UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO MOVIMENTO HUMANO

MESTRADO E DOUTORADO

INFLUÊNCIA DO TREINAMENTO EXCÊNTRICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DOS MÚSCULOS EXTENSORES DO JOELHO

CLARICE SPEROTTO DOS SANTOS ROCHA

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCO AURÉLIO VAZ

INFLUÊNCIA DO TREINAMENTO EXCÊNTRICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELÉTRICAS DOS MÚSCULOS EXTENSORES DO JOELHO

Dissertação apresentada à Escola de Educação Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências do Movimento Humano.

Porto Alegre, outubro de 2004

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 3
LISTA DE FIGURAS 5
LISTA DE ABREVIAÇÕES 7
RESUMO 8
ABSTRACT 10
1. INTRODUÇÃO 12
2. REVISÃO DE LITERATURA 15
2.1. Princípios do Treinamento Desportivo 16
2.2. Adaptação Funcional do Sistema Músculo-esquelético ao Treinamento .. 20
2.3. Efeitos Agudos e Crônicos do Treinamento Excêntrico no Sistema Músculo-esquelético 21
2.4. Evidências de Adaptação Funcional em Estudos com Animais 23
2.5. Evidências de Adaptação Funcional em Estudos com Seres Humanos.... 25
2.6. Adaptações Neurais Decorrentes do Treinamento 31
3. OBJETIVOS 37
3.1. Objetivo Geral 37
3.2. Objetivos Específicos 37
4. HIPÓTESES 38
4.1. Relação Torque-Velocidade 38
4.2. Relação Torque-Ângulo 39
4.3. Ativação Muscular 41
5. METODOLOGIA 42
5.1. Caracterização da Pesquisa 42
5.2. Amostra 42
5.3. Procedimentos 43
5.3.1. Medida do Torque Articular 44
5.3.2. Protocolo das Avaliações 45
5.3.3. Eletromiografia 47
5.4. Protocolo do treinamento excêntrico 48

5.5. Análise de Dados 50
5.5.1 Relação Torque-Velocidade 50
5.5.2 Relação Torque-Ângulo 51
5.5.3 Eletromiografia 52
5.6. Análise Estatística 54
6. RESULTADOS 56
6.1. Relação Torque-Velocidade 56
6.2. Relação Torque-Ângulo 60
6.3. EMG - Relação Torque-Velocidade 66
6.4. EMG - Relação Torque-Ângulo 66
7. DISCUSSÃO 70
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS 81
9. CONCLUSÃO 82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83
ANEXO 1 92
ANEXO 2 97
ANEXO 3 100

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho:

- Ao orientador Prof. Dr. Marco Aurélio Vaz pela oportunidade e confiança.

- Ao Prof. Dr. Milton Antônio Zaro, por ter me incentivado na área da pesquisa e pelas grandes contribuições em diversas partes do trabalho.

- À amiga e colega Prof. Ms. Cíntia de la Rocha Freitas pelo incansável apoio durante toda a realização do trabalho.

- À Prof. Ms. Viviane Fração pelas grandes contribuições em diferentes momentos.

- Aos professores membros da banca examinadora, em especial ao Prof. Dr. Antônio Carlos Stringhini Guimarães.

- À minha família, em especial aos meus pais e meus irmãos pela paciência e pelo constante apoio e incentivo.

- A uma pessoa muito especial, Paulo Cabral, pela grande paciência, atenção, e pelas incansáveis contribuições pessoais e profissionais.

- Aos colegas Érico Silveira, Ana Paula Karolczak, Feliciano Bastos, Fernanda Metzen, Aline Tamborindeguy e Fernando Diefentheler pela grande ajuda em diferentes partes do trabalho.

- Ao Prof. Ms. Flávio Castro, pela atenção dispensada e apoio durante a realização da pesquisa.

- À fisioterapeuta Letícia Santos pelas contribuições durante a análise dos dados.

- A todos que se disponibilizaram a participar como sujeitos da pesquisa.

- A todos os colegas do LAPEX, em especial aos colegas da sala 212.

- À Cíntia Fonseca pelo auxílio na busca de material bibliográfico.

- Ao Prof. Ms. Paulo André Poli de Figueiredo, Prof. Ms. Michel Brentano e Prof. Dr. Luis Fernando Kruel, pelas sugestões de alteração do protocolo de treinamento.

- Ao Prof. Eduardo Cadore pelas contribuições e pelo material disponibilizado.

- Ao Prof. Dr. Marcos Balbinotti, Prof. Ms. Marcelo Faria Silva e Prof. Gustavo Silva pelo auxílio nas análises estatísticas.

- À Prof. Ms. Miriam Wisniewski pela compreensão e apoio dispensados.

- Aos funcionários do LAPEX, em especial Luciano, Dani e Alex e aos funcionários do PPGCMH, André, Rosane e Ana.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Hipótese 3 e 4. Relação T-V do grupo experimental pré e pós-treino 39

FIGURA 2 - Hipótese 7. Relação T-A do grupo experimental pré e pós-treino. 40

FIGURA 3 - Relação torque-velocidade para valores absolutos de torque do grupo controle 58

FIGURA 4 - Relação torque-velocidade para valores absolutos de torque do grupo experimental 58

FIGURA 5 - Relação torque-velocidade para valores normalizados de torque do grupo controle 59

FIGURA 6 - Relação torque-velocidade para valores normalizados de torque do grupo experimental 59

FIGURA 7 - Relação torque-ângulo para valores absolutos de torque do grupo controle 62

FIGURA 8 - Relação torque-ângulo para valores absolutos de torque do grupo experimental 62

FIGURA 9 - Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo controle. Normalização pela CVM isométrica do primeiro dia de teste 63

FIGURA 10 - Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo experimental. Normalização pela CVM isométrica do primeiro dia de teste 63

FIGURA 11 - Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo controle. Normalização pelo torque do ângulo específico do primeiro dia de teste 64

FIGURA 12 - Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo experimental. Normalização pelo torque do ângulo específico do primeiro dia de teste 64

FIGURA 13 - Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo controle. Normalização pelo torque máximo do dia de teste 65
FIGURA 14 - Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo experimental. Normalização pelo torque máximo do dia de teste 65
FIGURA 15 - Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral no grupo controle 68
FIGURA 16 - Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral no grupo experimental 68
FIGURA 17 - Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste para músculo reto femoral no grupo controle 69
FIGURA 18 - Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste para músculo reto femoral no grupo experimental 69
FIGURA 19 - Relação força-velocidade de encurtamento do músculo 92
FIGURA 20 - Relação torque-velocidade concêntrica e excêntrica 93
FIGURA 21 - Relação força-comprimento do sarcômero 94
FIGURA 22 - Comparação da relação força-velocidade entre fibras curtas e longas 95
FIGURA 23 - Desenho esquemático de sarcômeros dentro de uma região da fibra muscular 96

LISTA DE ABREVIAÇÕES

CVM - contração voluntária máxima

EMG - eletromiografia

FFT - *Fast Fourier Transformation*

RMS - *Root Mean Square*

T-A - torque-ângulo

T-V - torque-velocidade

RESUMO

O exercício excêntrico tem sido preconizado como benéfico na prevenção de lesões musculares. Estudos com animais demonstraram que o treinamento excêntrico altera as propriedades mecânicas do músculo esquelético. No entanto, pouco se conhece sobre os efeitos do treinamento excêntrico nas propriedades mecânicas e elétricas em músculos de seres humanos. O objetivo desse estudo foi avaliar os efeitos de um treinamento excêntrico nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores de joelho, a partir das relações torque-velocidade (T-V) e torque-ângulo (T-A) e da técnica da eletromiografia (EMG). Nossa hipótese inicial era de que o treinamento excêntrico determinaria um deslocamento da relação T-V na direção de maiores velocidades angulares de movimento, assim como um deslocamento da relação T-A em direção a maiores ângulos articulares (ou maiores comprimentos musculares), sem que houvesse alteração na ativação elétrica dos músculos extensores de joelho. A amostra foi constituída por 21 indivíduos do sexo masculino (faixa etária 20-40 anos) divididos em um grupo experimental (n=10), e um grupo controle (n=11). Os indivíduos do grupo experimental foram submetidos a um programa de treinamento excêntrico dos músculos extensores do joelho com duração de 12 semanas, realizado na velocidade de -60º/s. Duas avaliações foram realizadas: antes e após o período de treinamento excêntrico. O torque dinâmico da musculatura extensora do joelho foi avaliado durante contrações voluntárias concêntricas e excêntricas máximas nas velocidades de -300º/s, -240º/s, -180º/s, -120º/s, -60º/s, 60º/s, 120º/s, 180º/s, 240º/s, 300º/s, 360º/s e 420º/s. O torque isométrico foi avaliado durante contrações voluntárias máximas nos ângulos de 7º, 15º, 30º, 45º, 60º, 75º, 90º e 103º.

Nos dias de teste, durante a realização de todas as contrações voluntárias máximas, sinais eletromiográficos foram coletados dos músculos reto femoral, vasto lateral e vasto medial. As médias dos valores de torque e dos valores RMS normalizados foram relacionadas com cada velocidade angular e com cada ângulo avaliados. Os resultados mostraram alterações na relação T-V, com um aumento significativo na velocidade de treino e na velocidade de -120º/s. Não foi verificado aumento do torque nas maiores velocidades concêntricas e excêntricas conforme era esperado. Na relação T-A houve um aumento dos valores de torque no ângulo de 90º, com alteração do ângulo ótimo de produção de torque no sentido de maiores ângulos articulares (ou maiores comprimentos do músculo). No entanto, não foi verificado deslocamento para a direita da relação T-A. A atividade elétrica sofreu alteração para os 3 músculos nas contrações dinâmicas e para os músculos reto femoral e vasto lateral nas contrações isométricas. Conclui-se que um período de treinamento excêntrico de 12 semanas altera as propriedades mecânicas dos músculos extensores do joelho de forma específica, com aumento do torque na velocidade angular de treinamento. O aumento da capacidade de produção de torque em maiores ângulos articulares ou maiores comprimentos musculares concorda com a idéia de aumento no número de sarcômeros em série na fibra muscular após treinamento excêntrico conforme demonstrado em estudos com animais. As alterações encontradas se manifestam em ambas as relações T-V e T-A e estão relacionadas tanto com adaptação neural quanto com adaptações nas estruturas intrínsecas musculares.

Palavras-chave: treinamento excêntrico; relação torque-ângulo; relação torque-velocidade; eletromiografia, adaptação funcional.

ABSTRACT

The eccentric exercise has conferred benefits that commend it to prevent muscle damages. Studies carried out with animals have shown that the eccentric exercise alters the mechanical properties of the skeletal muscle. Nevertheless, very few is known about the effects the eccentric training may produce by making use of mechanical and electrical properties on the muscles of humans. The purpose of this study is to evaluate the effects caused by an eccentric training on the mechanical and electrical properties of knee extensors muscles, taking into account the torque-velocity and torque-angle relationships and the electromyography technique. Our starting hypothesis refers to the fact that the eccentric training would determine a shift of torque-velocity relationship towards greater angular velocities of movement, as well as a shift of torque-angle relationship towards larger joint angles (or longer muscle lengths), without any alteration occurring to the electrical activity of the knee extensors muscles. The sample was formed by 21 male individuals (age group 20-40 years old), divided into an experimental group (n=10), and a control group (n=11). The individuals in the experimental group were submitted for an eccentric training of the knee extensors muscles during 12 weeks, at a speed of -60º/s. Two evaluations were accomplished: before and after the eccentric training period. The dynamic torque of the knee extensors muscles was evaluated during maximum concentric and eccentric voluntary contractions at the angular velocities of -300º/s, -240º/s, -180º/s, -120º/s, -60º/s, 60º/s, 120º/s, 180º/s, 240º/s, 300º/s, 360º/s, and 420º/s. The isometric torque was evaluated during the maximal voluntary contractions at knee joint angles of 7º, 15º, 30º, 45º, 60º, 75º, 90º, and 103º. On the days the tests were carried out, during the time all maximal voluntary

contractions were performed, electromyographic signals were collected from rectus femoris, vastus lateralis, and vastus medialis muscles. The mean normalized torque and RMS values were related to every angular velocity and to every evaluated joint angle. Results showed alterations to the torque-velocity relationship, with a significant increase of torque at the training velocity and velocity of -120º/s. No increase was observed to the torque at the greater concentric and eccentric velocities as expected. At the torque-angle relationship there was an increase of torque values at angles of 90º, with alteration of optimum joint angle for torque generation towards larger joint angles (or longer muscle lengths). However no rightward shift of the torque-angle relationship was detected. The electrical activity undergoes significant alteration for the 3 muscles during dynamic contractions and for rectus femoris and vastus lateralis muscles during isometric contraction. Our conclusion is that a 12-week period of eccentric training alters in a specific way the mechanical properties of the knee extensors muscles, leading to an increase of the torque at the training angular velocity. An increase of the torque production capacity in larger joint angles or in lengthier muscles correspond to the idea of an increase to the serial sarcomeres number in the muscle fiber after an eccentric training, as studies with animals have shown. Alterations found are demonstrated in both torque-velocity and torque-angle relationships. They have relation with neural adaptation and with muscle intrinsic adaptation.

