido, nossos achados sugerem um efeito somado do aumento de massa muscular e do aumento de ativação em testes isométricos e excêntricos para explicar os ganhos de pico de torque nesses tipos de contração com apenas

quatro semanas de treinamento. Por outro lado, os ganhos de pico de torque concêntrico encontrados nesse período podem ser atribuídos apenas ao aumento da massa muscular dos flexores plantares, uma vez que não foi observada qualquer alteração da capacidade de ativação concêntrica desses músculos ao longo do estudo. O aumento da produção de força isométrica e dinâmica acarreta em importantes implicações funcionais. Os músculos flexores plantares são importantes para o equilíbrio corporal e em grande parte das atividades de vida diária (Jan et al., 2005). Além disso, possuem papel importante durante a marcha (Jan et al., 2005; Neptune e Sasaki, 2005), e seu enfraquecimento pode ser um importante limitador da velocidade deste gesto (Nadeau et al., 1999; Neptune e Sasaki, 2005). Estudos clínicos têm encontrado aumento da velocidade da marcha após o fortalecimento dos músculos flexores plantares (Engsberg et al., 2006; Jung et al., 2013). Além disso, déficits na produção de força excêntrica dos músculos flexores plantares estão associados com maiores níveis de instabilidade articular (Fox et al., 2008) e podem predispor a lesões tendíneas (Alfredson et al., 1998). Dessa forma, o aumento da produção de força dos músculos flexores plantares pode implicar em ganhos funcionais importantes relacionados com as atividades de vida diária e minimizar o risco de possíveis lesões.

A semelhança no comportamento entre os valores de pico de torque ( $PT_{iso}$ ,  $PT_{con}$  e  $PT_{ecc}$ ) e de massa muscular ( $\Sigma EM$ ) reforçam a ideia de que a resposta hipertrófica teve participação destacada nos incrementos de força. O aumento da espessura muscular tem sido mostrado em programas de treinamento excêntrico em extensores de joelho (Blazevich et al., 2007; Duclay et al., 2009; Reeves et al., 2009; Raj et al., 2012; Baroni et al., 2013a; Baroni et al., 2013b), mas não em flexores de joelho (Timmins et al., 2016), destacando a individualidade de respostas entre os músculos. Para os músculos flexores plantares, tanto o aumento (Duclay et al., 2009) quanto a manutenção (Raj et al., 2012) da espessura muscular já haviam sido reportados após períodos de treinamento excêntrico utilizando cargas correspondentes a 120% e 100% de 1-RM, respectivamente. Esses achados prévios dão subsídios à premissa de que a intensidade do exercício seja um fator preponderante na resposta hipertrófica (Fry, 2004), o que é reforçado pelos resultados obtidos no nosso estudo com um programa de treinamento excêntrico de intensidade máxima em condições isocinéticas.

A resposta hipertrófica da musculatura é atribuída à adição de sarcômeros em paralelo e/ou de sarcômeros em série na fibra muscular (Schoenfeld, 2010). O aumento do número de sarcômeros em paralelo causa aumento do ângulo de penação das fibras musculares (Kawakami et al., 1993; Blazevich et al., 2007), enquanto o aumento do número de

sarcômeros em série leva ao aumento do comprimento das fibras musculares (Lieber e Fridén, 2000; Blazevich e Sharp, 2005). De acordo com evidências prévias em músculos extensores de joelho (Blazevich et al., 2007; Reeves et al., 2009; Baroni et al., 2013b), flexores de joelho (Timmins et al., 2016) e flexores plantares (Duclay et al., 2009), o treinamento excêntrico parece causar um maior aumento do comprimento de fascículos do que o treinamento isoínercial (concêntrico-excêntrico) (Reeves et al., 2009).

Se somam a esses achados as evidências provenientes de estudos em modelo animal realizados por Lynn et al. (1998) e Butterfield et al. (2005), demonstrando que o treinamento excêntrico efetivamente aumenta o número de sarcômeros dispostos em série nas fibras musculares. Logo, se torna mais compreensível a alteração do ângulo ótimo de produção de torque na direção dos maiores comprimentos musculares encontrada por nós e por estudos prévios com treinamento excêntrico em humanos (Brughelli et al., 2010; Wellisch et al., 2015). Além disso, o deslocamento do comprimento ótimo de produção de força pode estar relacionado com o aumento da tensão passiva em maiores comprimentos musculares (Brughelli e Cronin, 2007), sobretudo pelo aumento da rigidez dos tendões e da proteína titina (Reeves et al., 2003; Brughelli e Cronin, 2007). Embora os mecanismos ainda não se encontrem completamente elucidados, fatores como o comprimento muscular, a intensidade da contração e o volume de treinamento parecem ser importantes para induzir o deslocamento do comprimento ótimo de produção de força para maiores comprimentos musculares pelo treinamento excêntrico (Brughelli e Cronin, 2007; Brughelli et al., 2010). De acordo com Brughelli e Cronin (2007), os maiores deslocamentos ocorrem quando os exercícios são realizados com alongamento ativo do músculo para grandes comprimentos musculares, durante contrações voluntárias máximas. Os exercícios utilizados no presente estudo se caracterizaram por produzir contrações excêntricas de alta intensidade (contrações voluntárias máximas) em grandes comprimentos musculares, o que justifica as alterações no ângulo do pico de torque. Entre as vantagens desse deslocamento do ângulo de pico de torque em direção aos maiores comprimentos musculares (e do aumento da amplitude total de movimento articular) podemos citar, por exemplo, a menor predisposição às lesões de estiramento muscular (Brockett et al., 2001).

De acordo com o nosso conhecimento, esse é o primeiro estudo a demonstrar o efeito do treinamento excêntrico sobre o fortalecimento dos flexores plantares em ângulos específicos (e.g. o ângulo neutro e o ângulo de pico de torque pré-treinamento). Embora o pico de torque ao longo da amplitude de movimento seja o desfecho mais comumente analisado pelos estudos (Mouraux et al., 2000; Reeves et al., 2009; Baroni et al., 2013a), ele

sofre influência do deslocamento do ângulo ótimo de produção de torque aqui evidenciado. Nesse sentido, nossos achados adicionam à literatura que o treinamento excêntrico de flexores plantares em condições isocinéticas máximas favorece principalmente o ganho de força nos maiores comprimentos musculares. A magnitude de aumento de força no APT pré-treinamento e no ângulo neutro ( $0^{\circ}$ ) é inferior ao ganho percentual de pico de torque nos testes excêntricos, e sequer chega a ser estatisticamente significativa nos testes concêntricos. De um ponto de vista prático, esses resultados sugerem que o programa de treinamento utilizado em nosso estudo se configura em uma excelente alternativa para o incremento de força muscular dinâmica nos grandes comprimentos musculares do tríceps sural, mas não nos ângulos adjacentes à posição neutra do tornozelo.

Em conclusão, o presente estudo apresentou o tipo, a magnitude e a cronologia das adaptações ocorridas nos músculos flexores plantares ao longo de 12 semanas de treinamento excêntrico isocinético. A produção de força aumentou nas primeiras 4 semanas de treinamento devido a adaptações neurais e morfológicas. Após 4 semanas de treinamento, o aumento da força foi atribuído exclusivamente a adaptações morfológicas.

## CAPÍTULO III

### Efeitos do treinamento excêntrico do tríceps sural nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles.

#### RESUMO

O exercício excêntrico é comumente utilizado em programas de treinamento que buscam a prevenção ou recuperação de tendinopatias e rupturas tendíneas. Considerando que um programa de treinamento/reabilitação deve ser efetivo e eficiente, levando à resultados benéficos em curtos períodos de tempo, é importante saber quando ocorrem mudanças nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais tendíneas durante o treinamento. O objetivo do presente estudo foi avaliar a magnitude e a cronologia das adaptações ocorridas nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles durante um programa de 12 semanas de treinamento excêntrico isocinético (duas vezes por semana, 3-5 séries de 10 repetições máximas). Ultrassonografia foi utilizada para determinar a área de secção transversa (AST) e comprimento em repouso do tendão de Aquiles, bem como a deformação tendínea ocorrida durante contrações isométricas máximas de flexão plantar. As relações força-deformação e *stress-strain* do tendão de Aquiles foram determinadas antes (Pré) e após 4 (Pós-4), 8 (Pós-8) e 12 (Pós-12) semanas de treinamento. Não foram encontradas diferenças significativas no comprimento, na deformação máxima e *strain* máximo durante o programa de treinamento. Ao final do programa de treinamento, houve aumento significativo da produção de força isométrica máxima (49%), da AST (17%), da rigidez (82%) e do módulo de Young (86%). Diferenças significativas foram detectadas em Pós-4 na rigidez (aumento de 51%) e no módulo de Young (aumento de 87%), e em Pós-8 na AST (aumento de 15%). Houve alteração das propriedades materiais do tendão de Aquiles após 4 semanas de treinamento, uma vez que ocorreram alterações na rigidez e módulo de Young sem que ocorressem mudanças na AST. A hipertrofia tendínea foi observada após 8 semanas de treinamento, e também contribuiu para o aumento da rigidez do tendão de Aquiles. Dessa forma, as adaptações na rigidez tendínea parecem estar mais associadas às alterações nas propriedades do tecido.

**Palavras-chaves:** rigidez tendínea, área de secção transversa tendínea, ultrassonografia, treinamento de força.

## INTRODUÇÃO

O tendão de Aquiles é um dos tendões que mais sofre lesões no corpo humano (Wren et al., 2001). As tendinopatias (tendinites/tendinoses) são comuns em atletas de vários níveis competitivos (Couppé et al., 2015), e a ruptura total do tendão de Aquiles ocorre geralmente em indivíduos fisicamente ativos (Lantto et al., 2015). Um programa de treinamento/reabilitação deve ser efetivo e eficiente (i.e. os resultados benéficos devem ser atingidos em um curto intervalo de tempo), e o tempo de adaptação tendínea permite identificar quando ocorrem mudanças nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais tendíneas durante o treinamento.

O exercício excêntrico tem sido utilizado na prevenção de lesões musculoesqueléticas (Goode et al., 2015), em programas de reabilitação (Alfredson et al., 1998) e durante programas de treinamento de força para melhorar o condicionamento físico de indivíduos saudáveis (Baroni et al., 2015). Estudos tem mostrado que pode ocorrer aumento (Duclay et al., 2009), manutenção (Mahieu et al., 2008) ou redução (Morrissey et al., 2011) da rigidez tendínea durante programas de treinamento excêntrico. A heterogeneidade dos treinamentos quanto à sua duração, frequência semanal, volume (séries x repetições) e intensidade (sobrecarga), pode causar diferentes estímulos mecânicos no tendão, o que explicaria estes resultados conflitantes.