Key words: eccentric training; torque-velocity relationship; torque-angle relationship; functional adaptation.

1. INTRODUÇÃO

O exercício excêntrico vem sendo utilizado nas últimas décadas como uma das ferramentas que possibilita uma rápida recuperação do sistema músculo-esquelético de um indivíduo durante um programa de reabilitação (ALBERT, 2002). Além do fortalecimento das estruturas não contráteis como ligamentos, cápsula articular e tendões, as evidências da literatura apontam para uma adaptação neuromuscular que pode auxiliar na prevenção de lesões (FYFE e STANISH, 1992; PADDON-JONES e ABERNETHY, 2001).

As alterações do sistema músculo-esquelético decorrentes do exercício excêntrico têm sido alvo de um grande número de estudos (KOMI e BUSKIRK, 1972; LIEBER e FRIDÉN, 1988; LYNN e MORGAN, 1994; SMITH e RUTHERFORD, 1995; HORTOBÁGYI et al., 1996; JONES et al., 1997; KOH e HERZOG, 1998; PADDON-JONES e ABERNETHY, 2001; BARASH et al., 2002; FAHLSTRÖM et al., 2003; BUTTERFILED e HERZOG, 2003 e 2004); entretanto os mecanismos responsáveis por essas adaptações são pouco conhecidos (McHUGH, 2003). Diferentes explicações podem ser encontradas para o efeito protetor oriundo dos exercícios excêntricos. Segundo ALBERT (2002), esse efeito está relacionado com um fortalecimento importante ao nível de estruturas não-contráteis (estruturas mais lesadas pelas contrações excêntricas) devido à produção de força durante o alongamento muscular.

KOH e HERZOG (1998) relacionam a proteção ao sistema músculo-esquelético obtida a partir de um programa de treinamento excêntrico com alterações em fatores intrínsecos do músculo. Segundo os autores, ocorre um aumento no número de sarcômeros em série da fibra muscular, provocando uma redução no comprimento de

cada sarcômero para um determinado comprimento da fibra. Dessa forma, quando um músculo é submetido a grandes estiramentos (ou grandes comprimentos), esse número adicional de sarcômeros em série por fibra muscular decorrente do treinamento excêntrico diminuiria as chances de ruptura das fibras por estiramento excessivo.

Além dos fatores intrínsecos relacionados com o processo de adaptação funcional do músculo-esquelético, devem ser considerados ainda os fatores neurais que podem ocorrer a partir de um treinamento excêntrico. SALE (1988) propõe dois possíveis mecanismos para explicar a adaptação neural: aumento da ativação das unidades motoras dos músculos motores primários de um movimento específico e alterações na ativação de sinergistas e antagonistas, a partir de uma melhora na coordenação motora. Entretanto, segundo o autor, a maior parte dos trabalhos realizados nessa área, defende o primeiro mecanismo como responsável pela adaptação neural.

Como se pode observar, os mecanismos responsáveis pela adaptação funcional do sistema músculo-esquelético ainda não estão totalmente esclarecidos. Além disso, a maior parte dos estudos nessa área tem sido realizada em modelos animais, o que limita a aplicação direta dos resultados na interpretação da função do sistema músculo-esquelético do ser humano. Nesse sentido, a realização de estudos em seres humanos que possibilite a avaliação das propriedades mecânicas do músculo, juntamente com as elétricas, poderá trazer evidências que ajudem a esclarecer os mecanismos da adaptação do músculo-esquelético submetido a um programa de treinamento excêntrico. Esse conhecimento é fundamental não apenas no sentido de esclarecer os mecanismos de adaptação neuromuscular, mas também no sentido de fornecer subsídios para a elaboração de programas de treinamento de atletas e de reabilitação. Portanto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência do treinamento

excêntrico nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores do joelho em seres humanos submetidos a um programa de 12 semanas de treinamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O número de estudos sobre os efeitos do treinamento (ou do exercício) excêntrico no sistema músculo-esquelético vem aumentando na última década, tendo em vista os efeitos ambíguos resultantes desse tipo de treinamento, principalmente no músculo-esquelético. Se por um lado o exercício excêntrico vem sendo utilizado sistematicamente em programas de reabilitação, devido às evidências da literatura de que esse tipo de exercício ajuda no fortalecimento dos tecidos dos sistemas articular e muscular (JENSEN e DIFABIO, 1989; GROSS, 1992; FYFE e STANISH, 1992; MacLEAN et al., 1999; PADDON-JONES e ABERNETHY, 2001; FAHLSTRÖM et al., 2003), por outro lado, existem diversos trabalhos que demonstram que o exercício excêntrico resulta em um processo de lesão desses tecidos (ARMSTRONG, 1984; LIEBER e FRIDÉN, 1988; LIEBER, 1992; FRIDÉN e LIEBER, 1992; CLARKSON et al.,1992; CLARKSON et al., 1997; BARASH et al., 2002). Analisadas fora de contexto, essas evidências parecem ambíguas e antagônicas, suscitando uma série de questionamentos. Afinal, o exercício excêntrico é benéfico ou lesivo ao sistema músculo-esquelético? Quais os verdadeiros benefícios desse tipo de exercício? É seguro usar esse tipo de exercício em programas de reabilitação de lesões ou em programas de treinamento de atletas? Que tipo de adaptações ocorre no sistema músculo-esquelético após os exercícios excêntricos?

Quando as evidências dos diferentes estudos sobre o exercício excêntrico são lidas dentro da perspectiva correta, ou seja, sob a ótica do treinamento desportivo, essa ambigüidade desaparece, e as evidências dos diferentes trabalhos fazem sentido, tornando-se mais fácil entender os verdadeiros benefícios desse tipo de exercício em

um programa de reabilitação e/ou treinamento. Pode-se dizer que existem duas fases distintas em um programa de treinamento: uma fase inicial, onde o exercício excêntrico resulta em um processo lesivo dos tecidos, enquanto que a segunda fase inicia após a fase lesiva e pode ser considerada como uma fase de reparação dos efeitos da fase inicial. Em função disso, não é possível se obter os benefícios do exercício excêntrico sem passar pela fase inicial ou de microlesão.

Segundo a literatura da área do treinamento desportivo (veja abaixo), existem diversos princípios que regem um programa de treinamento. Apesar de não ser o objetivo desse trabalho um aprofundamento na área do treinamento desportivo, uma breve descrição desses princípios faz-se necessária, a fim de que se possa entender melhor os efeitos do exercício excêntrico sobre o organismo.

2.1. Princípios do Treinamento Desportivo

Um conjunto de estímulos determina uma demanda funcional específica sobre os tecidos e sistemas do organismo. Esse conjunto de estímulos é conhecido, na área da Educação Física e do Desporto, como um programa de treinamento. Programas de treinamento vêm sendo estudados e aplicados há várias décadas na preparação de atletas. Os princípios que regem um programa de treinamento já foram descritos e podem ser encontrados em diversas obras da literatura específica da área (e.g. FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999; GOMES, 2002). O conhecimento desses princípios possibilita a compreensão dos mecanismos responsáveis pela adaptação funcional dos sistemas do organismo.

Dentre os princípios do treinamento desportivo, talvez cinco possam ser destacados e que estão diretamente relacionados à capacidade de adaptação funcional do músculo esquelético ao treinamento excêntrico: (1) Princípio da Adaptação, (2) Princípio da Sobrecarga, (3) Princípio da Progressão, (4) Princípio da Especificidade e (5) Princípio da Individualidade (FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999).

Princípio da Adaptação

A finalidade de um programa de treinamento (ou de reabilitação) consiste em produzir adaptações estruturais-funcionais no sistema músculo-esquelético. Toda adaptação é considerada como um conjunto de alterações em resposta a um programa específico de treinamento (como, por exemplo, as atividades de um programa de treinamento de uma equipe desportiva ou de um programa de reabilitação). O processo de adaptação ocorre quando os tecidos são submetidos a um determinado estímulo que é aplicado em um determinado nível ou intensidade. Inicialmente esse estímulo provoca catabolismo, ou seja, a degradação do tecido a partir de microlesões em apenas parte das células desse tecido. Após a ocorrência dessas microlesões, o tecido é reconstruído (anabolismo) durante o período de recuperação (ou o intervalo entre duas sessões de treinamento ou de reabilitação). Caso o período de recuperação não seja suficiente para a reparação tecidual, o tecido continua a sofrer um processo de degradação que pode resultar em uma lesão, a qual geralmente está associada ao afastamento do indivíduo das atividades responsáveis pelo desencadeamento dessa lesão. Lesões provocadas de forma sucessiva acabam por tornar o problema crônico, o

que pode determinar a impossibilidade de recuperação ou dificultar o processo de reabilitação do indivíduo (FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999).

Princípio da Sobrecarga

As adaptações ocorrem somente quando as demandas impostas pelo treinamento são superiores às usualmente impostas a um determinado tecido. Essas novas demandas (ou sobrecarga) devem ser suficientes para provocar a adaptação, mas na intensidade adequada para evitar a ocorrência de lesão. Apesar de a sobrecarga sempre produzir algum tipo de microlesão (a qual é fundamental para que ocorra uma adaptação), estímulos que superem a capacidade de resistência mecânica dos tecidos deverão sempre resultar em lesão, devendo, portanto, ser evitados. Segundo o princípio da sobrecarga, portanto, a fim de que a adaptação possa ocorrer, temos de submeter nossos tecidos ou sistemas a uma sobrecarga um pouco mais elevada do que aquela que o sistema já está acostumado a suportar (FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999).

Princípio da Progressão

Toda sobrecarga deixa de ser uma sobrecarga após a adaptação dos tecidos. O processo de aumento gradativo da sobrecarga é chamado de progressão e é necessário caso o objetivo do treinamento (ou do programa de reabilitação) seja aumentar ou melhorar a capacidade funcional do indivíduo. Obviamente, a fim de que possa ocorrer a progressão, faz-se necessária uma pausa adequada entre uma sessão de treinamento e outra (seja ela uma atividade desportiva ou uma sessão de reabilitação), a fim de que possa ocorrer a adaptação dos tecidos durante esse período

de recuperação ou intervalo entre sessões (FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999).

Princípio da Especificidade

Segundo o princípio da especificidade, os processos anátomo-fisiológicos que mais progridem pelo treinamento são aqueles que são mais enfatizados durante o treinamento. Nesse sentido, se o programa de exercícios foi elaborado com a finalidade de aumentar a capacidade de produção de força de determinado grupo muscular durante contrações excêntricas, a sobrecarga sobre os tecidos será enfatizada, por exemplo, através de exercícios isocinéticos ou dinâmicos que busquem a contração do grupo muscular enquanto os músculos sofrem um alongamento simultâneo ao período de contração. Esse programa de exercícios até pode resultar no desenvolvimento de outras capacidades físicas como aumentar a amplitude articular de movimento, por exemplo, mas o maior ganho obtido pelo indivíduo será o de aumento da capacidade de produção de força predominantemente em contrações excêntricas com pequeno ou reduzido ganho nas outras capacidades físicas ou em outras formas de contração (FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999).

Princípio da Individualidade

Toda adaptação é individual e depende de uma série de fatores como a herança genética, a história pessoal e as vivências que esse indivíduo experimentou ao longo de sua existência. Uma mesma sobrecarga pode causar, por exemplo, níveis diferentes de microlesão (ou mesmo de lesão) em diferentes indivíduos. Em função disso, todo e qualquer programa de treinamento deve respeitar as características individuais, a fim de

evitar a realização de um programa de treinamento excessivo, o qual pode resultar em um processo de lesão. Cumpre salientar ainda que todos os princípios acima descritos dependem de outros fatores como intensidade do treinamento, tempo de duração das atividades, freqüência das sessões, número de ciclos, entre outros, e que devem ser devidamente planejados quando da elaboração de um programa de reabilitação e/ou treinamento (FOX et al., 1989; FLECK e KRAEMER, 1999).

A compreensão dos princípios acima deixa claro que não existe, portanto, ambigüidade em relação aos efeitos do exercício excêntrico sobre o organismo. Todo exercício excêntrico realizado em um nível ou intensidade superior ao que o organismo está acostumado deverá se constituir em uma sobrecarga. Essa sobrecarga resultará em microlesões dos tecidos. Essas microlesões decorrentes do estiramento dos tecidos durante a contração excêntrica deverão ser reparadas durante um período de repouso de modo a tornar os tecidos resistentes o suficiente para suportar aquela mesma sobrecarga que causou as microlesões (fase de adaptação), ou mesmo uma sobrecarga um pouco superior à inicial. Apesar de esse raciocínio ser lógico, torna-se necessário apresentar evidências que dêem suporte a essa capacidade de adaptação funcional do sistema músculo-esquelético ao exercício físico ou treinamento.

2.2. Adaptação Funcional do Sistema Músculo-esquelético ao Treinamento

Todo movimento gera adaptações dos tecidos do sistema músculo-esquelético (i.e. muscular, ósseo, conjuntivo e cartilaginoso). Conseqüentemente, o aumento ou a redução na intensidade, na duração e na freqüência em que os movimentos são realizados também provocam alterações nesses tecidos. Segundo FRAÇÃO e VAZ

(2000), o sistema músculo-esquelético tem alta capacidade de adaptação a diferentes tipos de estímulos. Essas alterações nos tecidos após os mesmos serem submetidos a demandas funcionais específicas são denominadas de adaptações funcionais. Apesar de o termo adaptação funcional ser usado para definir as mudanças que podem ser visualizadas (ou mensuradas) na capacidade de movimento de um indivíduo ou organismo (o que poderia ser chamado de uma adaptação fisiológica), essas mudanças na verdade têm início em alterações ou adaptações nas estruturas responsáveis pelo movimento, ou, mais especificamente, nas células dos tecidos que constituem o sistema músculo-esquelético (e.g. fibra muscular, fibroblastos, condrócitos, osteoblastos).

No caso do sistema muscular, segundo HERZOG et al. (1991) a adaptação funcional desse sistema ocorre devido às alterações intrínsecas na estrutura muscular (modificação do número de sarcômeros em série de uma fibra ou miofibrila, por exemplo), às diferenças nos processos de ativação do músculo (adaptação neural), ou a uma combinação dos dois fenômenos anteriores. Essas adaptações estruturais e neurais decorrentes do treinamento excêntrico serão discutidas a seguir.

2.3. Efeitos Agudos e Crônicos do Treinamento Excêntrico no Sistema Músculo-esquelético

A realização de uma única série de contrações excêntricas é responsável pelo aparecimento de microlesões no sistema músculo-esquelético. Os efeitos lesivos provenientes dos exercícios excêntricos foram demonstrados por ARMSTRONG (1984), LIEBER e FRIDÉN (1988), LIEBER (1992) e FRIDÉN e LIEBER (1992), os quais

apresentaram evidências de lesão e dor no músculo após exercícios excêntricos. CLARKSON et al. (1992) e BARASH et al. (2002) encontraram aumento de proteínas musculares no sangue, perda de força muscular e redução na amplitude de movimento. Entretanto, se os exercícios são mantidos na forma de um programa de treinamento, os efeitos relacionados à lesão desaparecem e evidencia-se um efeito protetor no sistema músculo-esquelético no sentido de evitar lesões nas contrações excêntricas seguintes (FYFE e STANISH, 1992; PADDON-JONES e ABERNETHY, 2001).

A utilização do treinamento excêntrico foi sugerida por JENSEN e DIFABIO (1989), GROSS (1992), FYFE e STANISH (1992), MacLEAN et al. (1999), PADDON-JONES e ABERNETHY (2001), FAHLSTRÖM et al. (2003) como um método eficiente na reabilitação de lesões, principalmente no caso de tendinites. JENSEN e DIFABIO (1989) sugerem que um programa de reabilitação baseado em exercícios excêntricos pode preparar o tendão patelar a resistir às forças de tensão exercidas na região da articulação do joelho durante atividades esportivas. PADDON-JONES e ABERNETHY (2001) demonstraram que a exposição a um treinamento excêntrico de baixo volume pode ser responsável por um restabelecimento rápido da força muscular. FAHLSTRÖM et al. (2003) demonstraram que o tratamento de lesões inflamatórias no tendão de Aquiles através de um programa de treinamento excêntrico resulta em bons resultados clínicos, com diminuição dos níveis de dor e retorno às atividades diárias dos indivíduos.

Assumindo-se que o treinamento excêntrico provoca alteração nas propriedades intrínsecas musculares (como, por exemplo, alteração no número de sarcômeros em série do músculo), pode-se considerar que os efeitos oriundos desse tipo de treinamento estão relacionados com um processo de adaptação funcional ao nível das

estruturas musculares. A seguir, serão revisadas as evidências existentes na literatura que dão suporte a essas adaptações estruturais.

2.4. Evidências de Adaptação Funcional em Estudos com Animais

MORGAN (1990) atribui a adaptação do músculo ocorrida em decorrência do treinamento excêntrico a um alongamento exagerado dos sarcômeros ativos atuantes na fase descendente da relação força-comprimento (anexo 1). Esse alongamento na fase descendente resultaria em um aumento do número de sarcômeros em série, a fim de manter o comprimento ótimo de produção de força individual de cada sarcômero durante as contrações excêntricas. Evidências de alterações intrínsecas na estrutura muscular (alterações no número de sarcômeros em série das fibras de um músculo) foram encontradas em função da adaptação do músculo ao treinamento excêntrico (LYNN e MORGAN, 1994; KOH e HERZOG, 1998; BUTTERFILED e HERZOG 2003 e 2004).

LYNN e MORGAN (1994) realizaram treinamento excêntrico em ratos através de corrida em esteira com inclinação negativa. Após 6 sessões de treinamento, foi observado um aumento significativo de 10% no número de sarcômeros em série das fibras musculares do músculo vasto intermédio desses animais.

KOH e HERZOG (1998) avaliaram o número de sarcômeros em série dos músculos tibial anterior e extensor longo dos dedos de coelhos após um período de treinamento excêntrico de 12 semanas. Os autores encontraram um aumento significativo do número de sarcômeros nos fascículos superficiais do músculo tibial anterior. Porém nos fascículos profundos do mesmo músculo e no músculo extensor

longo dos dedos não foi observada alteração significativa. As contrações do protocolo de treinamento foram provocadas por estimulação elétrica. Se os fatores neurais (como por exemplo o recrutamento de unidades motoras e as alterações em suas taxas de disparo) são importantes na adaptação do número de sarcômeros, talvez o tipo de treinamento utilizado, com estimulação supramáxima e sincrônica dos músculos, não tenha sido adequado para produzir maiores adaptações.

Os estudos de BUTTERFILED e HERZOG (2003 e 2004) também mostraram evidências de aumento do número de sarcômeros em série após um período de treinamento excêntrico de 6 semanas dos músculos flexores dorsais do tornozelo de coelhos. O treinamento foi realizado 3 vezes por semana utilizando-se estimulação elétrica. Foi encontrado um aumento significativo (3.6%) do número de sarcômeros em série nas fibras superficiais do músculo tibial anterior. Porém nas fibras profundas do músculo avaliado não foi encontrada alteração significativa. Da mesma forma que no estudo de KOH e HERZOG (1998), talvez o tipo de estimulação elétrica para o treinamento tenha limitado as adaptações a nível profundo.

Apesar das limitações específicas de cada estudo, as evidências dos estudos acima demonstram que o treinamento excêntrico em animais resulta em uma adaptação da estrutura muscular às demandas impostas ao tecido. Além dessas evidências, existe uma série de trabalhos na literatura usando modelos animais em que é demonstrada a capacidade de adaptação estrutural do sistema esquelético a outros tipos de estímulos como a imobilização (TABARY et al., 1972; HORTOBÁGYI et al., 2000), a redução do uso do sistema músculo-esquelético (ANDERSON et al., 1999), a redução da gravidade (CAIOZZO et al., 1994). Essas evidências tomadas em conjunto demonstram a alta

capacidade de adaptação do sistema músculo-esquelético a demandas funcionais específicas.

2.5. Evidências de Adaptação Funcional em Estudos Com Seres Humanos

Um dos grandes problemas encontrados em estudos com seres humanos é a impossibilidade de obtenção de evidências diretas da adaptação funcional em função das questões éticas que envolvem estudos invasivos em seres humanos. Em função disso, a realização de estudos invasivos que forneçam evidências diretas da capacidade de adaptação funcional tem se restringido a modelos animais, conforme descrito anteriormente. No entanto, tendo em vista que estudos com diferentes modelos animais têm demonstrado um comportamento semelhante entre diferentes espécies em relação às propriedades mecânicas do sistema músculo-esquelético (HERZOG et al. 1992, JONES et al.,1997), pode-se assumir (dentro de certos limites obviamente) que os mesmos tecidos de diferentes espécies de animais apresentam um comportamento semelhante quando submetidos a demandas funcionais específicas.

Em estudos com animais, as propriedades mecânicas têm sido obtidas através da mensuração direta das relações força-velocidade e força-comprimento (anexo 1), e as adaptações estruturais pela mensuração do número de sarcômeros de uma fibra muscular. No entanto, em estudos com seres humanos é muito difícil determinar o número de sarcômeros de uma fibra, uma vez que são necessárias amostras do tecido, o que implica em questões éticas em relação à invasividade desse tipo de procedimento.

Em função disso, as propriedades mecânicas têm sido estudadas em seres humanos através das relações torque-velocidade e torque-ângulo de grupos musculares e não de músculos individuais. Se por um lado isso é uma limitação, por não se poder determinar as propriedades mecânicas individuais de músculos, por outro lado é uma vantagem, uma vez que os músculos, na grande maioria das vezes, participam de sinergias musculares na realização das atividades de vida diárias, de modo que a avaliação da participação individual (apesar de extremamente relevante) não é totalmente fisiológica ou funcional. Como essa parece ser a única forma de avaliar as propriedades mecânicas de grupos ou sinergias musculares em seres humanos até o presente momento, vários estudos têm utilizado as relações acima para demonstrar essa capacidade de adaptação muscular a demandas funcionais específicas (veja abaixo).

Para relacionar a avaliação das propriedades mecânicas com a alteração do número de sarcômeros em série dos músculos de seres humanos, KOH (1995) desenvolveu um modelo para os músculos extensores do joelho. Em seu estudo, ele estimou as alterações da relação T-A caso o número de sarcômeros em série sofresse um aumento de 10% dos valores iniciais e caso esse número sofresse uma diminuição de 10%. Nos resultados, pode-se observar um deslocamento da curva no sentido de menores comprimentos do músculo para diminuição do número de sarcômeros em série, e no sentido de maiores comprimentos para aumento (anexo 1 - alteração das relações força-velocidade e força-comprimento).

HERZOG et al. (1991) demonstraram que a relação força-comprimento do músculo reto femoral de ciclistas e corredores de elite apresentava propriedades mecânicas diferentes. No estudo, foi utilizado um dinamômetro isocinético para

mesnuração do torque dos músculos extensores do joelho em dois diferentes ângulos do quadril e, posteriormente, a contribuição dos demais músculos foi subtraída da contribuição do músculo reto femoral. Os autores verificaram que o reto femoral dos ciclistas trabalhava na fase descendente da relação-força comprimento (diminuição da força com aumento do comprimento do músculo), enquanto nos corredores o músculo trabalhava na fase ascendente (aumento da força com aumento do comprimento do músculo). Esses resultados foram relacionados a um diferente número de sarcômeros em série nas fibras musculares de cada grupo de atletas, ou seja, menor número no reto femoral dos ciclistas e maior número no músculo dos corredores.

Alterações nas relações T-A e T-V foram encontradas, respectivamente, por VAZ et al. (2002) e FRAÇÃO et al. (2002) ao estudarem os músculos flexores dorsais do tornozelo de bailarinas e jogadoras de voleibol. Em ambos os estudos foi utilizado um dinamômetro isocinético para a mensuração do torque em diferentes ângulos e velocidades. No primeiro estudo foi encontrado um desvio para direita na curva da relação T-A das bailarinas. O segundo estudo mostrou que as bailarinas produziam maiores valores de torque a maiores velocidades de encurtamento do que as jogadoras de voleibol. Os autores de ambos os estudos relacionaram a adaptação encontrada a alterações intrínsecas (aumento do número de sarcômeros em série) ocorridas na musculatura das bailarinas devido ao aumento da excursão dos músculos flexores dorsais.

Também foram encontradas na literatura evidências de alterações nas propriedades mecânicas de músculos de seres humanos em função da realização de exercícios excêntricos. Entretanto essas alterações não se devem unicamente aos efeitos crônicos do exercício excêntrico, que podem alterar a relação T-A por um

possível aumento no número de sarcômeros em série. Alguns estudos mostraram deslocamento da curva T-A após uma série de contrações excêntricas realizadas em um único dia (JONES et al.,1997; BROCKETT et al., 2001).

MORGAN (1990) propõe uma explicação para os primeiros eventos mecânicos que ocorrem em função de uma série de repetidas contrações excêntricas. Segundo o autor, ocorre um rompimento nos miofilamentos em alguns sarcômeros ao longo da fibra, levando a um aumento na capacidade de deformação em série do músculo. Ou seja, o músculo passa a se deformar com mais facilidade quando uma tensão é aplicada a ele devido a microlesões ao nível dos sarcômeros. Como resultado, existe um desvio da relação força-comprimento do músculo no sentido de maiores comprimentos. JONES et al. (1997), e SAXTON e DONNELLY (1996) relacionam esse desvio à ocorrência de lesões na junção miotendínea devido às contrações excêntricas. Entretanto os autores consideram essa explicação inadequada devido ao fato de que a relação força-comprimento passiva permanece inalterada após a realização das contrações excêntricas (WOOD et al., 1993).