As alterações nas propriedades mecânicas tendíneas parecem estar relacionadas com a intensidade do exercício (Bohm et al., 2015), uma vez que a rigidez tendínea aumenta após treinamentos de alta intensidade (Arampatzis et al., 2007; Bohm et al., 2015). Considerando que as contrações excêntricas promovem maior sobrecarga no complexo músculo-tendão que contrações isométricas e concêntricas (Herzog et al., 2015), parece razoável esperar que o treinamento excêntrico possa causar maiores e/ou mais rápidas adaptações tendíneas que outras modalidades de exercício. Caso isto seja verdadeiro, programas de treinamento/reabilitação mais efetivos e eficientes podem ser desenvolvidos. No entanto, não foram encontrados estudos que avaliaram o tempo mínimo/necessário para que o treinamento excêntrico cause adaptações no tendão de Aquiles.

A literatura tem apresentado a cronologia das adaptações musculares causadas pelo treinamento de força excêntrico (Baroni et al., 2013b), isométrico (Kubo et al., 2012) e isoínercial (concêntrico-excêntrico) (Moritani e deVries, 1979). No entanto, apenas três estudos (Urlando e Hawkins; Kubo et al., 2010; Kubo et al., 2012) avaliaram a cronologia das adaptações causadas pelo treinamento no tendão de Aquiles. Enquanto Urlando e Hawkins (2007) não encontraram diferenças significativas nas propriedades mecânicas tendíneas após

oito semanas de treinamento isoinercial (concêntrico-excêntrico), os achados de Kubo (2010; 2012) sugerem que três meses de treinamento isométrico são necessários para que ocorra aumento significativo na rigidez do tendão de Aquiles. Este aumento da rigidez tendínea pode ocorrer devido a alterações nas propriedades materiais (i.e. módulo de Young), nas propriedades morfológicas (i.e. hipertrofia), ou em ambas. Um recente modelo de adaptação tendínea ao treinamento (Wiesinger et al., 2015), sugere que o aumento da rigidez tendínea está mais relacionado com mudanças nas propriedades materiais do que nas propriedades morfológicas, especialmente nas primeiras semanas de treinamento (Bohm et al., 2015; Wiesinger et al., 2015). Poucos estudos avaliaram a contribuição das propriedades materiais e morfológicas nas adaptações ocorridas no tendão de Aquiles após programas de treinamento (Rosager et al., 2002; Houghton et al., 2013; Wiesinger et al., 2015), no entanto, estas contribuições não foram avaliadas após programas de treinamento excêntrico.

Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico isocinético nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles de indivíduos saudáveis. Especificamente, pretendemos responder as seguintes questões: (1) Quais adaptações ocorrem nas propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles durante o período de treinamento? (2) Quantas semanas são necessárias para que alterações significativas ocorram? (3) Qual é a contribuição das propriedades morfológicas e materiais na adaptação do tendão de Aquiles durante o período de treinamento?

## **MÉTODOS**

### **Participantes**

O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (nr. 787.347). O *software* G\*Power (Kiel University, Germany) calculou um número mínimo de 15 indivíduos (*effect size* = 0.30; nível de significância = 0.05; poder = 0.80) (Rhea et al., 2004; Faul et al., 2007; Baroni et al., 2013a). Indivíduos saudáveis e fisicamente ativos do sexo masculino (18-35 anos) foram convidados a participar do estudo. Foram excluídos do estudo: (1) indivíduos que realizaram treinamento de membros inferiores até seis meses antes da coleta de dados; (2) indivíduos com a presença de lesões musculoesqueléticas em membros inferiores e/ou superiores; (3) indivíduos com qualquer contra-indicação à realização de exercícios máximos (doenças cardiovasculares, musculoesqueléticas, respiratórias ou neurológicas); (4) indivíduos que apresentassem dificuldade de entendimento e/ou execução dos protocolos de testes e treinamento no

dinamômetro isocinético; (5) indivíduos que não compareceram a duas sessões de treinamento (ou seja, cada indivíduo teve direito a faltar uma única sessão durante o período de treinamento). Todos os indivíduos incluídos no estudo assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido previamente aprovado pelo CEP da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### **Desenho Experimental**

As propriedades mecânicas e morfológicas do tendão de Aquiles foram avaliadas em cinco momentos: no início do estudo (Controle); após quatro semanas de período controle (Pré) no qual os participantes foram instruídos a não alterar sua rotina de atividades físicas; após quatro (Pós-4), oito (Pós-8) e doze (Pós-12) semanas de treinamento excêntrico (Tabela 4). O desenho experimental adotado pelo estudo não necessita de um grupo controle, uma vez que os indivíduos realizaram um período controle de quatro semanas imediatamente antes do início do programa de treinamento excêntrico (Baroni et al., 2013a; Baroni et al., 2013b) (Figura 2). Nas semanas de avaliação não foram realizadas sessões de treinamento, e as avaliações ocorreram quatro dias após a última sessão de treinamento (Duclay et al., 2009) (Tabela 4).

Antes das avaliações, os locais de coleta de dados das propriedades morfológicas do tendão de Aquiles foram identificados, e os eletrodos de eletromiografia (EMG) foram posicionados. Após, o indivíduo foi posicionado sentado na cadeira do dinamômetro isocinético e as propriedades morfológicas e o braço de momento do tendão de Aquiles foram determinados em repouso. Por fim, a deformação tendínea foi obtida durante contrações voluntárias máximas isométricas (CVMI) no dinamômetro isocinético. A partir destes dados, a rigidez tendínea e o módulo de Young foram calculados.

### **Avaliação das propriedades morfológicas do tendão de Aquiles**

As propriedades morfológicas do tendão de Aquiles foram determinadas a partir de imagens de ultrassonografia (US). As imagens foram coletadas em repouso em uma posição de referência, na qual o quadril permaneceu flexionado em  $85^\circ$  ( $0^\circ$  = extensão total) e o joelho totalmente estendido. O eixo de rotação do tornozelo foi alinhado com o eixo de rotação do dinamômetro e o pé foi fixado no dinamômetro. Faixas de velcro foram utilizadas para fixar o pé, a perna na cadeira do dinamômetro e estabilizar o tronco e o quadril. Nesta posição, com o tornozelo na posição neutra (superfície do pé perpendicular à perna), as propriedades morfológicas do tendão de Aquiles foram avaliadas por meio de um transdutor linear (60mm; 7.5 MHz) conectado a um sistema de US (SSD 4000, 51 Hz, *Aloka Inc., Tokyo, Japan*).

O comprimento do tendão (CT) foi obtido com o transdutor posicionado longitudinalmente ao tendão. A inserção do tendão de Aquiles no calcâneo foi identificada nas imagens de US e marcada na pele. Após, o transdutor foi movido até a junção miotendínea do músculo gastrocnêmio medial (JMT), a qual também foi marcada na pele. A distância entre os dois pontos marcados na pele foi obtida por meio de uma fita métrica, e representou o CT em repouso (Arya e Kulig, 2010).

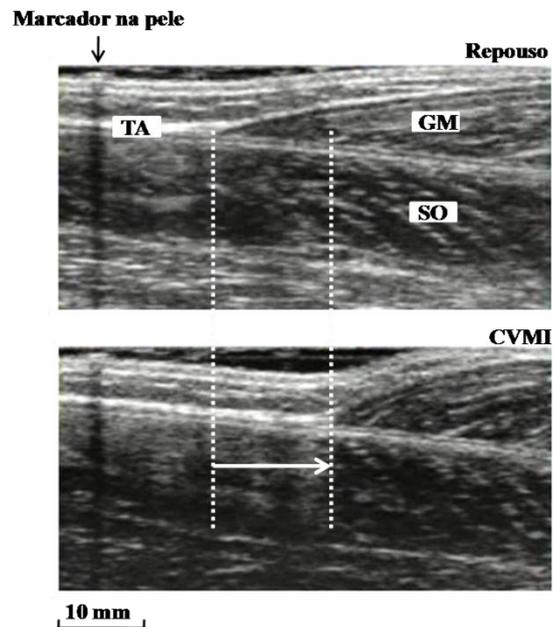
A área de secção transversa (AST) do tendão de Aquiles foi obtida com o transdutor posicionado perpendicularmente ao tendão. As imagens foram obtidas em 2 cm, 4 cm e 6 cm da inserção do tendão de Aquiles no calcâneo. Pontos de referência anatômicos (e.g. maléolos), marcas na pele (cicatrizes e sardas), a inserção do tendão de Aquiles no calcâneo e os pontos de medida da AST foram mapeados em folhas de acetato, as quais foram utilizadas durante os diferentes dias de coleta de dados, como forma de garantir que todas as medidas foram obtidas no mesmo local. A AST foi medida cinco vezes em cada imagem e o valor médio foi determinado para cada posição. A média das três posições foi considerada como a AST do tendão de Aquiles (Arya e Kulig, 2010; Geremia et al., 2015).

#### **Avaliação da deformação tendínea durante contrações isométricas máximas**

A deformação tendínea foi obtida durante CVMI em rampa, com o indivíduo na posição de referência e o tornozelo na posição neutra. O protocolo em rampa consiste em o indivíduo atingir sua produção de torque máximo de forma gradual. O transdutor de US foi amarrado na perna do indivíduo e posicionado longitudinalmente ao eixo mecânico do tendão na JMT do músculo gastrocnêmio medial (Figura 7). Um marcador foi posicionado na pele com o objetivo de detectar possíveis movimentos do transdutor (Figuras 7 e 8). Quando algum movimento do transdutor era detectado, a correção era realizada de acordo com a magnitude do movimento.

Os indivíduos realizaram três CVMI em rampa de flexão plantar visando a familiarização dos testes e o pré-condicionamento tendíneo (Magnusson et al., 2001). Após, os indivíduos realizaram duas CVMI em rampa durante 10 segundos, com um intervalo de dois minutos entre as contrações. Durante as CVMI em rampa foram obtidos o torque, imagens de US, ativação elétrica do músculo tibial anterior e parâmetros cinemáticos do tornozelo. As imagens de US foram gravadas em uma unidade de gravação externa de DVD (*R130/XAZ, 32Hz, Samsung, Seoul Inc., South Korea*; frequência de amostragem = 32Hz). A contração com o maior pico de torque foi utilizada para a análise dos dados. Um sistema de sincronização (*HORITA, Video Stop Watch VS-50; HORITA Company Inc., USA*) foi utilizado

para sincronizar o torque, as imagens de US, a ativação elétrica e os parâmetros cinemáticos.



**Figura 7.** Junção miotendínea do músculo gastrocnêmio medial (GM) em repouso e durante uma contração voluntária máxima isométrica (CVMI). Um marcador foi posicionado na pele para verificar possíveis movimentos do transdutor de ultrassonografia. A seta branca indica o deslocamento da junção miotendínea durante a CVMI. TA = tendão de Aquiles; SO = sóleo.