JONES et al. (1997) realizaram contrações excêntricas dos músculos flexores plantares de seres humanos durante duas horas de caminhada de costas em uma esteira com inclinação negativa. Após o exercício excêntrico, foi observada uma alteração no ângulo ótimo de produção de torque no sentido de menores ângulos articulares (maiores comprimentos dos músculos), juntamente com uma diminuição nos valores de torque. Os autores atribuem os achados a um alongamento exagerado de alguns sarcômeros dentro da fibra muscular, após a realização das contrações excêntricas. Segundo eles, os sarcômeros mais fracos sofrem um grande aumento de seu comprimento durante as contrações excêntricas, e alguns deles são rompidos e

não conseguem retornar ao comprimento inicial, tornando-se incapazes de produzir força. Esse mecanismo produz tanto uma diminuição da força máxima, quanto uma alteração no ângulo em que essa força é produzida. As observações desse estudo suportam a hipótese de que os primeiros eventos que levam ao rompimento do sarcômero e à lesão da fibra muscular após contrações excêntricas têm origem mecânica. Os resultados encontrados devem, no entanto, ser avaliados com cautela na interpretação de contrações voluntárias, já que as contrações realizadas nas avaliações isométricas desse estudo foram provocadas por estimulação elétrica artificial. Deve-se considerar ainda que existem diferenças no recrutamento de unidades motoras entre contrações voluntárias e contrações estimuladas eletricamente, onde a estimulação elétrica recruta primeiro as fibras musculares tipo II (GARNETT e STEPHENS, 1983) que são as fibras mais lesadas pelas contrações excêntricas (LIEBER, 1992).

Em relação à avaliação das propriedades mecânicas do músculo após a realização de um período de treinamento excêntrico, foram encontrados poucos estudos na literatura. Muitos desses estudos tinham como objetivo verificar questões relacionadas com o aumento dos valores de torque em diferentes ângulos articulares. Entretanto, nesses estudos, não foi analisado um possível deslocamento da curva da relação T-A e não foram discutidas alterações intrínsecas musculares relacionadas com o treinamento excêntrico (aumento do número de sarcômeros em série na fibra muscular).

KOMI e BUSKIRK (1972) realizaram treinamento excêntrico dos músculos flexores de cotovelo durante 7 semanas (contrações máximas) e avaliaram a força excêntrica e a força concêntrica produzida em diferentes ângulos articulares (65º a 170º). Os autores verificaram aumento da força excêntrica e da força concêntrica em todos os ângulos

articulares. A partir dos gráficos apresentados no estudo, pode-se perceber que não houve deslocamento da curva de força, apesar de os autores não terem feito nenhuma consideração a esse respeito. A velocidade do treinamento e dos testes não foi controlada, apenas calculada a partir do tempo de execução e da amplitude de movimento. Além disso, o comportamento da força isométrica não foi avaliado no estudo. O período de treinamento utilizado pode não ter sido suficiente para gerar alterações intrínsecas significativas para alterar o comportamento da curva.

SMITH e RUTHERFORD (1995) utilizaram as relações T-A e T-V para comparar o ganho de força dos músculos extensores de joelho após 20 semanas de treinamento excêntrico, realizado com aumento progressivo da carga e sem controle da velocidade. Após o treinamento excêntrico, foi observado um aumento significativo do torque em velocidades de 30°/s a 150°/s (menores velocidades avaliadas). Na relação T-A foi observado aumento significativo do torque nos ângulos de 70° e 90°. Entretanto não foi evidenciado deslocamento da curva nessa relação após o período de treinamento excêntrico. Nesse estudo, as contrações isométricas foram avaliadas utilizando a técnica de superimposição percutânea de estímulo elétrico (contrações voluntárias onde há a superimposição de estimulação elétrica realizada através de um único estímulo, ou um *twitch*). A atividade elétrica dos músculos e o torque produzido durante contrações excêntricas não foram avaliados. Além disso, os autores não informam se a amplitude de movimento foi controlada durante o treinamento.

A literatura revisada mostra que, por diferentes mecanismos, tanto uma série de contrações excêntricas, quanto um programa de treinamento excêntrico podem alterar as propriedades mecânicas do músculo-esquelético. O efeito agudo está melhor demonstrado nos trabalhos e é relacionado com rupturas ao nível do sarcômero que

levam a um aumento na capacidade de deformação em série do músculo. Entretanto, o efeito crônico ainda não está bem esclarecido, e relaciona-se com um possível aumento do número de sarcômeros em série na fibra muscular.

As evidências acima descritas suportam a idéia de que o sistema músculo-esquelético se adapta às demandas impostas pelo treinamento excêntrico. No entanto, além das adaptações intrínsecas do sistema muscular, os efeitos do treinamento parecem desencadear adaptações ao nível do sistema nervoso.

2.6. Adaptações Neurais Decorrentes do Treinamento

O aumento da sobrecarga sobre o sistema músculo-esquelético parece provocar não apenas adaptações na estrutura dos tecidos músculo-esqueléticos, mas também adaptações no sistema nervoso, também denominadas como adaptações neurais. O organismo do ser humano é dotado de um sistema sensitivo com células modificadas conhecidas como receptores. Esses receptores sensoriais (e.g. fuso muscular, órgão tendinoso de Golgi, corpúsculos de Pacini, terminações de Ruffini) fazem parte da estrutura de músculos, tendões, ligamentos, cápsula articular, pele, e têm por função informar o sistema nervoso central a respeito de todos os estímulos externos aos quais o organismo é submetido (KANDEL et al., 1991). A sobrecarga do treinamento excêntrico no músculo parece desencadear um aumento dos estímulos sensitivos provenientes desses receptores sensoriais que, por sua vez, podem aumentar a resposta motora proveniente do sistema nervoso central (KANDEL et al., 1991; ALBERT, 2002). Esse aumento da resposta motora pode ser determinado a partir da

detecção dos potenciais elétricos das células musculares através da técnica da EMG (BASMAJIAN e DE LUCA, 1985).

Estudos eletromiográficos têm demonstrado evidências de adaptação neural ao treinamento (KOMI e BUSKIRK, 1972; MORITANI e DEVRIES, 1979; HÄKKINEN e KOMI, 1983; HORTOBÁGYI et al., 1996). No entanto, essa adaptação neural parece preceder a adaptação muscular intrínseca, a qual parece necessitar de um período de tempo mais longo para se estabelecer.

No estudo de KOMI e BUSKIRK (1972), foi realizado um treinamento dos músculos flexores de cotovelo durante 7 semanas (contrações máximas), sendo que um grupo de indivíduos realizou treinamento concêntrico e outro grupo treinamento excêntrico. Entretanto não foi encontrada alteração significativa na ativação elétrica (EMG integrada) do músculo bíceps braquial durante e após o período de treinamento para os dois grupos, tanto durante contrações isométricas quanto concêntricas e excêntricas (avaliações a cada semana). Os autores relacionam os resultados encontrados com uma possível economia do sistema neuromuscular já na primeira semana de treinamento, fazendo com que um menor número de unidades motoras fossem ativadas para a mesma força de contração. Para a avaliação da EMG foram utilizados eletrodos de superfície auto-adesivos de 11mm de diâmetro.

MORITANI e DEVRIES (1979) estudaram a contribuição relativa da ativação elétrica e da adaptação funcional intrínseca a partir de um programa de treinamento isométrico dos músculos flexores do cotovelo (ângulo de 90º) com duração de oito semanas. Os autores observaram aumento linear da atividade elétrica (EMG integrada) e da força produzida pelos músculos flexores de cotovelo após treinamento de força de oito semanas. Também verificaram que nas duas primeiras semanas de treinamento, a

contribuição para o aumento da força foi predominantemente de origem neural. A contribuição das alterações intrínsecas musculares para aumento na capacidade de produção de força começou a ser significativa a partir da quarta semana de treinamento. Da mesma forma, SALE (1988) em seu artigo de revisão coloca que, a partir dos estudos analisados, nas fases iniciais de um treinamento observa-se primeiro um aumento significativo na ativação elétrica dos músculos envolvidos, com posterior adaptação ao nível de estruturas musculares.

HÄKKINEN e KOMI (1983) realizaram um treinamento concêntrico-excêntrico dos músculos extensores do joelho através do exercício de agachamento, com duração de 16 semanas. Foi encontrado um aumento significativo da atividade elétrica (EMG integrada) dos músculos reto femoral, vasto lateral e vasto medial até as primeiras 12 semanas de treinamento (avaliações realizadas a cada 4 semanas). Para a avaliação da EMG, eletrodos em configuração bipolar foram posicionados longitudinalmente na área do ponto motor e foi utilizada uma freqüência de amostragem de 1000Hz. Os autores relacionaram esse aumento com aumento na taxa de disparo dos neurônios motores, aumento na descarga das terminações nervosas e redução da inibição proveniente de diferentes estruturas (órgão tendinoso de Golgi e células de Renshaw). Em relação à força isométrica, foi encontrado aumento durante as 16 semanas de treinamento. Os autores discutem esses resultados juntamente com os resultados encontrados em seu estudo anterior (HÄKKINEN et al., 1981), onde foi verificado um aumento mais significativo do diâmetro das fibras musculares nos últimos 2 meses de treinamento (treinamento semelhante). Segundo os autores, os aumentos iniciais da força são causados principalmente por fatores neurais e os fatores relacionados com hipertrofia se tornam mais importantes após a 9ª semana de treinamento.

HORTOBÁGYI et al. (1996) encontraram um aumento de 12% da atividade eletromiográfica dos músculos extensores do joelho durante contrações concêntricas após treinamento concêntrico de 12 semanas a uma velocidade angular de 60°/s. No treinamento excêntrico, realizado na mesma velocidade, foi observado um aumento de 86% da atividade eletromiográfica durante contrações excêntricas. Para avaliação da EMG os eletrodos foram posicionados no ventre do músculo vasto lateral e, para medir a magnitude do sinal eletromiográfico, foram utilizados valores RMS (*Root Mean Square*). Em ambos os tipos de treinamento, o aumento da atividade elétrica foi relacionado com um aumento na taxa de disparo das unidades motoras. O maior aumento encontrado no treinamento excêntrico foi atribuído ao recrutamento preferencial de fibras musculares tipo II durante contrações excêntricas**,** e à maior hipertrofia encontrada nas fibras tipo II em relação às fibras tipo I após o treinamento excêntrico. Segundo os autores, se as fibras tipo II foram as que sofreram mais hipertrofia, o tipo de treinamento que preferencialmente recruta esse tipo de fibra deve apresentar maior aumento da atividade elétrica. Os autores não apresentaram resultados de avaliações da atividade elétrica em velocidades diferentes da velocidade do treinamento, apesar de terem sido realizadas.

FRAÇÃO e VAZ (2001a) encontraram evidências de adaptação neural nos músculos flexores plantares de bailarinas clássicas e jogadoras de voleibol. A avaliação do sinal EMG (valor RMS) em diferentes velocidades angulares de movimento revelou que as bailarinas apresentaram uma capacidade maior de ativação muscular em todas as velocidades avaliadas, sem que no entanto houvesse diferença na capacidade de produção de força nas diferentes velocidades entre os dois grupos de atletas. Para a avaliação da EMG foram utilizados eletrodos de superfície em configuração bipolar.

FRAÇÃO e VAZ (2001b) também encontraram diferenças na atividade elétrica (valor RMS) dos mesmos dois grupos de atletas em contrações isométricas dos músculos flexores plantares em diferentes comprimentos musculares. A ativação dos flexores plantares das bailarinas permaneceu constante com a redução do comprimento dos músculos flexores plantares, enquanto que os músculos flexores plantares das atletas de voleibol reduziram a atividade elétrica com a redução do comprimento muscular. Esses achados parecem concordar com as demandas funcionais das bailarinas, uma vez que elas necessitam produzir elevados níveis de força para manter todo o peso corporal sobre a ponta dos pés com os músculos flexores plantares encurtados. Como as atletas de voleibol usam esses músculos de maneira oposta (ou seja, alongados devido à posição articular do tornozelo em dorsiflexão), as demandas funcionais impostas parecem ser exatamente opostas àquelas das bailarinas. Foram utilizados eletrodos de superfície em configuração bipolar para a avaliação da EMG.

Resumindo os principais pontos da revisão de literatura, percebe-se que estudos com animais mostraram que um programa de treinamento excêntrico pode aumentar o número de sarcômeros em série da fibra muscular e que a variação do número de sarcômeros em série altera as propriedades mecânicas do músculo. Entretanto os poucos estudos realizados com seres humanos não mostram evidências de um deslocamento da relação T-A após o treinamento, o qual seria condizente com o aumento no número de sarcômeros em série da fibra muscular dos estudos com animais. Considerando ainda que existem dificuldades para realizar mensuração direta de alteração no número de sarcômeros em série nas fibras de músculos de seres humanos (em função da invasividade dos procedimentos), estudos que avaliem as propriedades mecânicas dos músculos após um período de treinamento excêntrico

podem fornecer evidências (mesmo que indiretas) que auxiliem na compreensão dos mecanismos envolvidos na adaptação muscular ao treinamento excêntrico.

Tendo em vista o reduzido número de estudos com seres humanos na área do treinamento excêntrico, outros pontos que carecem de esclarecimento são os efeitos do treinamento excêntrico na adaptação neural, o período de tempo necessário para as adaptações neurais e intrínsecas e quais as alterações que esse tipo de treinamento provoca nas propriedades mecânicas musculares, a partir da avaliação das relações T-V e T-A. A compreensão dos mecanismos de adaptação funcional ao treinamento excêntrico é fundamental a fim de que a preparação de atletas e a reabilitação de lesões musculares possam ser realizadas com base em evidências científicas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência do treinamento excêntrico realizado por um período de doze semanas nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores do joelho em seres humanos.

3.2. Objetivos específicos

Foram objetivos específicos do estudo:

(1) determinar as alterações das relações T-V concêntrica e excêntrica dos músculos extensores do joelho após um período de treinamento excêntrico de 12 semanas;

(2) determinar as alterações da relação T-A dos músculos extensores do joelho após um período de treinamento excêntrico de 12 semanas;

(3) verificar as alterações da atividade elétrica dos músculos reto femoral, vasto lateral, e vasto medial após a realização de um treinamento excêntrico de 12 semanas.

4. HIPÓTESES

4.1. Relação Torque-Velocidade

(1) Não deverá existir diferença na relação T-V normalizada dos músculos extensores do joelho entre os grupos controle e experimental previamente ao treinamento excêntrico.

(2) Não deverá existir diferença na relação T-V normalizada dos músculos extensores do joelho do grupo controle entre a sessão inicial (0 semanas) e a final (12 semanas) de avaliação.

(3) Considerando-se que o treinamento excêntrico de longa duração aumenta o número de sarcômeros em série do músculo (LYNN e MORGAN, 1994; KOH e HERZOG, 1998; BUTTERFILED e HERZOG, 2003 e 2004), e que esse aumento no número de sarcômeros tem sido proposto como o mecanismo que altera a relação força-velocidade desse músculo (FRAÇÃO et al., 2002), espera-se encontrar uma maior produção de torque relativo a maiores velocidades de encurtamento e de estiramento nas contrações concêntricas e excêntricas do grupo experimental, respectivamente, após 12 semanas de treinamento excêntrico (figura 1).

(4) Assumindo-se que a especificidade do treinamento seja responsável por um aumento específico das capacidades funcionais do ser humano (LESMES et al. 1978; CAIOZZO et al. 1981; FLECK e KRAEMER, 1999), e tendo em vista a realização do treinamento excêntrico em uma velocidade angular de -60°/s,

espera-se que ocorra um aumento diferenciado na capacidade de produção de força nessa velocidade quando comparado com o aumento da força nas demais velocidades de estiramento e encurtamento musculares.

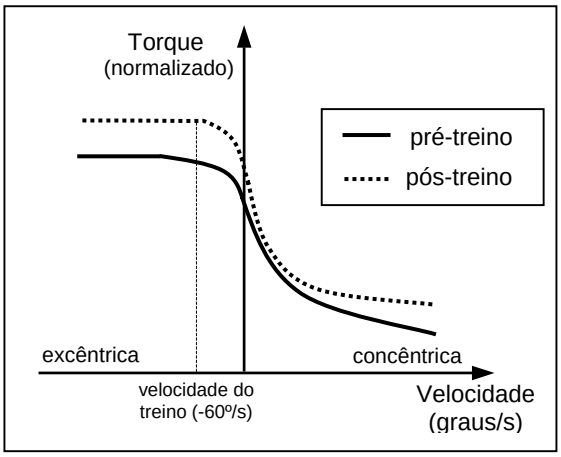

Figura 1. Hipóteses 3 e 4. Relação T-V do grupo experimental pré e pós-treino. Aumento dos valores de torque nas maiores velocidades de encurtamento e de estiramento e na velocidade de -60º/s após o treinamento.

4.2. Relação Torque-Ângulo

(5) Não deverá existir diferença na relação T-A normalizada dos músculos extensores do joelho entre os grupos controle e experimental previamente ao treinamento excêntrico.

(6) Não deverá existir diferença na relação T-A normalizada dos músculos extensores do joelho do grupo controle entre a sessão inicial (0 semanas) e a final (12 semanas) de avaliação.

(7) Assumindo-se que um treinamento excêntrico de longa duração aumenta o número de sarcômeros em série do músculo (LYNN e MORGAN, 1994; KOH e HERZOG, 1998; BUTTERFILED e HERZOG, 2003 e 2004), e que esse aumento no número de sarcômeros altera a relação força-comprimento desse músculo (MORGAN, 1990; HERZOG et al., 1991; VAZ et al., 2002), espera-se encontrar um deslocamento dessa relação no sentido de maiores comprimentos (i.e. desvio para a direita na relação T-A normalizada) dos músculos extensores do joelho do grupo experimental após 12 semanas de treinamento excêntrico (figura 2).

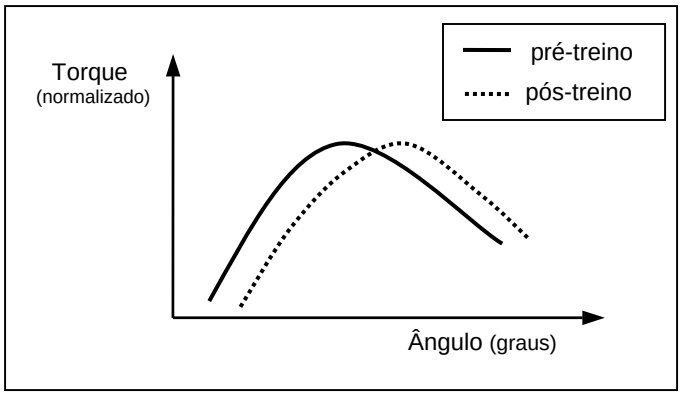

Figura 2. Hipótese 7. Relação T-A do grupo experimental pré e pós-treino. Deslocamento no sentido de maiores comprimentos musculares após o treinamento.

4.3. Ativação Muscular

(8) Não deverá existir diferença na ativação muscular relativa dos músculos extensores do joelho entre os grupos controle e experimental previamente ao treinamento excêntrico.

(9) Não deverá existir diferença na ativação muscular relativa dos músculos extensores do joelho do grupo controle entre as sessões inicial e final de avaliação.

(10) Assumindo-se que as adaptações neurais ocorrem nas semanas iniciais de treinamento (MORITANI e DEVRIES, 1979; HÄKKINEN e KOMI, 1983; SALE, 1988), e que o aumento da capacidade de produção de força nas semanas subseqüentes de treinamento está relacionado às adaptações intrínsecas descritas nas hipóteses 3 e 7, espera-se que não deva existir diferença na ativação muscular relativa dos músculos extensores do joelho do grupo experimental entre as avaliações pré- e pós-treinamento excêntrico (tanto para a relação T-V, quanto T-A).

5. METOLOGIA

Todos os procedimentos do estudo foram aprovados pelo Comitê de Ética da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (parecer nº 2003123).

5.1. Caracterização da pesquisa

O estudo caracterizou-se como tipo quase-experimental.

5.2. Amostra

A amostra foi constituída por 21 indivíduos do sexo masculino (massa 69.2 ±8.82 Kg; altura 174.0 ±6.3 cm; faixa etária 20-45 anos) divididos em dois grupos, a saber: o primeiro grupo foi constituído por 10 indivíduos submetidos a um programa de treinamento excêntrico dos grupos musculares quadríceps direito e esquerdo (grupo experimental), e o segundo grupo foi composto por 11 indivíduos que não realizaram qualquer tipo de treinamento excêntrico (grupo controle). Considerando-se que os testes foram realizados apenas no membro inferior direito, o membro inferior esquerdo do grupo experimental foi submetido ao treinamento para se evitar desequilíbrios musculares.

A amostragem foi realizada de forma intencional. Para participarem da amostra, os indivíduos: (1) não poderiam apresentar história de lesão no músculo quadríceps ou na articulação do joelho; (2) deveriam ser sedentários ou fisicamente ativos (caso fossem

fisicamente ativos, não deveriam ser alteradas a freqüência e a intensidade da atividade física do indivíduo durante a realização do estudo); (3) não poderiam apresentar história de doença do sistema nervoso central ou periférico, desnutrição, pneumopatia ou cardiopatia. Além disso, para serem incluídos no grupo experimental, os indivíduos não deveriam estar realizando nenhum tipo de treinamento de força envolvendo a musculatura a ser analisada. Todos os indivíduos da amostra assinaram um termo de consentimento informado para participação do estudo (Anexos 2 e 3).

5.3. Procedimentos

Os indivíduos do grupo experimental foram submetidos a um programa de treinamento excêntrico dos músculos extensores dos joelhos direito e esquerdo durante um período de 12 semanas. Avaliações foram realizadas no membro inferior direito dos indivíduos antes de iniciar o treinamento e após 12 semanas de treinamento excêntrico. O grupo controle foi submetido às mesmas avaliações realizadas com o grupo experimental, a fim de que se pudesse comparar os resultados entre os dois grupos ao longo do período de treinamento. O período de 12 semanas foi escolhido considerando-se que estudos anteriores encontraram alterações neuromusculares após um período de treinamento semelhante ou menor (HÄKKINEN e KOMI, 1983; HORTOBÁGYI et al., 1996; FARTHING e CHILIBECK, 2003).

Durante as avaliações, as seguintes variáveis foram mensuradas: torque concêntrico e torque excêntrico dos músculos extensores do joelho em diferentes velocidades angulares de movimento, torque dos músculos extensores do joelho em

diferentes ângulos articulares, e a atividade elétrica dos músculos reto femoral, vasto lateral e vasto medial.

5.3.1. Medida do Torque Articular

Um dinamômetro isocinético tipo Cybex, modelo NORM (Lumex & Co., Ronkonkoma, Nova Iorque, EUA) foi utilizado para determinação das relações T-V e T-A. O braço normalmente utilizado no dinamômetro foi substituído por um braço mecânico construído pelo Laboratório de Medições Mecânicas da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CERVIERI et al., 1999). Dessa forma, além dos dados de torque fornecidos pelo dinamômetro, os sinais de torque foram sincronizados aos dados de EMG, a fim de facilitar o processo de análise de dados. O braço mecânico foi ligado a um condicionador de sinais que enviou as informações para um conversor analógico-digital. Para aquisição dos dados, foi utilizado o programa CODAS e o armazenamento dos mesmos foi realizado em um computador tipo Pentium (200 MHz). Foram realizadas calibrações de força e velocidade no dinamômetro isocinético antes da primeira avaliação e a cada quatro semanas, totalizando quatro calibrações.

Os indivíduos foram posicionados sentados, com a extremidade distal do membro inferior direito fixada ao braço do equipamento. O eixo de rotação do equipamento foi alinhado com o eixo de rotação aparente da articulação do joelho direito.

5.3.2. Protocolo das avaliações

Inicialmente, os indivíduos foram submetidos a um período de aquecimento e alongamento da musculatura extensora e flexora do joelho. O aquecimento foi realizado em bicicleta ergométrica, durante 5 minutos, a uma potência de 60 Watts. Os músculos extensores do joelho foram alongados antes e depois da realização dos testes.

Em todos os dias de avaliação, antes de cada protocolo (concêntrico, excêntrico, isométrico), os indivíduos foram submetidos a uma familiarização ao tipo de movimento a ser executado. Previamente aos protocolos dinâmicos, foi realizada 1 série de 3 contrações na velocidade de 120º/s. Para o protocolo isométrico, a familiarização foi constituída de 1 contração isométrica no ângulo de 60º. Os indivíduos foram orientados a produzirem força mínima durante a familiarização para evitar a fadiga muscular. Quando necessário (a pedido do indivíduo), a familiarização foi repetida uma vez para cada protocolo.

As avaliações seguiram sempre a seguinte ordem: relação T-V concêntrica, relação T-V excêntrica, relação T-A. Antes do protocolo concêntrico, os indivíduos executaram três contrações voluntárias máximas (CVM) durante 5 segundos, de forma isométrica, em um ângulo de 60° de flexão do joelho (0° = extensão completa de joelho). O ângulo de 60° foi escolhido porque representa o ângulo no qual os músculos extensores de joelho apresentam maior capacidade de produção de torque (MURRAY et al., 1977). Essas contrações foram realizadas para garantir a normalização por contrações isométricas (ver item 5.5), caso a coleta fosse interrompida antes do protocolo isométrico. Entre as três contrações, a que produziu maior valor de torque foi utilizada para normalização.