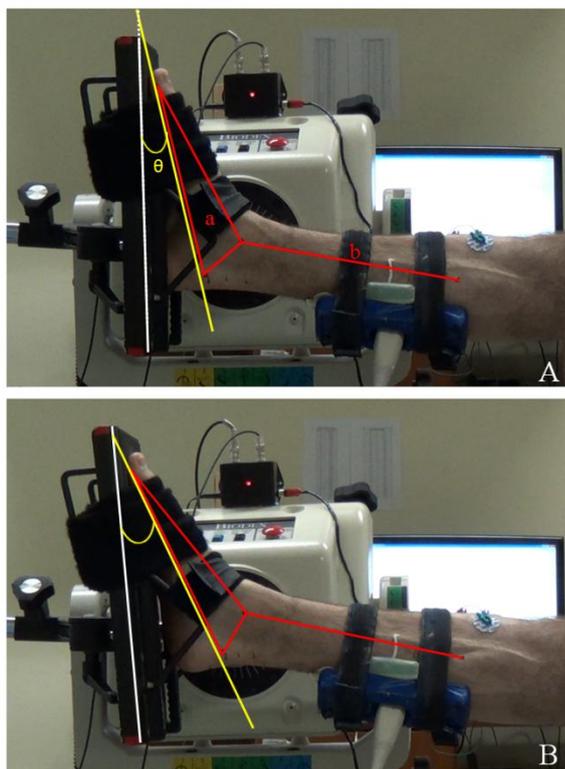
### **Correção do deslocamento tendíneo causado pela rotação do tornozelo**

Durante as CVMIs podem ocorrer rotações articulares, independente da fixação externa, que causam movimentos indesejados de flexão plantar, os quais superestimam a deformação tendínea (Magnusson et al., 2001). Como forma de corrigir este efeito, marcadores reflexivos foram colocados no terço médio da perna, nos maléolos, no hálux, no calcâneo e nas extremidades superior e inferior da plataforma do dinamômetro isocinético (Figura 8). A posição dos marcadores foi monitorada durante as CVMIs em rampa por meio de uma câmera de vídeo (*HDR-CX, 60Hz, Sony, Japan*) (Muramatsu et al., 2001), a qual estava sincronizada com o dinamômetro isocinético por meio de um sistema de sincronismo. O sistema de sincronismo consistiu de um botão que quando pressionado acendia uma lâmpada, a qual era captada pela câmera de vídeo (Figura 8). O mesmo botão que acendia a luz da lâmpada gerava um pulso elétrico que era obtido em um canal separado do sistema de aquisição de dados (*Windaq data collection system, DATAQ Instruments, Akron, 16-bit, USA*) e com o sistema de US, permitindo o sincronismo da câmera de vídeo, com o torque e com as imagens de US.



**Figura 8.** Marcadores reflexivos (marcadores vermelhos) posicionados no membro inferior do indivíduo e na plataforma do dinamômetro isocinético os quais permitiram que os movimentos articulares fossem avaliados. Um marcador foi posicionado na pele, o qual permitiu detectar possíveis movimentos do transdutor de ultrassonografia (US) durante as contrações isométricas em rampa.

Um modelo espacial bidimensional de dois segmentos (pé = marcador do hálux, marcador do calcâneo e marcador do maléolo; perna = marcador da perna até o marcador do maléolo) foi utilizado para calcular o ângulo de flexão plantar durante o repouso (Figura 9A) e durante as contrações isométricas em rampa (Figura 9B). A deformação do tendão de Aquiles foi corrigida por meio do rastreamento da JMT do músculo gastrocnêmio medial durante movimentos passivos (Magnusson et al., 2003), os quais foram realizados com velocidade constante de  $5^\circ/\text{s}$  entre os ângulos articulares de  $90^\circ$  (tíbia perpendicular a linha do pé, com o joelho totalmente estendido) e  $125^\circ$ . Três ciclos de movimentos de flexão plantar passivos foram executados. Durante os movimentos passivos a atividade elétrica dos músculos gastrocnêmio lateral, sóleo e tibial anterior foram monitoradas. Caso houvesse registro de sinal eletromiográfico durante os movimentos passivos, os ciclos eram repetidos. O rastreamento da JMT do músculo gastrocnêmio medial foi realizada usando o *software* SkillSpector (1.3.2, Video4Coach, Denmark). O deslocamento da JMT foi obtido para cada ângulo articular nos três ciclos de movimentos passivos, sendo a média de cada ângulo utilizada para a análise. Assim, a deformação da JMT, obtida durante as contrações em rampa, foi corrigida por meio da subtração do deslocamento da JMT causado pela rotação articular (Muramatsu et al., 2001; Magnusson et al., 2003).



**Figura 9.** Modelo bidimensional dos segmentos pé (a) e perna (b), o qual permitiu calcular o ângulo ( $\theta$ ) de flexão plantar durante o repouso (A) e as contrações isométricas em rampa (B). As linhas brancas representam a plataforma do dinamômetro isocinético.

### **Correção do torque de flexão plantar por meio da ativação elétrica muscular**

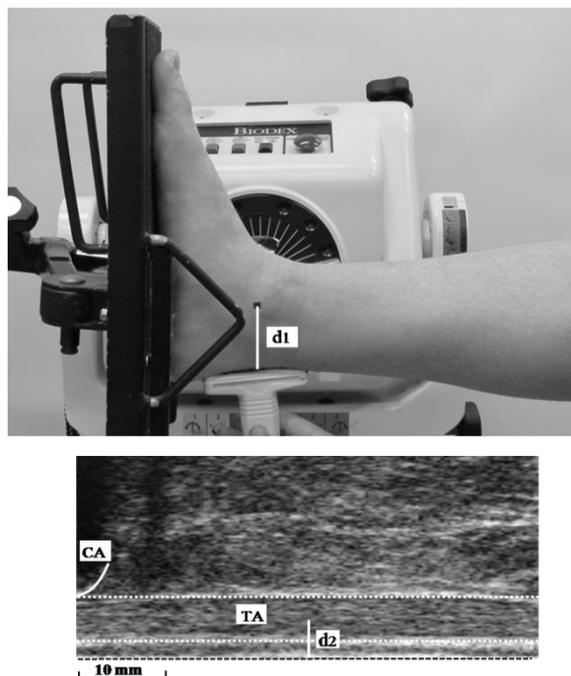
O torque registrado pelo dinamômetro corresponde ao torque final de flexão plantar, o qual é diferente do torque produzido pelos flexores plantares caso ocorra uma ativação antagonista (Magnusson et al., 2001; Geremia et al., 2015). Por esta razão, o torque de flexão plantar foi corrigido por meio da relação entre a ativação do músculo tibial anterior e o torque de flexão dorsal produzido (Arya e Kulig, 2010; Waugh et al., 2012).

A ativação do músculo tibial anterior foi obtida por meio de EMG de superfície (configuração bipolar; 20mm de distância inter-eletrodos; Ag/AgCl, Meditrace, Kendall, Canada) em três diferentes condições (Mademli e Arampatzis, 2004; Geremia et al., 2015): (a) em repouso, (b) abaixo e (c) acima da coativação produzida durante as contrações de flexão plantar. Os sinais eletromiográficos foram amplificados (AMT-8, Bortec Biomedical Ltd., Canada), e digitalizados (frequência de amostragem = 2000 Hz) simultaneamente com o torque de flexão dorsal realizado no dinamômetro (Windaq data collection system, DATAQ Instruments, Akron, 16-bit, USA). Os sinais eletromiográficos foram filtrados (Butterworth, 20-500Hz), retificados e suavizados (Butterworth, passa-baixa, 4 Hz). Uma relação linear foi estabelecida entre o sinal eletromiográfico e o torque de flexão dorsal nos três diferentes

níveis de ativação. Uma regressão linear foi realizada entre os três diferentes valores de torque e ativação, o que permitiu estimar o valor de torque correspondente à coativação do músculo tibial anterior durante a CVMI em rampa (Arya e Kulig, 2010; Waugh et al., 2012; Geremia et al., 2015). Por fim, o valor estimado foi adicionado ao valor de torque medido durante a CVMI.

### **Avaliação do braço de momento do tendão de Aquiles**

O braço de momento do tendão de Aquiles foi obtido a partir de imagens de vídeo e de US (Zhao et al., 2009; Manal et al., 2010). Um marcador reflexivo foi posicionado no maléolo medial, e o transdutor de US foi posicionado longitudinalmente sobre o tendão de Aquiles. Nesta posição, foram obtidas duas imagens: (a) uma imagem de vídeo do maléolo medial; e (b) uma imagem de US do tendão de Aquiles (Figura 10). As distâncias entre o marcador e o transdutor ( $d_1$ ; Figura 10), e entre a linha de ação do tendão de Aquiles e o transdutor ( $d_2$ ; Figura 10) foram obtidas por meio do *software* ImageJ (*National Institutes of Health, Maryland, USA*). A diferença entre  $d_1$  e  $d_2$  foi considerada como o braço de momento do tendão de Aquiles (Zhao et al., 2009; Manal et al., 2010).



**Figura 10.** Avaliação do braço de momento do tendão de Aquiles. A distância entre o centro do maléolo medial e o transdutor de ultrassonografia ( $d_1$ ) foi obtida por meio de uma imagem de vídeo (acima). A distância entre o tendão de Aquiles (TA) e a superfície da pele ( $d_2$ ) foi obtida por meio de ultrassonografia. O braço de momento do tendão de Aquiles foi considerado como a diferença entre  $d_1$  e  $d_2$ . CA = calcâneo.

### **Propriedades mecânicas e materiais do tendão de Aquiles**

A força do tendão de Aquiles foi obtida por meio da razão entre o torque corrigido de flexão plantar pelo braço momento do tendão de Aquiles. A deformação tendínea foi obtida por meio do deslocamento da JMT durante a CVMI em rampa. O *software* Virtual Dub (Avery Lee, USA) foi utilizado para o rastreamento das imagens quadro-a-quadro. Após a seleção das imagens, o deslocamento da JMT foi determinado pelo *software* SkillSpector (1.3.2, Video4Coach, Denmark). A força e a deformação do tendão de Aquiles foram obtidas em intervalos de 10% CVMI (de 0 a 100%). A inclinação da curva da relação força-deformação entre 50% e 100% da CVMI (Arampatzis et al., 2007; Bohm et al., 2014) foi considerada como a rigidez relativa ( $rigidez_{REL}$ ) para cada sujeito. A rigidez tendínea também foi calculada considerando uma amplitude absoluta de força comum para todos os participantes ( $rigidez_{ABS}$ ). Este procedimento foi realizado para confirmar que as respostas foram independentes dos valores de forças nos quais a rigidez foi avaliada (Waugh et al., 2012). A inclinação da curva força-deformação entre 50%-100% do pico de força do indivíduo mais fraco foi determinada para cada indivíduo e considerada como a  $rigidez_{ABS}$ .