Avaliação da Relação Torque-Velocidade Concêntrica

Três contrações voluntárias máximas concêntricas do grupo muscular extensor do joelho foram realizadas pelos sujeitos em sete velocidades angulares diferentes: 60°/s, 120°/s, 180°/s, 240°/s, 300°/s, 360°/s e 420°/s. A ordem das velocidades foi determinada aleatoriamente por sorteio para cada indivíduo. Dois minutos de intervalo foram observados entre cada velocidade, a fim de evitar a ocorrência de fadiga muscular. Ao final do teste, a primeira velocidade executada foi novamente avaliada para se verificar a existência de efeitos da fadiga. A presença de fadiga foi definida como uma redução estatisticamente significativa no valor da última repetição em relação ao valor de torque da primeira repetição. Sempre que essa redução fosse observada, os testes desses indivíduos seriam excluídos da amostra.

Avaliação da Relação Torque-Velocidade Excêntrica

Cinco minutos após a avaliação da relação T-V concêntrica, o protocolo foi repetido com contrações voluntárias excêntricas máximas. O procedimento foi semelhante ao utilizado na avaliação anterior; porém foram utilizadas apenas cinco velocidades angulares: -60°/s, -120°/s, -180°/s, -240°/s e -300°/s, tendo em vista que o equipamento não permite velocidades superiores a -300°/s para contrações excêntricas. Os mesmos intervalos e procedimentos da avaliação das contrações concêntricas foram observados para a avaliação excêntrica.

Avaliação da Relação Torque-Ângulo

Cinco minutos após a avaliação excêntrica, os indivíduos realizaram uma contração isométrica voluntária máxima do grupo muscular extensor do joelho em oito

ângulos articulares diferentes: 7°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° e 103°. Para cada indivíduo, a ordem dos ângulos foi determinada de forma aleatória por sorteio. Os sujeitos foram instruídos a produzir força máxima em aproximadamente 1 segundo ou mais, e a manter o esforço durante no mínimo mais 1 segundo antes de relaxar. HERZOG e TER KEURS (1988) propõem esse procedimento com o objetivo de garantir que todas as fibras musculares permaneçam em comprimento constante durante a medida da força produzida pelos músculos. Entre cada contração, foi observado um intervalo de 2 minutos para minimizar os efeitos da fadiga. Ao final do teste, o primeiro ângulo foi novamente avaliado para verificar a existência desses efeitos. O teste foi repetido caso fosse verificada alguma das seguintes situações: (1) o sujeito percebesse que não foi obtida contração máxima ou que o aumento da intensidade da contração até o máximo não tivesse ocorrido de maneira gradual, (2) a contração não tivesse sido mantida por pelo menos 1 segundo (HERZOG e TER KEURS, 1988).

5.3.3. Eletromiografia

Pares de eletrodos de superfície em configuração bipolar foram utilizados para avaliação da atividade elétrica muscular. Os eletrodos foram fixados à pele que recobre o músculo quadríceps, na direção aproximada das fibras musculares dos músculos reto femoral, vasto lateral e vasto medial, semelhante à configuração proposta por BASMAJIAN e DE LUCA (1985). Um eletrodo de referência foi colocado na pele que recobre a face anterior da tíbia. Foi observada uma distância de 31 mm entre os eletrodos , a qual foi determinada por meio de um paquímetro (marca Mitutoyo).

Previamente à colocação dos eletrodos, a impedância da pele foi reduzida através da raspagem dos pêlos e da limpeza da pele (por meio de um algodão com álcool), com objetivo de remover as células mortas e a oleosidade da pele no local do posicionamento dos eletrodos (SODERBERG e KNUTSON, 2000). Após a fixação dos eletrodos na pele, foi aplicada uma leve pressão sobre eles, a fim de aumentar o contato entre o gel do eletrodo e a pele (NIGG e HERZOG, 1994).

Na segunda avaliação, os eletrodos foram recolocados na região da depilação do primeiro dia de teste. Portanto, os eletrodos foram recolocados aproximadamente no mesmo local no segundo dia de avaliação, ou seja, no centro do retângulo.

Um sistema de EMG de oito canais (Bortec Incorporation, Canadá) foi utilizado para a coleta dos sinais EMG. Para aquisição dos dados foi utilizado o programa CODAS, e o armazenamento dos mesmos foi realizado em um computador tipo Pentium (200 MHz), com uma freqüência de amostragem de 2000 Hz por canal.

Os sinais EMG foram coletados durante a realização dos protocolos concêntrico, excêntrico e isométrico nos dois dias de avaliação.

5.4. Protocolo do treinamento excêntrico

O mesmo dinamômetro usado para as avaliações foi utilizado para a realização do treinamento excêntrico. Para todos os dias de treinamento, foram utilizados os mesmos ajustes no dinamômetro determinados para os segmentos corporais que foram realizados na primeira avaliação. Em seguida, treinamento do membro inferior direito foi realizado seguido do treinamento no membro inferior esquerdo.

Nos dias em que não foram realizadas avaliações, os indivíduos realizaram aquecimento e alongamento antes do treinamento conforme descrito anteriormente. Os exercícios de alongamento foram repetidos após o treinamento.

A freqüência do treinamento foi de três sessões semanais, com no mínimo 1 dia e no máximo 2 dias de intervalo entre as sessões. Na primeira semana de treinamento foram realizadas apenas duas sessões com um período de 3 dias de intervalo entre elas. Esse intervalo maior na primeira semana foi adotado considerando-se as microlesões musculares e a dor muscular tardia decorrentes das primeiras séries de contrações excêntricas (ARMSTRONG, 1984; FRIDÉN e LIEBER, 1992; CLARKSON et al., 1992; BARASH et al., 2002). A freqüência semanal adotada foi testada em um estudo piloto com duração de 6 semanas (ROCHA et al., 2003). O treinamento foi constituído de 12 semanas, totalizando 35 sessões.

A velocidade angular de execução do treinamento excêntrico dos músculos extensores do joelho foi de -60°/s. O dinamômetro foi programado de forma que o indivíduo também realizasse contrações excêntricas dos músculos flexores do joelho durante o movimento de extensão dessa articulação. Dessa forma, foram evitadas contrações concêntricas da musculatura extensora, garantindo um treino puramente excêntrico desses músculos.

O protocolo de treinamento consistiu de 2 a 5 séries de 7 a 9 repetições de contrações excêntricas máximas dos músculos extensores do joelho, com 2 minutos de intervalo entre as séries (Tabela 1). O protocolo utilizado foi adaptado do estudo de HORTOBÁGYI et al. (1996), sendo que as seguintes alterações foram realizadas: (1) diminuição no número máximo de repetições de 12 para 9, já que o estudo piloto mostrou uma queda nos valores de torque nas últimas repetições; (2) alteração nas

séries e repetições de forma que as avaliações fossem realizadas sempre no final de cada mesociclo (nível de organização do sistema de treinamento que soluciona tarefas de um determinado período de preparação e que trata das variações ocorridas entre 3 a 6 semanas (GOMES, 2002)). A segunda alteração foi feita para permitir a realização de avaliações a cada 4 semanas de treinamento. Apesar de terem sido realizadas 4 avaliações, devido ao grande volume de dados gerados, apenas a primeira e a última avaliação serão apresentadas no presente trabalho.

Tabela 1. Protocolo do treinamento excêntrico (adaptado de HORTOBÁGYI et al., 1996).

		Semana	Sessões/semana	Séries	Repetições	Volume
Mesociclo 1	Microciclo 1	1	2	2	7	14
	Microciclo 2	2	3	3	7	21
	Microciclo 3	3	3	3	8	24
	Microciclo 4	4	3	3	9	27
Mesociclo 2	Microciclo 5	5	3	3	7	21
	Microciclo 6	6	3	4	7	28
	Microciclo 7	7	3	4	8	32
	Microciclo 8	8	3	4	9	36
Mesociclo 3	Microciclo 9	9	3	4	7	28
	Microciclo 10	10	3	5	7	35
	Microciclo 11	11	3	5	8	40
	Microciclo 12	12	3	5	9	45

5.5 Análise dos Dados

5.5.1. Relação Torque-Velocidade

Entre as três contrações realizadas nas avaliações concêntrica e excêntrica, foi selecionada aquela que produziu o maior valor de torque. As médias dos valores de torque máximo normalizados foram relacionadas com cada velocidade angular de movimento. O procedimento foi realizado de forma semelhante para as contrações

concêntricas e excêntricas. Os valores absolutos de torque de todas as avaliações foram normalizados pelo valor da CVM isométrica do primeiro dia de teste de cada indivíduo.

5.5.2. Relação Torque-Ângulo

As médias e desvios padrão dos valores de pico de torque normalizados obtidos dos indivíduos da amostra foram calculados para cada ângulo articular. Três diferentes normalizações foram utilizadas a fim de que se pudesse avaliar as alterações nas propriedades mecânicas dos músculos extensores do joelho, a saber:

Normalização pela CVM isométrica

Valores absolutos de torque de todas as avaliações foram normalizados pelo valor da CVM isométrica do primeiro dia de teste de cada indivíduo. Essa normalização foi utilizada com o intuito de avaliar as alterações do torque pós-treinamento em relação ao período pré-treinamento.

Normalização pelo ângulo específico

Valores absolutos de torque de cada ângulo foram normalizados pelo valor do torque do ângulo correspondente obtido no primeiro dia de teste. Essa normalização foi utilizada para avaliar o aumento relativo do torque pós-treinamento em relação ao período pré-treinamento em cada ângulo, e avaliar em quais ângulos houve maior aumento do torque.

Normalização pelo torque máximo

Valores absolutos de torque de cada dia de teste foram normalizados pelo valor do torque correspondente ao ângulo em que o grupo (controle / experimental) produziu maior torque no próprio dia de teste. Essa normalização foi utilizada com o objetivo de verificar um possível deslocamento da relação T-A com o treinamento.

5.5.3. Eletromiografia

Os sinais EMG foram processados através do programa WINDAQ DI-720 e do programa SAD 32 (versão 2.61), desenvolvido no Laboratório de Medições Mecânicas da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Recortes dos sinais eletromiográficos foram obtidos para posterior processamento dos mesmos. Para as contrações dinâmicas, foi realizado um recorte de todo o sinal eletromiográfico de cada contração, totalizando 28 recortes para cada músculo de cada indivíduo (para cada dia de teste: 7 velocidades concêntricas e 1 repetição; 5 velocidades excêntricas e 1 repetição). Nas contrações isométricas, foi realizado um recorte de 3 segundos da região do platô da curva de força, totalizando 20 recortes para cada músculo de cada indivíduo (para cada dia de teste: 1 CVM no início da avaliação; 8 velocidades e 1 repetição).

Para o processamento dos recortes do sinal eletromiográfico, os seguintes procedimentos foram utilizados:

- remoção da componente DC e eliminação do ganho;
- utilização do filtro via Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformation* - FFT*)* - Filtro Ideal; parâmetros: freqüência mínima 20Hz, freqüência

máxima 1000Hz. Segundo ENOKA (1997), as unidades motoras apresentam freqüência de disparo mínima na faixa de 20Hz, de modo que sinais abaixo de 20 Hz são atribuídos a ruído e não a sinais musculares;

- utilização do filtro via FFT - Filtro Remove Picos Automático; parâmetros: largura da média 18, razão máxima 2.

Vários filtros com diferentes parâmetros foram testados. Os testes foram realizados através da comparação do espectro de freqüência da FFT do sinal bruto com a FFT do sinal filtrado. Foram escolhidos para o processamento dos dados os filtros e parâmetros que mostraram melhor filtragem do ruído com redução mínima do sinal, baseado em inspeção visual do espectro de freqüência do sinal pré- e pós-filtragem.

Após a realização desses procedimentos, valores RMS do sinal EMG foram calculados para cada velocidade e para cada ângulo avaliados, com o objetivo de medir a magnitude do sinal durante as contrações.

A seguinte normalização foi utilizada para os sinais EMG:

Normalização pela CVM isométrica

O valor RMS do sinal EMG correspondente à maior CVM isométrica de cada indivíduo realizada no primeiro dia de avaliação foi utilizado para normalização dos dados obtidos com a EMG nas contrações dinâmicas e isométricas nas demais avaliações. A normalização de valores RMS de contrações dinâmicas utilizando valores de contrações isométricas foi utilizada por BOCHDANSKY et al. (1993) e LUH et al. (1999).

5.6. Análise Estatística

Análise de variância de dois fatores (grupo x velocidade e grupo x ângulo) para dados repetidos (velocidade e ângulo) foi utilizada para comparar as seguintes variáveis:

Relação Torque-Velocidade

(1) torque isocinético máximo normalizado obtido pré-treinamento entre os grupos controle e experimental na relação T-V;

(2) torque isocinético máximo normalizado das avaliações inicial e final do grupo controle na relação T-V;

(3) torque isocinético máximo normalizado dos testes pré- e pós-treinamento do grupo experimental na relação T-V;

Relação Torque-Ângulo

(4) torque isométrico máximo normalizado obtido pré-treinamento entre os grupos controle e experimental na relação T-A;

(5) torque isométrico máximo normalizado das avaliações inicial e final do grupo controle na relação T-A;

(6) torque isométrico máximo normalizado dos testes pré- e pós-treinamento do grupo experimental na relação T-A;

Ativação Elétrica

(7) valores RMS normalizados de cada músculo obtidos para cada grupo nas relações T-A e T-V;

(8) valores RMS normalizados de cada músculo entre as avaliações inicial e final do grupo controle nas relações T-A e T-V;

(9) valores RMS normalizados de cada músculo entre os testes pré- e pós-treinamento do grupo experimental nas relações T-A e T-V;

Caso fossem verificadas diferenças significativas, um teste *Post-Hoc* (Bonferroni) foi utilizado para verificar onde se encontram essas diferenças. A análise de variância de um fator foi utilizada para determinar diferenças estatísticas quando houvesse interação entre as variáveis e para avaliar os efeitos da fadiga na comparação entre a primeira e a última contração de cada protocolo.

Para os valores RMS, foi utilizada a técnica de *Box plot* para cada ângulo e para cada velocidade em cada tipo de normalização. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de identificar a possível presença de casos extremos (*outliers*). Inicialmente, todos *outliers* considerados severos pelo teste foram eliminados do estudo. Nos casos em que os dados não apresentaram distribuição normal mesmo com a eliminação dos *outliers* severos, foram excluídos também os *outliers* moderados. A presença de *outliers* foi relacionada a possíveis problemas não identificados no momento da coleta e da análise de dados (descolamento de eletrodos, ruídos não eliminados com a filtragem do sinal).

Para a análise estatística foi utilizado o programa SigmaStat (versão 2.03), adotando-se nível de significância de 0,05 para todas as análises.

6. RESULTADOS

Na comparação do torque produzido entre o início e o final de cada protocolo (T-V concêntrico, T-V excêntrico, T-A) de cada indivíduo, não foram encontradas diferenças significativas em nenhum dos grupos (grupo experimental p=0,563; grupo controle p=0,874). Não foi evidenciada redução superior a 20% em relação ao valor inicial. A maior diminuição no torque entre a primeira e ultima contrações de cada protocolo encontrada para o grupo experimental foi de 12,43% e para o grupo controle de 18,34%. Portanto, não houve a necessidade de exclusão de nenhum indivíduo.

6.1. Relação Torque-Velocidade

A titulo de ilustração, as figuras 3 e 4 apresentam os resultados de torque absoluto em função das diferentes velocidades angulares de movimento dos grupos controle e experimental nas duas avaliações realizadas. Houve uma redução do torque com o aumento da velocidade angular de movimento nas contrações concêntricas, enquanto os valores de torque permaneceram aproximadamente constantes com o aumento da velocidade angular nas contrações excêntricas no teste inicial (grupo controle e experimental) e teste final (grupo controle). Um aumento dos valores de torque pode ser observado no grupo experimental pós-treinamento, principalmente na velocidade de treino e velocidades adjacentes.

A tabela 2 apresenta o aumento percentual do torque absoluto dos grupos controle e experimental em relação ao primeiro dia de teste. O treinamento excêntrico produziu

um aumento de 55% na velocidade de -60°/s, com aumentos menores nas velocidades angulares adjacentes à velocidade de treino.

Tabela 2 - Variação percentual do torque absoluto em cada velocidade para os grupos experimental e controle.

	Aumento de torque (%)	
Velocidade (°/s)	**Grupo controle**	**Grupo experimental**
-300	8	8
-240	13	13
-180	7	13
-120	7	29
-60	13	55
0	3	17
60	0	1
120	-1	1
180	11	5
240	5	4
300	6	6
360	7	13
420	16	20

A figura 5 apresenta os resultados de T-V normalizados do grupo controle para as duas avaliações realizadas. Foi encontrado um aumento significativo do torque relativo entre o teste inicial e o final do grupo controle ($p=0,009$), apesar do comportamento semelhante dos dados entre os dois testes. A figura 6 apresenta os mesmos resultados que os da figura 5, mas para o grupo experimental. Houve um aumento significativo do torque relativo no pós-treino em relação ao pré-treino ($p<0,001$) nas velocidades de 0°/s (comparação 0°/s com 60°/s: $p=0,295$ pré-treino, $p<0,001$ pós-treino), -60°/s (comparação -60°/s com 0°/s: $p=1,0$ pré-treino, $p<0,001$ pós-treino) e -120°/s (comparação -180°/s com -120°/s: $p=1,0$ pré-treino, $p=0,022$ pós-treino). Não houve diferença significativa entre as relações T-V iniciais (0 semanas) dos grupos controle e experimental.

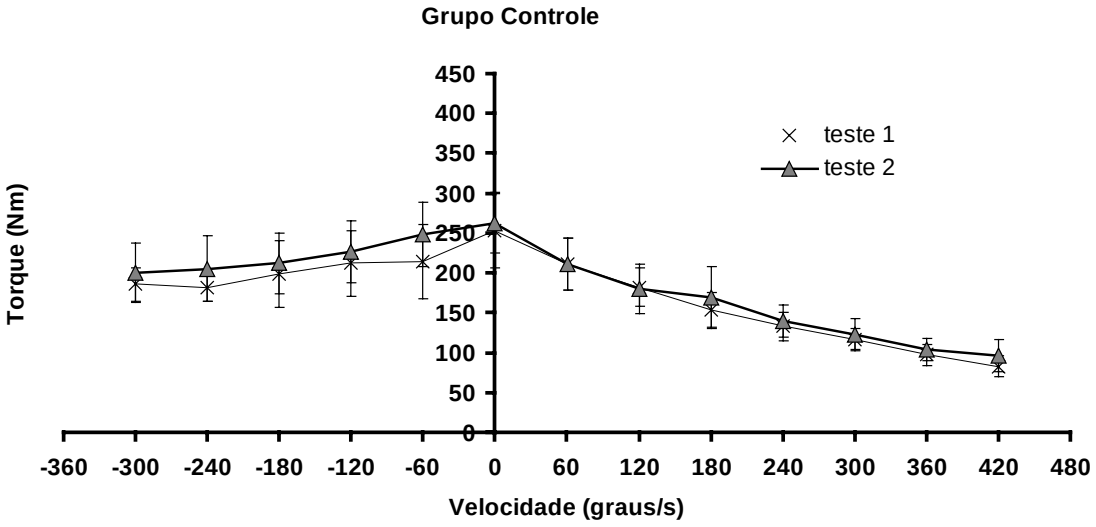

Figura 3. Relação torque-velocidade para valores absolutos de torque do grupo controle (média e desvio padrão; n=11).

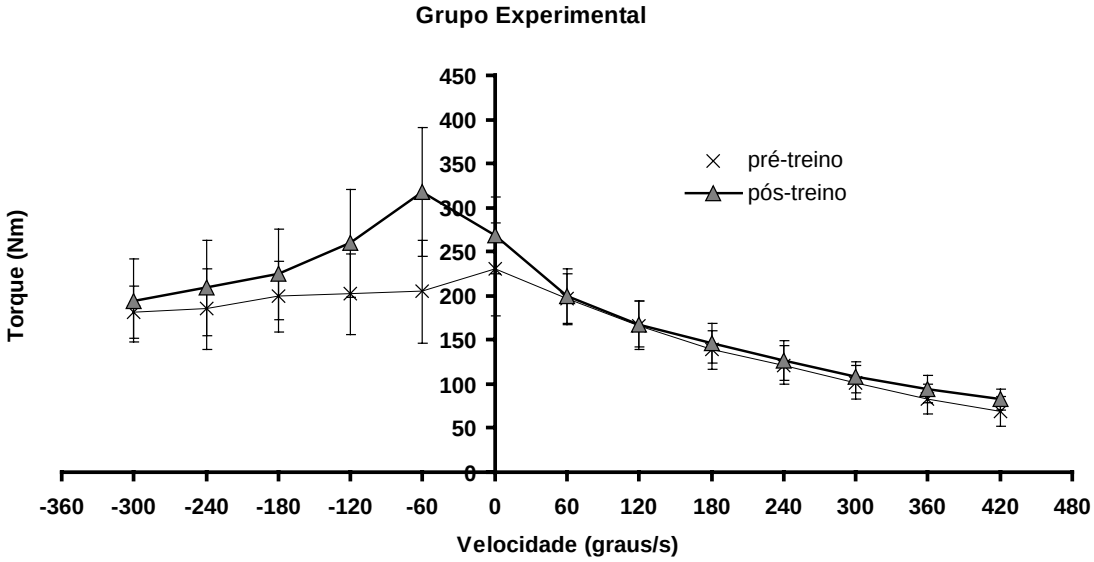

Figura 4. Relação torque-velocidade para valores absolutos de torque do grupo experimental (média e desvio padrão; n=10).

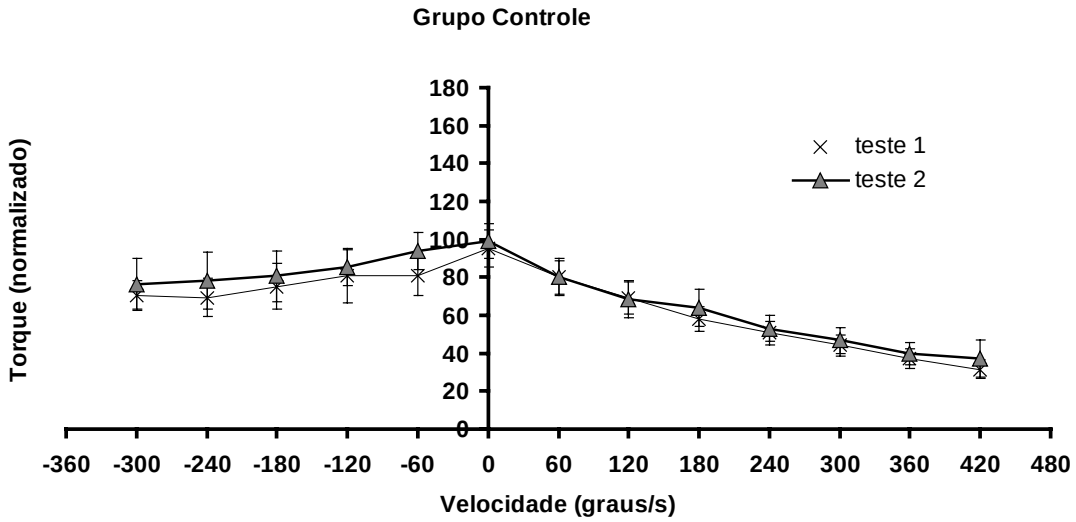

Figura 5. Relação torque-velocidade para valores normalizados de torque do grupo controle (média e desvio padrão; n=11). Aumento generalizado dos valores de torque no teste 2 ($p<0,05$).

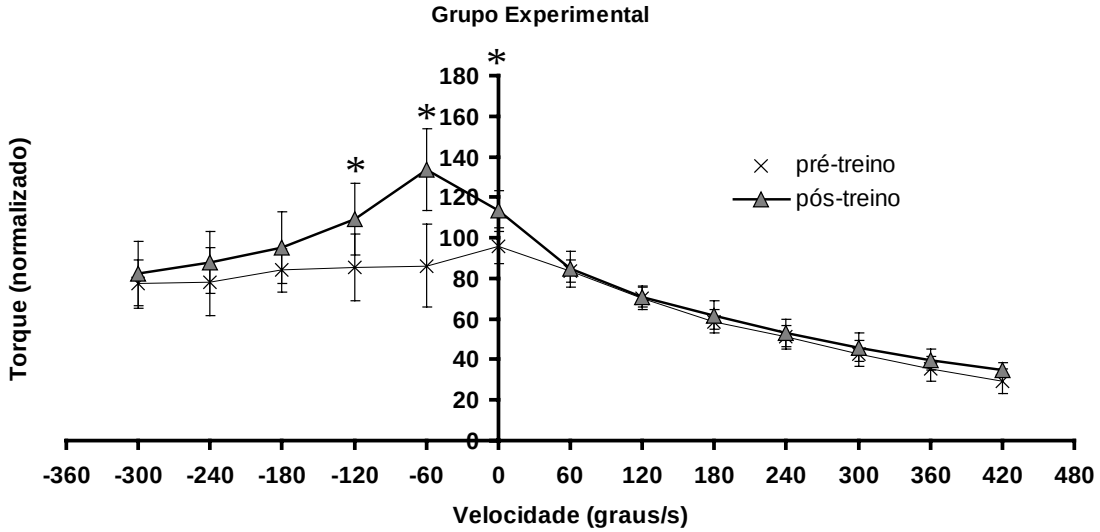

Figura 6. Relação torque-velocidade para valores normalizados de torque do grupo experimental (média e desvio padrão; n=10). * = diferença significativa na comparação entre os testes ($p<0,05$).

6.2. Relação Torque-Ângulo

As figuras 7 e 8 mostram os valores absolutos de torque para a relação T-A dos grupos controle e experimental, respectivamente. Houve um aumento do torque com o aumento do ângulo articular (ou com o aumento do comprimento muscular) até o ângulo de 60°, e uma redução com o aumento subseqüente do ângulo articular (figura 7 e pré-treino da figura 8). No caso do grupo experimental, o aumento do torque no pós-treino ocorreu até o ângulo de 75°, diminuindo com o aumento subseqüente do ângulo articular (figura 8).