O *stress* foi obtido por meio da razão entre a força do tendão de Aquiles e a AST tendínea. O *strain* foi considerado como a deformação percentual tendínea em relação ao CT. Os *stresses* e os *strains* foram obtidos em intervalos de 10% da CVMI (de 0 a 100%). O módulo de Young foi determinado como a inclinação da curva *stress-strain* nos mesmos níveis relativos (Módulo de  $Young_{REL}$ ) e absolutos (Módulo de  $Young_{ABS}$ ) da rigidez (Waugh et al., 2012).

Todos os cálculos necessários para a obtenção das propriedades mecânicas e materiais foram realizados no software Matlab (*The MathWorks, Natick, MA, USA*).

### **Programa de treinamento excêntrico**

O programa de treinamento de 12 semanas foi constituído de três mesociclos de quatro semanas. O primeiro mesociclo teve sete sessões de treinamento, enquanto que o segundo e terceiro mesociclos tiveram oito sessões de treinamento cada. Assim, o programa totalizou 23 sessões de treinamento (Tabela 4). O menor número de sessões de treinamento no primeiro mesociclo foi utilizado com o objetivo de evitar o dano muscular excessivo na primeira semana de treinamento (Baroni et al., 2013a). Dessa forma, com exceção da primeira semana, as sessões de treinamento foram realizadas duas vezes por semana, respeitando um intervalo mínimo de 72 horas entre as sessões (segundas e quintas-feiras). O volume de treinamento foi aumentado de forma gradual por meio do aumento do número de séries em cada um dos

mesociclos (Tabela 4).

Antes de cada sessão de treinamento, os indivíduos realizaram um aquecimento de 10 minutos em um cicloergômetro com potência constante de 100 W (Duclay et al., 2009). Após, um aquecimento específico (contrações concêntricas submáximas de flexão plantar e dorsal; 1 série x 10 repetições a 120°/s) foi realizado no dinamômetro isocinético (*Biodex System 3 Pro, Biodex Medical Systems, USA*).

Após o aquecimento, o treinamento excêntrico dos músculos flexores plantares foi realizado. Devido a diferenças na amplitude de movimento articular entre os indivíduos, uma amplitude de movimento de 50°, iniciada em 80% da flexão dorsal máxima (FDmáx), foi utilizada para garantir que todos indivíduos realizassem o treinamento no mesmo comprimento muscular relativo. Este procedimento também foi utilizado como uma medida de segurança, com o objetivo evitar possíveis lesões musculares e/ou tendíneas na flexão dorsal máxima, posição na qual o torque máximo de flexão plantar é produzido. A FDmáx foi reavaliada, no dinamômetro isocinético, a cada quatro semanas para ajustar a amplitude de movimento.

Durante o treinamento, os indivíduos foram instruídos a resistir de forma máxima contra o movimento de flexão dorsal imposto pelo dinamômetro. Os indivíduos realizaram apenas contrações excêntricas durante o programa de treinamento. Ao final de cada contração excêntrica o pé era movimentado passivamente até a posição inicial (50°; iniciada a partir 80% da FDmáx). Os participantes foram encorajados a promover a contração máxima dos flexores plantares assim que o braço do dinamômetro atingisse a posição inicial. As repetições foram realizadas de forma contínua, sendo garantido um minuto de intervalo entre as séries.

Para determinar a intensidade utilizada durante o programa de treinamento, o torque máximo excêntrico foi normalizado pelo torque máximo isométrico antes (Pré) e durante (Pós-4, Pós-8 e Pós-12) o treinamento. Na posição de referência, três CVMI (com cinco segundos de duração cada) foram executadas, sendo garantido um intervalo de dois minutos entre cada contração. Para a avaliação da produção do torque excêntrico máximo, três contrações máximas excêntricas consecutivas foram executadas em uma velocidade angular de 30°/s (a mesma utilizada no programa de treinamento), na mesma amplitude de movimento de cada mesociclo. O teste foi realizado duas vezes com um intervalo de dois minutos entre cada teste. As contrações máximas isométricas e excêntricas foram realizadas após 72 horas das avaliações das propriedades morfológicas e mecânicas tendíneas.

Os membros dominante e não-dominante foram treinados para evitar possíveis desequilíbrios musculares entre si. No entanto, apenas os membros dominantes (Elias et al.,

1998) foram utilizados na análise dos dados.

### **Análise estatística**

Um coeficiente de correlação intraclasse (ICC) foi utilizado para verificar a reprodutibilidade teste-reteste entre os valores obtidos nas avaliações Controle e Pré-treino. Além disso, a AST e a deformação tendínea de seis indivíduos foram utilizadas para determinar a confiabilidade das medidas. Os dados foram obtidos em dois dias diferentes com um intervalo de uma semana (Arya e Kulig, 2010; Geremia et al., 2015). A confiabilidade das medidas foi obtida por meio do ICC.

Uma ANOVA para medidas repetidas foi utilizada para verificar os efeitos do treinamento ao longo do tempo. Um *post-hoc* de Bonferroni foi utilizado para identificar as diferenças entre as avaliações (Controle, Pré, Pós-4, Pós-8 e Pós-12) para cada variável. A análise estatística foi realizada por meio do *software* SPSS 17.0, e adotado um nível de significância de 5% ( $\alpha < 0,05$ ).

### **RESULTADOS**

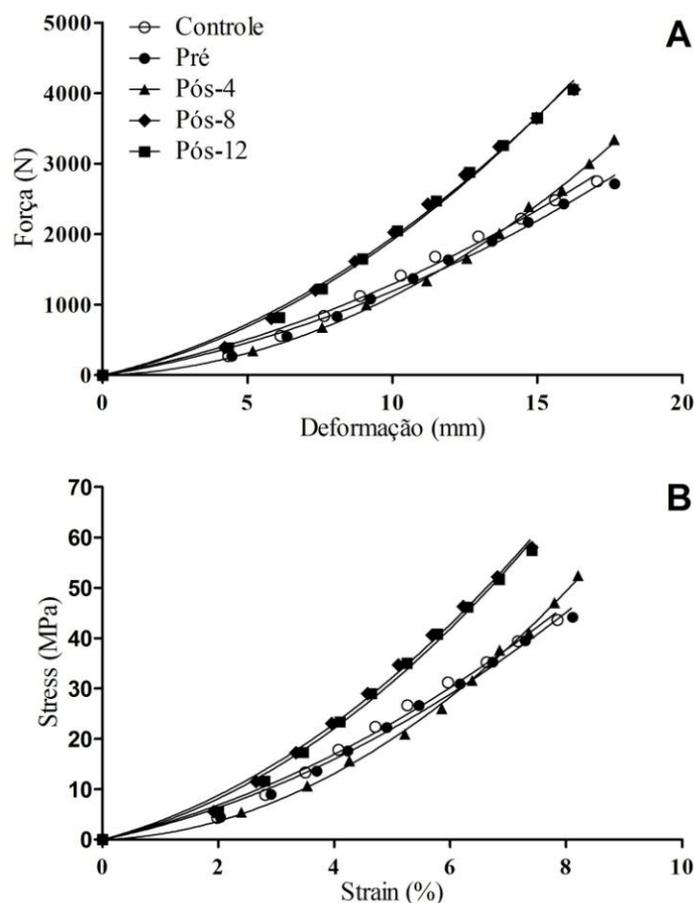
Vinte e quatro indivíduos iniciaram o programa de treinamento. Um indivíduo abandonou o treinamento por motivos pessoais e três indivíduos foram excluídos devido ao desenvolvimento de dor na articulação do tornozelo durante o período de treinamento. Os dados de cinco indivíduos foram excluídos devido à problemas técnicos dos instrumentos utilizados nas avaliações. Assim, quinze indivíduos (idade:  $26 \pm 5$  anos; estatura:  $1.76 \pm 0.07$  m; massa corporal:  $75 \pm 9$  kg; membro direito:  $n=13$ ; membro esquerdo:  $n=2$ ) completaram as 12 semanas de treinamento excêntrico. Dez indivíduos completaram as 23 sessões de treinamento e cinco indivíduos faltaram uma sessão por motivos pessoais (aderência: 99%). O pico de torque excêntrico durante as sessões de treinamento variou entre 140 e 160% da força isométrica máxima.

Resultados quase perfeitos (Landis e Koch, 1977) de reprodutibilidade entre as avaliações Controle e Pré-treino foram observados em quase todos os testes: CT ( $r=0.99$ ), AST (0.94), força ( $r=0.97$ );  $rigidez_{REL}$  ( $r=0.82$ ), *stress* ( $r=0.94$ ), *strain* ( $r=0.87$ ), módulo de  $Young_{REL}$  ( $r=0.87$ ), módulo de  $Young_{ABS}$  ( $r=0.87$ ). Apenas a deformação ( $r=0.77$ ) e a  $rigidez_{ABS}$  ( $r=0.80$ ) apresentaram um resultado substancial no teste de reprodutibilidade (Landis e Koch, 1977). Os valores de ICC de AST (0.98;  $p < 0.001$ ) e deformação (0.99;  $p < 0.001$ ) apresentaram alta confiabilidade (Landis e Koch, 1977).

As relações força-deformação (Figura 11A) e *stress-strain* (Figura 11B) foram alteradas ao longo do período de treinamento. A tabela 6 apresenta os valores das

propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles ao longo do programa de treinamento. Não foram encontradas diferenças significativas para o CT, deformação máxima e *strain* máximo. Nas primeiras quatro semanas de treino, houve aumento da força (23%), rigidez<sub>REL</sub> (51%), rigidez<sub>ABS</sub> (25%), *stress* máximo (19%), módulo de Young<sub>REL</sub> (87%) e módulo de Young<sub>ABS</sub> (20%). Não foram observadas diferenças significativas na AST tendínea em Pós-4.

Em Pós-8, a força máxima, a rigidez<sub>REL</sub> e a rigidez<sub>ABS</sub> foram maiores que no período Pré (49%, 81% e 62%, respectivamente) e no período Pós-4 (21%, 20% e 30%, respectivamente), e a AST aumentou (15%). O *stress* máximo, o módulo de Young<sub>REL</sub> e o módulo de Young<sub>ABS</sub> não apresentaram diferenças significativas entre os períodos Pós-4 e Pós-8. Não foram encontradas diferenças significativas entre os períodos Pós-8 e Pós-12.



**Figura 11.** Relações força-deformação (A) e stress-strain (B) nos períodos Controle, Pré, Pós-4, Pós-8 e Pós-12.

**Tabela 6.** Propriedades morfológicas, mecânicas e materiais do tendão de Aquiles (média  $\pm$  dp).

	<b>Controle</b>	<b>Pré</b>	<b>Pós-4</b>	<b>Pós-8</b>	<b>Pós-12</b>
<b>CT (mm)</b>	218.8 <sup>a</sup> $\pm$ 20.5	219.6 <sup>a</sup> $\pm$ 20.7	217.4 <sup>a</sup> $\pm$ 22.4	221.4 <sup>a</sup> $\pm$ 21.2	220.1 <sup>a</sup> $\pm$ 20.8
<b>AST (mm<sup>2</sup>)</b>	63.4 <sup>a</sup> $\pm$ 7.8	62.0 <sup>a</sup> $\pm$ 8.5	64.4 <sup>a</sup> $\pm$ 9.4	71.1 <sup>b</sup> $\pm$ 10.0	72.4 <sup>b</sup> $\pm$ 11.4
<b>Força (N)</b>	2749.5 <sup>a</sup> $\pm$ 491.1	2714.8 <sup>a</sup> $\pm$ 426.8	3339.8 <sup>b</sup> $\pm$ 383.6	4051.9 <sup>c</sup> $\pm$ 322.0	4053.1 <sup>c</sup> $\pm$ 560.5
<b>Deformação (mm)</b>	17.1 <sup>a</sup> $\pm$ 2.6	17.7 <sup>a</sup> $\pm$ 1.8	17.7 <sup>a</sup> $\pm$ 3.3	16.3 <sup>a</sup> $\pm$ 2.6	16.2 <sup>a</sup> $\pm$ 2.6
<b>Rigidez<sub>REL</sub> (N/mm)</b>	205.6 <sup>a</sup> $\pm$ 51.9	191.9 <sup>a</sup> $\pm$ 35.9	290.6 <sup>b</sup> $\pm$ 35.7	347.5 <sup>c</sup> $\pm$ 60.6	349.6 <sup>c</sup> $\pm$ 58.9
<b>Rigidez<sub>ABS</sub> (N/mm)</b>	177.0 <sup>a</sup> $\pm$ 29.2	170.2 <sup>a</sup> $\pm$ 23.4	212.8 <sup>b</sup> $\pm$ 25.7	275.9 <sup>c</sup> $\pm$ 63.3	270.3 <sup>c</sup> $\pm$ 39.4
<b>Stress (MPa)</b>	43.6 <sup>a</sup> $\pm$ 7.4	44.1 <sup>a</sup> $\pm$ 7.1	52.4 <sup>b</sup> $\pm$ 6.4	58.0 <sup>b</sup> $\pm$ 8.7	57.4 <sup>b</sup> $\pm$ 13.1
<b>Strain (%)</b>	7.9 <sup>a</sup> $\pm$ 1.4	8.1 <sup>a</sup> $\pm$ 1.1	8.2 <sup>a</sup> $\pm$ 1.8	7.4 <sup>a</sup> $\pm$ 1.4	7.4 <sup>a</sup> $\pm$ 1.2
<b>Módulo de Young<sub>REL</sub> (MPa)</b>	706.8 <sup>a</sup> $\pm$ 190.8	694.8 <sup>a</sup> $\pm$ 159.7	1302.5 <sup>b</sup> $\pm$ 181.4	1279.1 <sup>b</sup> $\pm$ 409.7	1292.5 <sup>b</sup> $\pm$ 436.0
<b>Módulo de Young<sub>ABS</sub> (MPa)</b>	602.9 <sup>a</sup> $\pm$ 79.7	596.2 <sup>a</sup> $\pm$ 86.2	715.9 <sup>b</sup> $\pm$ 96.2	751.9 <sup>b</sup> $\pm$ 109.9	748.2 <sup>b</sup> $\pm$ 96.7

Controle: avaliação antes do período controle; Pré: Avaliação após o período controle e antes do treinamento; Pós-4: avaliação após quatro semanas de treinamento; Pós-8: avaliação após oito semanas de treinamento; Pós-12: avaliação após 12 semanas de treinamento. CT = comprimento do tendão de Aquiles em repouso; AST = área de secção transversa; Força = força máxima avaliada durante as contrações isométricas em rampa; Deformação = deformação do tendão de Aquiles durante a produção de força máxima; Rigidez<sub>REL</sub> = inclinação da curva força-deformação obtida entre 50% e 100% da força voluntária isométrica máxima; Stress = razão entre a força máxima do tendão de Aquiles e a AST tendínea; Strain = razão entre a deformação máxima e o comprimento do tendão; módulo de Young<sub>REL</sub> = inclinação da curva stress-strain obtida entre 50% e 100% do stress máximo; Rigidez<sub>ABS</sub> e módulo de Young<sub>ABS</sub> = inclinações das curvas força-deformação e stress-strain, respectivamente, obtidas entre 50% e 100% do pico de força do participante mais fraco (amplitude de força: 825 - 1625 N). Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as avaliações ( $p \leq 0.05$ ).

## DISCUSSÃO

O objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico nas propriedades morfológicas e mecânicas do tendão de Aquiles de indivíduos saudáveis. Nossos principais achados foram: (1) o treinamento excêntrico aumentou a rigidez e o módulo de Young (valores relativos e absolutos) do tendão de Aquiles e, após oito semanas de treinamento, houve hipertrofia do tendão; (2) quatro semanas de treinamento foram suficientes para detectar alterações significativas na rigidez tendínea; e (3) o aumento da rigidez foi muito maior que o aumento da AST, sugerindo que as mudanças na rigidez tendínea foram causadas, principalmente, por mudanças nas propriedades materiais.

Ao final do período de treinamento (Pós-12), o aumento da rigidez<sub>REL</sub> (88%) e do módulo de Young<sub>REL</sub> (66%) foram maiores que os aumentos encontrados em outros estudos que avaliaram os efeitos do treinamento isométrico (rigidez: +16-54%; módulo de Young: +17-45%) e isoinercial (concêntrico-excêntrico) (rigidez: +30-31%). Malliaras et al. (2013) verificaram os efeitos de 12 semanas de treinamento excêntrico para os músculos extensores do joelho (27) em homens saudáveis. Ao final do período de treinamento, os autores encontraram aumentos na rigidez (+81%) e no módulo de Young (+77%) similares aos nossos, o que sugere que os maiores aumentos de rigidez tendínea são obtidos em estudos que utilizam contrações excêntricas. Estes achados podem indicar que os mecanismos específicos envolvidos na contração excêntrica são os principais responsáveis por esta grande adaptação tendínea. No entanto, pode ser que a diferença não esteja relacionada com a especificidade da contração, mas sim pelos altos níveis de força atingidos durante contrações excêntricas. Dessa forma, o grande aumento de rigidez encontrado no presente estudo e por Malliaras et al. (2013), pode ser explicado pela alta sobrecarga das contrações excêntricas durante exercícios de alta intensidade (Malliaras et al., 2013: 80% de contração voluntária máxima excêntrica; nosso estudo: 140 - 160% da CVMI) comparado a níveis submáximos de 90% da CVMI (Arampatzis et al., 2007; Arampatzis et al., 2010; Bohm et al., 2014) ou de 80% de uma repetição máxima (1-RM) (Kubo et al., 2012). Estudos que buscaram avaliar os efeitos de diferentes sobrecargas no tendão de Aquiles (55% - 90% da contração voluntária máxima) (Arampatzis et al., 2007) e no tendão patelar (80% de 1-RM concêntrica-excêntrica e 80% de 1-RM excêntrica) (Malliaras et al., 2013) suportam a ideia de que são necessários treinamentos com alta intensidade para aumentar a rigidez tendínea. Dessa forma, nossos achados corroboram com a hipótese de que a magnitude da sobrecarga aplicada no tendão é o principal fator de adaptação tendínea ao treinamento de força (Bohm et al., 2015).

Arampatzis et al., (2007, 2010) sugerem que exista um limiar para que o estímulo mecânico possa influenciar a homeostase da matriz extracelular e regular as adaptações anabólicas da célula. Dessa forma, um estímulo mecânico adequado promove a síntese de um colágeno mais forte, e deforma os fibroblastos (promovendo a síntese de proteínas por meio da transdução mecânica), alterando os componentes da matriz extracelular. As respostas adaptativas do tendão parecem estar mais relacionadas com alterações nas propriedades materiais do que com alterações nas propriedades morfológicas (Bohm et al., 2015). Nossos resultados vão ao encontro desta afirmação, uma vez que houve aumento da rigidez tendínea e do módulo de Young após quatro semanas de treinamento, sem ocorrer mudanças na AST. Diversos mecanismos podem ser responsáveis pelas mudanças nas propriedades materiais tendíneas, como o aumento da síntese de proteínas na matriz extracelular, o aumento da densidade do colágeno, alterações nas ondulações das fibras de colágeno e o aumento da síntese de proteoglicanas (Malliaras et al., 2013).

O aumento da rigidez tendínea também pode ser atribuído à hipertrofia do tendão. A resposta hipertrófica tendínea ao treinamento de força foi observada em alguns estudos (Arampatzis et al., 2007; Bohm et al., 2014), mas não em outros (Mouraux et al., 2008; Kubo et al., 2012; Malliaras et al., 2013; Gomes et al., 2016). O aumento da AST do tendão pode reduzir o *stress* aplicado para uma mesma força absoluta, o que pode reduzir o risco do desenvolvimento de tendinopatias (Magnusson et al., 2010) e rupturas completas tendíneas (Magnusson et al., 2008). O aumento da AST encontrado no presente estudo indica que, possivelmente, ocorreu hipertrofia tendínea. Além disso, o aumento encontrado parece não estar relacionado com o aumento da quantidade de água no tecido, uma vez que as avaliações foram realizadas quatro dias após a última sessão de treino, o qual constitui um tempo adequado para a recuperação tendínea (Bohm et al., 2014).

Entender a cronologia das adaptações tendíneas é importante pois permite que uma prescrição mais precisa de programas de prevenção, reabilitação e condicionamento. Kubo et al., (2010, 2012) encontraram um aumento significativo da rigidez tendínea somente após 12 semanas de treinamento isométrico. Além disso, não foram encontrados aumentos significativos na AST tendínea, indicando que não houve hipertrofia deste tecido. No entanto, Wiesinger et al. (2015) demonstram que as adaptações nas propriedades mecânicas tendíneas podem ocorrer antes de oito semanas de treinamento, o que vai ao encontro dos nossos achados. A alta sobrecarga mecânica utilizada no nosso estudo (contrações excêntricas máximas) poderia explicar o aumento antecipado da rigidez quando comparado com o estudo de Kubo et al. (2012), o qual utilizou a intensidade de 80% CVMI. No entanto, cabe salientar

que novas hipóteses que explicam o comportamento muscular durante contrações excêntricas foram formuladas recentemente (Herzog et al., 2015; Schappacher-Tilp et al., 2015). Dessa forma, não podemos excluir que o alongamento tendíneo durante contrações excêntricas pode gerar diferentes adaptações em comparação com outros tipos de contração, como já foi observado para a arquitetura muscular (Reeves et al., 2009), podendo ser um fator que contribuiu para as adaptações tendíneas que observamos no presente estudo.

Nosso estudo possui algumas implicações clínicas importantes. Considerando que as tendinopatias (Arya e Kulig, 2010) e as rupturas tendíneas (Geremia et al., 2015) causam redução da rigidez do tendão, o treinamento excêntrico proposto pode ser uma ferramenta eficiente no restabelecimento das propriedades mecânicas do tendão de Aquiles, ou para prevenir os processos que levam a estas condições. A redução da rigidez tendínea pode causar redução da produção de força muscular (Kubo et al., 2001; Maganaris, 2003; Kay e Blazeovich, 2009), além de acarretar em redução da taxa de produção de força muscular (Bojsen-Møller et al., 2005). O atraso na transferência de força pode afetar o equilíbrio e a estabilidade corporal, reduzindo o tempo de reação e aumentando o risco de quedas (Waugh et al., 2014). No entanto, a sobrecarga excessiva durante o treinamento pode contribuir para o desenvolvimento de tendinopatias (Bohm et al., 2015). Embora nossos achados indiquem que o treinamento excêntrico isocinético máximo é uma alternativa eficiente para aumentar a rigidez do tendão de Aquiles em indivíduos saudáveis, é necessário cuidado ao inserir este ou outros treinamentos de força de alta intensidade para programas de reabilitação de tendinopatias ou de rupturas agudas do tendão de Aquiles.

Poucos estudos analisaram os efeitos a longo prazo (mais de 12 semanas) de sobrecarga mecânica nas propriedades morfológicas e mecânicas tendíneas. Kubo et al. (2003) e Hansen et al. (2003) não encontraram diferenças significativas na AST e rigidez tendínea após 24 semanas de treinamento de força e 34 semanas de corrida, respectivamente. A baixa intensidade de exercício utilizada nestes estudos pode explicar a ausência de adaptações tendíneas. Portanto, as adaptações das propriedades morfológicas e mecânicas tendíneas a períodos mais longos (mais de 12 semanas) de treinamento de alta intensidade necessita ser estabelecida.

Em resumo, o presente estudo avaliou a magnitude e a cronologia da adaptação tendínea causadas por um programa de 12 semanas de treinamento isocinético excêntrico do tríceps sural. A rigidez aumentou nas primeiras quatro semanas devido à alterações nas propriedades materiais do tendão. A hipertrofia tendínea ocorreu após oito semanas de treinamento, e também contribuiu para o aumento da rigidez do tendão de Aquiles.

## CONCLUSÕES DA TESE

A revisão da literatura teve seu principal foco nas adaptações induzidas pelo treinamento excêntrico nas propriedades neuromecânicas e morfológicas dos flexores plantares, bem como nas propriedades mecânicas do tendão de Aquiles. Muitos resultados conflitantes foram encontrados, sendo raros os consensos quanto à adaptação muscular, neural e tendínea geradas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares. Grande parte destes conflitos está relacionada com diferenças nos programas de treinamento. Além disso, lacunas importantes foram identificadas quanto à cronologia das adaptações geradas pelo treinamento excêntrico nos músculos flexores plantares e no tendão de Aquiles.

O programa de treinamento excêntrico proposto parece causar adaptações específicas na produção de força, na ativação neural, na massa muscular e na rigidez do tendão de Aquiles. O aumento da produção de força isométrica e excêntrica pode ser explicado pela soma dos incrementos de ativação, massa muscular e rigidez tendínea. Embora a produção de força concêntrica tenha aumentado, esta resposta parece não ser atribuída às adaptações neurais. Além disso, o treinamento alterou o ângulo ótimo de produção de força excêntrica e concêntrica, deslocando o mesmo para maiores comprimentos musculares.

Além de apresentar as adaptações neuromusculares e mecânicas dos flexores plantares, o presente estudo também buscou identificar a cronologia destas adaptações. A produção de força máxima (isométrica, excêntrica e concêntrica) e a massa muscular apresentaram cronologias semelhantes, uma vez que os aumentos destas variáveis ocorreram até a oitava semana de treinamento e se mantiveram constantes até o final do treinamento. O aumento da ativação muscular durante contrações isométricas e excêntricas máximas ocorreu nas primeiras quatro semanas de treinamento e se manteve constante até o final do treinamento. A rigidez do tendão de Aquiles aumentou até a oitava semana de treinamento, sendo que as propriedades materiais foram as principais responsáveis por este aumento nas primeiras semanas, enquanto que a contribuição da hipertrofia tendínea ocorreu em fases mais avançadas do treinamento. Assim, quando tomados em conjunto, estes resultados nos possibilitam entender de que forma as adaptações neuromecânicas e morfológicas dos flexores plantares ocorrem. O aumento da força isométrica e excêntrica nas primeiras quatro semanas de treinamento parece ocorrer devido às adaptações neurais, musculares e tendíneas. No entanto, após maiores períodos de treinamento (i.e. acima de quatro semanas), o aumento da força ocorre devido a incrementos na massa muscular e na rigidez tendínea. Além disso, a ausência de adaptações neurais evidencia que os ganhos de força concêntrica podem estar relacionados apenas com adaptações musculares e tendíneas.

O exercício excêntrico tem sido muito utilizado como parte de programas de prevenção e reabilitação de lesões musculoesqueléticas. Além disso, o exercício excêntrico pode minimizar os efeitos deletérios do uso reduzido (imobilização, repouso em leito) e do envelhecimento. No entanto, os estudos experimentais desenvolvidos nesta tese foram realizados com indivíduos saudáveis e que não realizavam treinamentos específicos para membros inferiores. Sendo assim, é necessário cuidado ao inserir o treinamento proposto em programas de reabilitação ou para populações especiais (idosos, acamados e etc.). Além disso, o treinamento foi realizado em condições isocinéticas, as quais podem não estar presentes durante a prática de profissionais da saúde. Assim, temos ciência de que programas de treinamento excêntrico desenvolvidos em condições isoinerciais poderiam gerar informações mais aplicáveis à prática diária de fisioterapeutas e profissionais de educação física. Assim, podemos considerar que os estudos desenvolvidos na presente tese possuem um caráter mais básico, voltados à compressão de mecanismos que conduzem aos benefícios almejados pelos profissionais da saúde. No entanto, isto não impede que o programa de treinamento proposto seja utilizado em centros de prevenção/reabilitação, bem como em clubes esportivos que busquem aumentar/melhorar a condição de saúde de pessoas saudáveis.

Por fim, conclui-se que as contrações excêntricas, quando utilizadas de forma sistematizada (i.e. treinamento), podem promover adaptações específicas na ativação neural e na estrutura dos flexores plantares, assim como nas propriedades mecânicas do tendão de Aquiles, o que gera aumento da produção de força muscular. Tais adaptações podem exercer um papel fundamental na funcionalidade do indivíduo. Pessoas que sofreram lesões musculoesqueléticas (e.g. rupturas do tendão de Aquiles), ou passaram por períodos redução de uso (imobilização ou repouso em leito), bem como idosos, podem se beneficiar das adaptações causadas pelo treinamento excêntrico. Assim, a definição de protocolos de treinamento mais eficientes e efetivos devem ser desenvolvidos de acordo com a necessidade dos indivíduos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abellaneda S, Guissard N, Duchateau J. The relative lengthening of the myotendinous structures in the medial gastrocnemius during passive stretching differs among individuals. **Journal of Applied Physiology**.v.106, p.169-177, 2009.

Addison O, Marcus RL, LaStayo PC, Ryan AS. Intermuscular fat: A review of the consequences and causes. **International Journal of Endocrinology**. v.2014, p.1-11, 2014.

Albert M. Treinamento excêntrico em esportes e reabilitação. Segunda edição, *Manole*, 2002.

Alfredson H, Pietila T, Jonsson P, Lorentzon R. Heavy-load eccentric calf muscle training for the treatment of chronic Achilles tendinosis. **American Journal of Sports Medicine**. v.26(3), p.360-366, 1998.

Arampatzis A, Karamanidis K, Albracht K. Adaptational responses of the human Achilles tendon by modulation of the applied cyclic strain magnitude. **Journal of Experimental Biology**. v.210, p. 2743-2753, 2007.

Arampatzis A, Peper A, Bierbaum S, Albracht K. Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain. **Journal of Biomechanics**. v.43(16), p.3073-79, 2010.

Arya S, Kulig K. Tendinopathy alters mechanical and material properties of the Achilles tendon. **Journal of Applied Physiology**. v.108, p.670-675, 2010.

Baroni BM, Geremia JM, Rodrigues R, Franke RA, Karamanidis K, Vaz MA. Muscle architecture adaptations to knee extensor eccentric training: rectus femoris vs. vastus lateralis. **Muscle & Nerve**. v.48, p.498-506, 2013b.

Baroni BM, Pinto RS, Herzog W, Vaz MA. Eccentric resistance training of the knee extensor muscle: Training programs and neuromuscular adaptations. **Isokinetics and Exercise Science**. v.23, p.183-198, 2015.

Baroni BM, Rodrigues R, Franke RA, Geremia JM, Rassier DE, Vaz MA. Time course of neuromuscular adaptations to knee extensor eccentric training. **International Journal of Sports Medicine**. v.34, p.904-911, 2013a.

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**. v.2, p.62-69, 2003.

Blazevich AJ. Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. **Sports Medicine**. v.36(12), p.1003-1017, 2006.

Blazevich AJ, Cannavan D, Coleman DR, Horne S. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. **Journal of Applied Physiology**. v.103(5), p.1565-1575, 2007.

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**. v.38(3), p.1133-1146, 2008.

Blazevich AJ, Sharp NC. Understanding muscle architectural adaptation: macro- and micro-level research. **Cells, Tissues, Organs**. v.181(1), p.1-10, 2005.

Bojsen-Møller 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. **Journal of Applied Physiology**. v.99(3), p.986-994, 2005.

Bohm S, Mersmann F, Arampatzis A. Human tendon adaptation in response to mechanical loading: a systematic review and meta-analysis of exercise intervention studies on healthy adults. **Sports Medicine - Open**. v.1:7, 2015.

Bohm S, Mersmann F, Tettke M, Kraft M, Arampatzis A. Human Achilles tendon plasticity in response to cyclic strain: effect of rate and duration. **Journal of Experimental Biology**. v.217, p.4010-4017, 2014.

Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.33(5), p.783-790, 2001.

Brughelli M, Cronin J. Altering the length-tension relationship with eccentric exercise: implications for performance and injury. **Sports Medicine**. v.37(9), p.807-826, 2007.

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. **Physical Therapy in Sport**. v.11(2), p.50-55, 2010.

Butterfield TA, Leonard TR, Herzog W. Differential serial sarcomere number adaptations in knee extensor muscles of rats is contraction type dependent. **Journal of Applied Physiology**. v.99, p.1352-1358, 2005.

Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: theoretical and applied implications. **Sports Medicine**. v.34(1), p.49-69, 2004.

Couppé C, Svensson RB, Silbernagel KG, Langberg H, Magnusson SP. Eccentric or concentric exercises for the treatment of tendinopathies? **Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy**. v. 45(11), p. 853-863, 2015.

Doral MN, Alam M, Bozkurt M, Turhan E, Atay AO, Gönmez G, Maffulli N. Functional anatomy of the Achilles tendon. **Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy**. v.18, p.638-643, 2010.

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**. v.39(6), p.819-827, 2009.

Elias LJ, Bryden MP, Bulman-Fleming MB. Footedness is a better predictor than is handedness of emotional lateralization. **Neuropsychologia**. v.36(1), p.37-43, 1998.

Engsberg JR, Ross SA, Collins DR. Increasing ankle strength to improve gait and function in children with cerebral palsy: a pilot study. **Pediatric Physical Therapy**. v.18, p.266-275, 2006.

Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. G\*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. **Behavior Research Methods**. v.39(2), p.175-191, 2007.

Folland FP, Williams AG. The adaptations to strength training. Morphological and neurological contributions to increased strength. **Sports Medicine**. v.37(2), p.145-168, 2007.

Fouré A, Nordez A, Christophe Cornu. Effects of eccentric training on mechanical properties of the plantar flexor muscle-tendon complex. **Journal of Applied Physiology**. v.114, p.523-537, 2013.

Fouré A, Nordez A, McNair P, Cornu C. Effects of plyometric training on both active and passive parts of the plantarflexors series elastic component stiffness of muscle-tendon complex. **European Journal of Applied Physiology**. v.111, p.539-548, 2011.

Fox J, Docherty CL, Schrader J, Applegate T. Eccentric plantar-flexor torque deficits in participants with functional ankle instability. **Journal of Athletic Training**. v.43(1), p.51-54, 2008.

Fração VB, Vaz MA. Influência da adaptação funcional na capacidade de produção de força no músculo esquelético. **Revista Perfil**. v.4, p.103-110, 2000.

Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. **Sports Medicine**. v.34(10), p.663-679, 2004.

Fukunaga T, Kawakami Y, Kuno S, Funato K, Fukashiro S. Muscle architecture and function in humans. **Journal of Biomechanics**. v.30(5), p.457-463, 1997.

Gabriel DA, Kamen G, Frost G. Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices. **Sports Medicine**. v.36(2), p.133-149, 2006.

Geremia JM, Bobbert MF, Casa Nova M, Ott RD, Lemos FA, Lupion RO, Frasson VB, Vaz MA. The structural and mechanical properties of the Achilles tendon 2 years after surgical repair. **Clinical Biomechanics**. v. 30(5), p.485-492, 2015.

Gomes ARS, Campos TF, Beckenkamp R, Diong J, Clarke E, Clarke JL, Herbert RD. Effects of isokinetic eccentric training on the human Achilles tendon. **Journal of Exercise Physiology**. v.19(2), p.46-54, 2016.

Goode AP, Reiman MP, Harris L, DeLisa L, Kauffman A, Beltramo D, Poole C, Ledbetter L, Taylor AB. Eccentric training for prevention of hamstring injuries may depend on intervention compliance: a systematic review and meta-analysis. **British Journal of Sports Medicine**. v.49, p.349-356, 2015.

Gravel D, Richards CL, Filion M. Angle dependency in strength measurements of the ankle plantar flexors. **Eur J Appl Physiol**. v.61, p.182-187, 1990.

Hansen P, Aagaard P, Kjaer M, Larsson B, Magnusson SP. Effect of habitual running on human Achilles tendon load-deformation properties and cross-sectional area. **Journal of Applied Physiology**. v.95(6), p.2375-2380, 2003.

Harris CA, Peduto AJ. Achilles tendon imaging. **Australasian Radiology**. v.50, 513-525, 2006.

Herzog W. Mechanisms of enhanced force production in lengthening (eccentric) muscle contractions. **Journal of Applied Physiology**. v.116(11), p.1407-1417, 2014.

Herzog W, Guimarães AC, Anton MG, Carter-Erdman KA. Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.23, p.1289-1296, 1991.

Herzog W, Powers K, Johnston K, Duvall M. A new paradigm for muscle contraction. **Frontiers in Physiology**. v.6:174, 2015.

Higbie EJ, Cureton KJ, Warren GL, III, Prior BM. Effects of concentric and eccentric training on muscle strength, cross-sectional area, and neural activation. **Journal of Applied Physiology**. v.81(5), p.2173-2181, 1996.

Hortobágyi T, Barrier J, Beard D, Braspeninx J, Koens P, Devita P, Dempsey L, Lambert J. Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. **Journal of Applied Physiology**. v.81(4), p.1677-1682, 1996b.

Hortobágyi T, Hill JP, Houmard JA, Fraser DD, Lambert NJ, Israel RG. Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. **Journal of Applied Physiology**. v.80(3), p.765-772, 1996a.

Houghton LA, Dawson BT, Rubenson J. Effects of plyometric training on Achilles tendon properties and shuttle running during a simulated cricket batting innings. **Journal of Strength and Conditioning Research**. v.27(4), p.1036-1046, 2013.

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. **Journal of Strength and Conditioning Research**. v.12(3), p.192-198, 1998.

Huttunen TT, Kannus P, Rolf C, Felländer-Tsai L, Mattila VM. Acute Achilles tendon ruptures: incidence of injury and surgery in Sweden between 2001 and 2012. **American Journal of Sports Medicine**. v.42(10), p.2419-2423, 2014.

Jan MH, Chai HM, Lin YF, Lin JCH, Tsai LY, Ou YC, Lin DH. Effects of age and sex on the results of an ankle plantar-flexor manual muscle test. **Physical Therapy**. v.85(10), p.1078-1084, 2005.

Järvinen TAH, Kannus P, Maffulli N, Khan KM. Achilles tendon disorders: etiology and epidemiology. **Foot and Ankle Clinics**. v.10, p.255-266, 2005.

Jung JW, Her JG, Ko J. Effect of strength training of ankle plantarflexors on selective voluntary motor control, gait parameters, and gross motor function of children with cerebral palsy. **Journal of Physical Therapy Science**. v.25, p.1259-1263, 2013.

Kannus P, Józsa L, Natri A, Järvinen M. Effects of training, immobilization and remobilization on tendons. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**. v.7, p.67-71, 1997.

Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T. Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. **Journal of Applied Physiology**. v.74(6), p.2740-2744, 1993.

Kawakami Y, Ichinose Y, Fukunaga T. Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. **Journal of Applied Physiology**. v.85, p.398-404, 1998.

Kay AD, Blazeovich AJ. Moderate-duration static stretch reduces active and passive plantar flexor moment but not Achilles tendon stiffness or active muscle length. **Journal of Applied Physiology**. v.106(4), p.1249-1256, 2009.

Kay AD, Richmond D, Talbot C, Mina M, Baross AW, Blazeovich AJ. Stretching of active muscle elicits chronic changes in multiple strain risk factors. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.48(7), p.1388-1396, 2016.

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**. v.41(6), p.e3, 2007.

Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.36(4), p.674-688, 2004.

Kubo K, Ikebukuro T, Maki A, Yata H, Tsunoda N. Time course of changes in the human Achilles tendon properties and metabolism during training and detraining in vivo. **European Journal of Applied Physiology**. v.112, p.2679-2691, 2012.

Kubo K, Ikebukuro T, Yata H, Tsunoda N, Kanehisa H. Time course of changes in muscle and tendon properties during strength training and detraining. **Journal of Strength and Conditioning Research**. v.24, p.322-331, 2010.

Kubo K, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T. Influences of repetitive muscle contractions with different modes on tendon elasticity in vivo. **Journal of Applied Physiology**. v.91, p.277-282, 2001.

Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**. v.33(1), p.159-174, 1977.

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 teninosis. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**. v.17(1), p.61-66, 2007.

Lantto I, Heikkinen J, Flinkkilä T, Ohtonen P, Leppilahti J. Epidemiology of Achilles tendon ruptures: increasing incidence over a 33-year period. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**. v.25(1), p.e133-138, 2015.

Lieber RL, Fridén J. Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. **Muscle & Nerve**. v.23(11), p.1647-1666, 2000.

Lynn R, Talbot JA, Morgan DL. Differences in rat skeletal muscles after incline and decline running. **Journal of Applied Physiology**. v.85, p.98-104, 1998.

Mademli L, Arampatzis A, Morey-Klapsing G, Brüggemann GP. Effect of ankle joint position and electrode placement on the estimation of the antagonistic moment during maximal plantarflexion. **Journal of Electromyography and Kinesiology**. v.14, p.591-597, 2004.

Mademli L, Arampatzis A. Behaviour of the human gastrocnemius muscle architecture during submaximal isometric fatigue. **European Journal of Applied Physiology**. v.94, p.611-617, 2005.

Maffulli N. Rupture of the Achilles tendon. **The Journal of Bone and Joint Surgery**. v.81A, p.1019-1036, 1999.

Maffulli N, Almekinders LC. The Achilles Tendon. First Edition, *Springer*, 2007.

Maffulli N, Sharma P, Luscombe KL. Achilles tendinopathy: aetiology and management. **Journal of the Royal Society of Medicine**. v.97, p.472-476, 2004.

Maffulli N, Walley G, Sayana MK, Longo UG, Denaro V. Eccentric calf muscle training in athletic patients with Achilles tendinopathy. **Disability and Rehabilitation**. v.30(20-22), p.1677-1684, 2008.

Mafi N, Lorentzon R, Alfredson H. Superior short-term results with eccentric calf muscle training compared to concentric training in a randomized prospective multicenter study on patients with chronic Achilles tendinosis. **Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy**. v.9(1), p.42-47, 2001.

Maganaris CN. Force-length characteristics of the in vivo human gastrocnemius muscle. **Clinical Anatomy**. v.16, p.215-223, 2003.

Maganaris CN, Narici MV, Reeves ND. In vivo human tendon mechanical properties: effect of resistance training in old age. **Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions**. v.4(2), p.204-208, 2004.

Maganaris N, Narici MV, Maffulli N. Biomechanics of the Achilles tendon. **Disability and Rehabilitation**. v.30, p.1542-1547, 2008.

Magnusson SP, Hansen P, Aagaard P, Brønd J, Dyhre-Poulsen P, Bojsen-Møller J, Kjaer M. Differential strain patterns of the human gastrocnemius aponeurosis and free tendon, in vivo. **Acta Physiologica Scandinavica**. v.177, p.185-95, 2003.

Magnusson SP, Langberg H, Kjaer M. The pathogenesis of tendinopathy: balancing the response to loading. **Nature Reviews: Rheumatology**. v.6, p.262-68, 2010.

Magnusson SP, Narici MV, Maganaris CN, Kjaer M. Human tendon behaviour and adaptation, in vivo. **Journal of Physiology**. v.568(1), p.71-81, 2008.

Magnusson SP, Aagaard P, Dyhre-Poulsen P, Kjaer M. Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis in vivo. **Journal of Physiology**. v.531.1, p.277-288, 2001.

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. **Medicine and Science in Sports and Exercise.** v.40(1), p.117-123, 2008.

Malliaras P, Kamal B, Nowell A, Farley T, Dhamu H, Simpson V. Patellar tendon adaptation in relation to load-intensity and contraction type. **Journal of Biomechanics.** v.46, p.1893-1899, 2013.

Manal K, Cowder JD, Buchanan TS. A hybrid method for computing Achilles tendon moment arm using ultrasound and motion analysis. **Journal of Applied Biomechanics.** v.26(2), p.224-228, 2010.

Meyer DC, Hoppeler H, Brigitte VR, Gerber C. A pathomechanical concept explains muscle loss and fatty muscular changes following surgical tendon release. **Journal of Orthopaedic Research.** v.22, p.1004-1007, 2004.

Mizuno T, Matsumoto M, Umemura Y. Viscoelasticity of the muscle-tendon unit is returned more rapidly than range of motion after stretching. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports.** v.xx, p.1-8, 2011.

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. **European Journal of Applied Physiology.** v.112(4), p.1587-1592, 2012.

Moritani T, deVries HA. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. **American Journal of Physical Medicine.** v.58, p.115-130, 1979.

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.** v.25(3), p.238-247, 2011.

Morse CI, Degens H, Seynnes OR, Maganaris CN, Jones DA. The acute effect of stretching on the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle-tendon unit. **Journal of Physiology.** v.586, p.97-106, 2008.

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.** v.8, p.161-167, 2000.

Mulder ER, Horstman AM, Stegeman DF, de Haan A, Belavy DL, Miokovic T, Armbrrecht G, Felsenberg D, Gerrits KH. Influence of vibration resistance training on knee extensor and plantar flexor size, strength, and contractile speed characteristics after 60 day of bed rest. **Journal of Applied Physiology**. v.107(6), p.1789-1798, 2009.

Muramatsu T, Muraoka T, Takeshita D, Kawakami Y, Hirano Y, Fukunaga T. Mechanical properties of tendon and aponeurosis of human gastrocnemius muscle in vivo. **Journal of Applied Physiology**. v.90, p.1671-1678, 2001.

Nadeau S, Gravel D, Arsenaault AB, Bourbonnais D. Plantarflexor weakness as a limiting factor of gait speed in stroke subjects and the compensating role of hip flexors. **Clinical Biomechanics**. v.14, p.125-135, 1999.

Nakamura M, Ikezoe T, Takeno Y, Ichihashi N. Acute and prolonged effect of static stretching on the passive stiffness of the human gastrocnemius muscle-tendon unit in vivo. **Journal of Orthopaedic Research**. v.29(11), p.1759-1763, 2011.

Narici MV. Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive imaging techniques: functional significance and applications. **Journal of Electromyography and Kinesiology**. v.9(2), p. 97-103, 1999.

Narici MV, Cerretelli P. Changes in human muscle architecture in disuse-atrophy evaluated by ultrasound imaging. **Journal of Gravitational Physiology**. v.5(1), p.73-74, 1998.

Narici MV, Roi GS, Landoni L, Minetti A, Cerretelli P. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**. v.59, p.310-319, 1989.

Neptune RR, Sasaki K. Ankle plantar flexor force production is an important determinant of the preferred walk-to-run transition speed. **The Journal of Experimental Biology**. v.208, p.199-808, 2005.

Nigg BM, Herzog W. Biomechanics of the musculo-skeletal system. *John Wiley & Sons*: Toronto, 1999.

Norrbrand L, Fluckey JD, Pozzo M, Tesch PA. Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. **European Journal of Applied Physiology**. v.102(3), p.271-281, 2008.

Peñailillo L, Blazevich AJ, Numazawa H, Nosaka K. Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.45(9), p.1773-1781, 2013.

Pensini M, Martin A, Maffiuletti NA. Central versus peripheral adaptations following eccentric resistance training. **International Journal of Sports Medicine**. v.23(8), p.567-574, 2002.

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. **American Journal of Sports Medicine**. v.39(11), p.2296-2303, 2011.

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. **Revista Brasileira de Fisioterapia**. v.12(4), p.331-337, 2008.

Proske U, Morgan DL. Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. **Journal of Physiology**. v.537, p.333-345, 2001.

Raj IS, Bird SR, Westfold BA, Shield AJ. Effects of eccentrically biased versus conventional weight training in older adults. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.(44), p.1167-1176, 2012.

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. **International Journal of Sports Medicine**. v.26(5), p.339-343, 2005.

Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. **Experimental Physiology**. v.94(7), p.825-833, 2009.

Reeves ND, Maganaris CN, Narici MV. Effect of strength training on human patella tendon mechanical properties of older individuals. **Journal of Physiology**. v.548(pt 3), p.971-981, 2003.

Rhea MR. Determining the magnitude of treatment effects in strength training research through the use of the effect size. **Journal of Strength and Conditioning Research**. v.18(4), p.918-920, 2004.

Richards PJ, Dheer AK, Mccall IM. Achilles Tendon (AT) size and power Doppler ultrasound (PD) changes compared to MRI: a preliminary observational study. **Clinical Radiology**. v.56, p.843-850, 2001.

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**. v.19(3), p.221-226, 2011.

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**. v.43(8), p.556-568, 2009.

Rompe JD, Furia J, Maffulli N. Eccentric loading versus eccentric loading plus shock-wave treatment for midportion Achilles tendinopathy. A randomized controlled trial. **American Journal of Sports Medicine**. v.37(3), p.463-470, 2009.

Rosager S, Aagaard P, Dyhre-Poulsen P, Neergaard K, Kjaer M, Magnusson SP. Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis and tendon in runners and non-runners. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**. v. 12(2), p,90-98, 2002.

Santos HH, Avila MA, Hanashiro DN, Camargo PR, Salvini TF. The effects of knee extensor eccentric training on functional tests in healthy subjects. **Revista Brasileira de Fisioterapia**. v.14(4), p.276-283, 2010.

Schappacher-Tilp G, Leonard T, Desch G, Herzog W. A novel three-filament model of force generation in eccentric contraction of skeletal muscles. **PLoS One**. v. 10(3):e0117634, 2015.

Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. **Journal of Strength and Conditioning Research**. v.24(10), p.2857-2872, 2010.

Schroeder ET, Hawkins SA, Jaque SV. Musculoskeletal adaptations to 16 weeks of eccentric progressive resistance training in young women. **Journal of Strength and Conditioning Research**. v.18(2), p.227-235, 2004.

Seger JY, Arvidsson B, Thorstensson A. Specific effects of eccentric and concentric training on muscle strength and morphology in humans. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**. v.79(1), p.49-57, 1998.

Seger JY, Thorstensson A. Effects of eccentric versus concentric training on thigh muscle strength and EMG. **International Journal of Sports Medicine**. v.26(1), p.45-52, 2005.

SENIAM. *Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles*. [2014]. Disponível em: <<http://www.seniam.org/>>. Acesso em 10/02/2014.

Seynnes OR, Erskine RM, Maganaris CN, Longo S, Simoneau EM, Grosset JF, Narici MV. Training-induced changes in structural and mechanical properties of the patellar tendon are related to muscle hypertrophy but no to strength gains. **Journal of Applied Physiology**. v.107, p.523-530, 2009.

Sharma P, Maffulli N. Tendon injury and tendinopathy: healing and repair. **The Journal of Bone and Joint Surgery**. v.87, p.187-202, 2005.

Simoneau E, Martin A, Van Hoecke J. Muscular performances at the ankle joint in young and elderly men. **Journal of Gerontology Series A, Biological Sciences and Medical Sciences**. v.60(4), p.439-447, 2005.

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**. v.60(6), p.777-781, 2005.

Timmins RG, Ruddy JD, Presland J, Maniar N, Shield AJ, Williams MD, Opar DA. Architectural changes of the biceps femoris long head after concentric or eccentric training. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.48(3), p.499-508, 2016.

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**. v.14(1), p.31-36, 1991.

Urlando A, Hawkins D. Achilles tendon adaptation during strength training in young adults. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.39, p.1147-1152, 2007.

Walker S, Blazevich AJ, Haff GG, Tufano JJ, Newton RU, Häkkinen K. Greater strength gains after training with accentuated eccentric than traditional isoinertial loads in already strength-trained men. **Frontiers in Physiology**. v.7:149.

Waugh CM, Blazevich AJ, Fath F, Korff T. Age-related changes in mechanical properties of the Achilles tendon. **Journal of Anatomy**. v.220(2), p.144-155, 2012.

Waugh CM, Korff T, Fath F, Blazevich AJ. Effects of resistance training on tendon mechanical properties and rapid force production in prepubertal children. **Journal of Applied Physiology**. v.117, p.257-266, 2014.

Wellisch M, Hamer P, Hopper L, Bulsara M, Debenham J. Eccentric loading increases peak torque angle of the ankle plantar flexors in healthy volunteers. **International Journal of Sports and Exercise Medicine**. v.1:2.

Wernbom M, Augustsson J, Thomeé R. The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. **Sports Medicine**. v.37(3), p.225-264, 2007.

Wiesinger HP, Kösters A, Müller E, Seynnes OR. Effects of increased loading on in vivo tendon properties: A systematic review. **Medicine and Science in Sports and Exercise**. v.47(9), p.1885-1895, 2015.

Wren TAL, Yerby SA, Beaupré GS, Carter DR. Mechanical properties of the human Achilles tendon. **Clinical Biomechanics**. v.16, p.245-251, 2001.

Zatsiorsky VM, Kraemer WJ. Science and practice of strength training. Second Edition, *Springer*, 2006.

Zhao H, Ren Y, Wu YN, Liu SQ, Zhang LQ. Ultrasonic evaluations of Achilles tendon mechanical properties poststroke. **Journal of Applied Physiology**. v.106(3), p.843-849, 2009.