Na tabela 3 pode-se observar o aumento percentual do torque absoluto em cada ângulo articular. Houve um aumento de 22% e 19% nos ângulos de 75° e 90° no grupo experimental, respectivamente, enquanto um aumento de 11% pode ser observado no ângulo de 60° no grupo controle.

Tabela 3 - Variação percentual do torque absoluto em cada ângulo para os grupos experimental e controle.

	Aumento torque (%)	
Ângulo	**Grupo controle**	**Grupo experimental**
7	-10	5
15	-5	6
30	0	5
45	6	8
60	11	4
75	8	22
90	8	19
103	-5	3

A figura 9 apresenta a relação T-A normalizada pela CVM isométrica do primeiro dia de teste do grupo controle. Houve um aumento significativo na relação T-A do teste final para o inicial do grupo controle (p=0,03). Na figura 10 podem ser observados os resultados da relação T-A normalizada pela CVM isométrica do primeiro dia de teste do grupo experimental. Foi encontrada diferença significativa entre as relações T-A normalizadas pré- e pós-treinamento excêntrico (p=0,032). Mais especificamente, houve um aumento do torque no ângulo de 90° no pós-treino (comparação 90° com 103°: p=1,0 pré-treino, p<0,001 pós-treino). Não foram encontradas diferenças significativas entre as relações T-V iniciais (0 semanas) dos dois grupos.

As figuras 11 e 12 apresentam a relação T-A normalizada pelo torque obtido em cada ângulo no primeiro teste e no pré-treinamento dos grupos controle e experimental, respectivamente. No grupo controle foram encontradas alterações significativas (p<0,001) com uma redução do torque normalizado no ângulo de 7° e um aumento no ângulo de 60° entre os testes inicial e final (comparação 7° com 60°: valores iguais no teste 1, p=0,026 teste 2), enquanto no grupo experimental esse aumento ocorreu de forma generalizada na relação T-A após o treinamento (p=0,014).

As figuras 13 e 14 apresentam a relação T-A normalizada pelo torque máximo obtido em cada dia de teste em cada grupo. Para o grupo controle, foi utilizado o valor de torque produzido no ângulo de 60º para o primeiro e para o segundo dia de teste. Para o grupo experimental, foi utilizado o valor de torque produzido no ângulo de 60º para o primeiro dia de teste e no ângulo de 75º para o segundo dia de teste. Não houve diferença significativa entre a relação T-A pré- e pós-treino (grupo experimental), enquanto a relação T-A do grupo controle apresentou uma redução significativa do torque (p= 0,037) nos ângulos 7º, 15º (comparação 7° com 15°: p=0,116 teste 1,

p<0,001 teste 2), 90º (comparação 60° com 90°: p=0,083 teste 1, p<0,001 teste 2) e 103º (comparação 45° com 103°: p=1,0 teste 1, p<0,001 teste 2) no teste final.

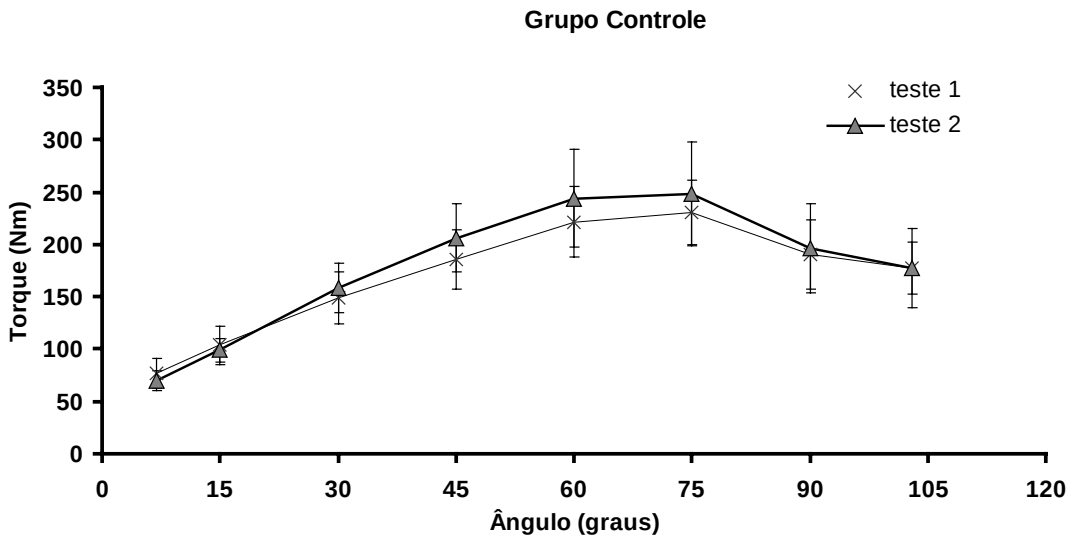

Figura 7. Relação torque-ângulo para valores absolutos de torque do grupo controle (média e desvio padrão; n=11).

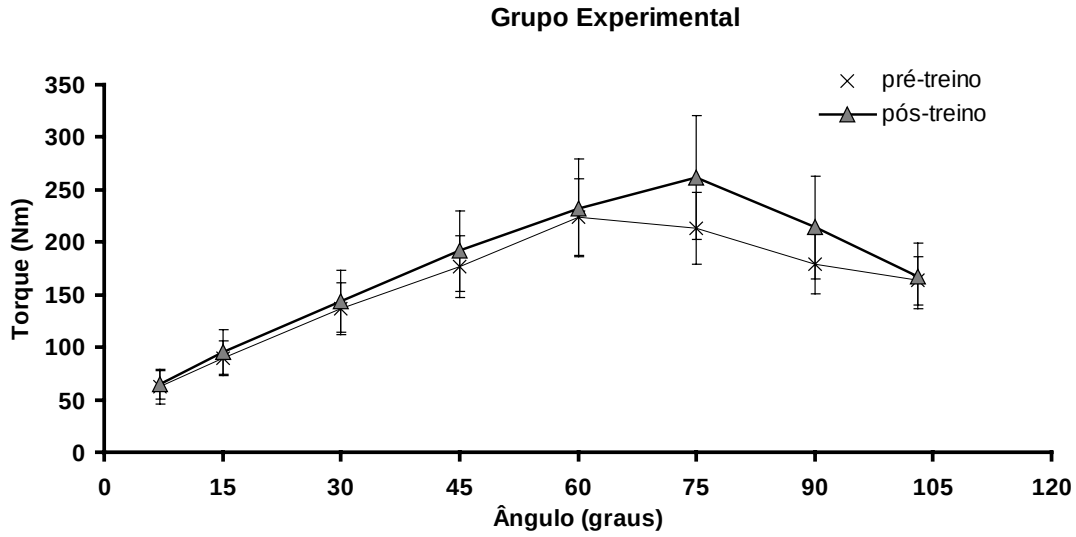

Figura 8. Relação torque-ângulo para valores absolutos de torque do grupo experimental (média e desvio padrão; n=10).

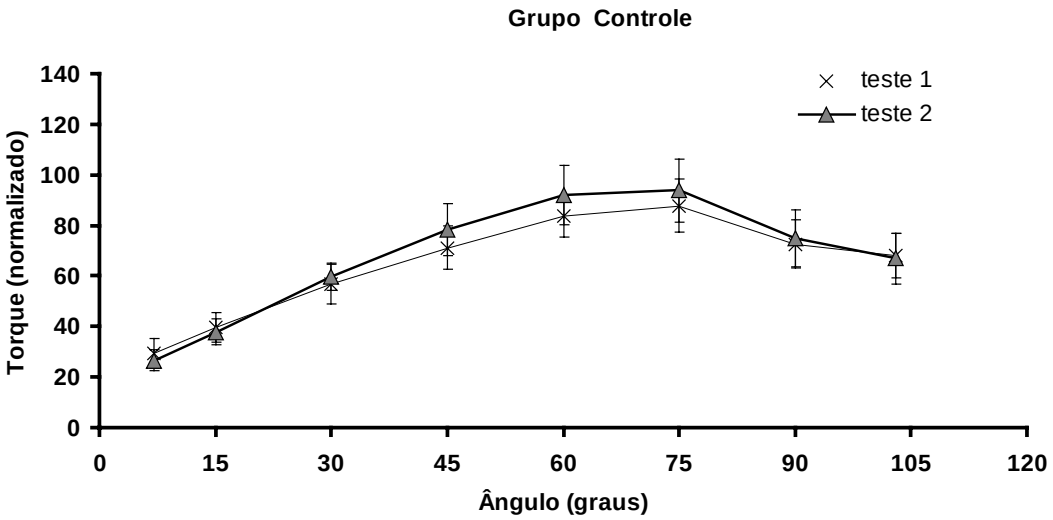

Figura 9. Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo controle. Normalização pela CVM isométrica do primeiro dia de teste (média e desvio padrão; n=11). Aumento generalizado dos valores de torque no teste 2 ($p<0,05$).

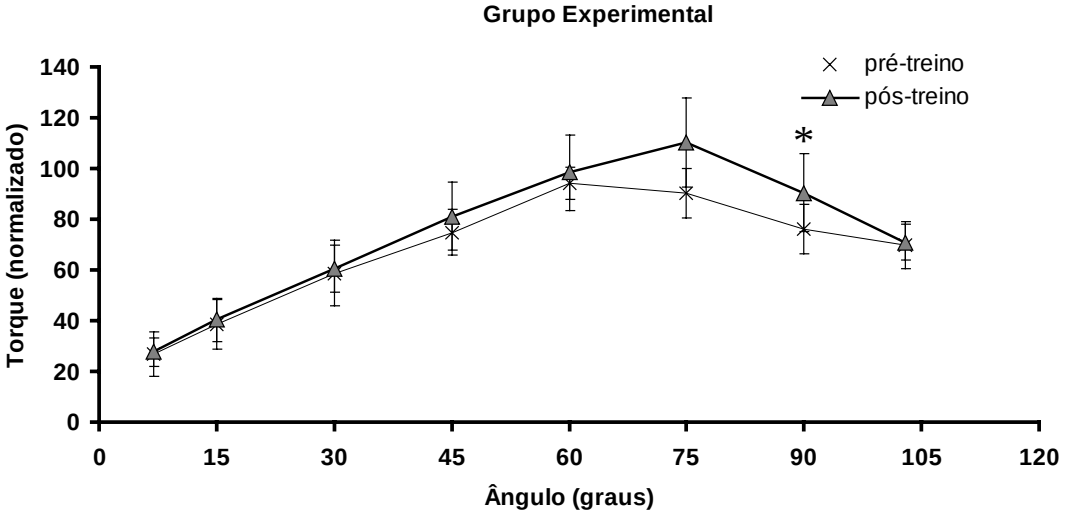

Figura 10. Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo experimental. Normalização pela CVM isométrica do primeiro dia de teste (média e desvio padrão; n=10). * = diferença significativa na comparação entre os testes ($p<0,05$).

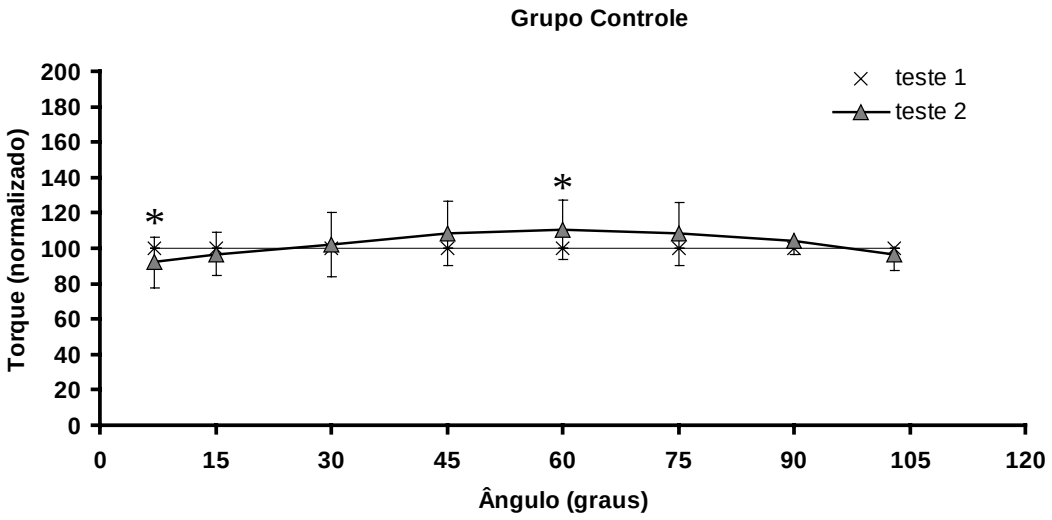

Figura 11. Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo controle. Normalização pelo torque do ângulo específico do primeiro dia de teste (média e desvio padrão; n=11). ∗ = diferença significativa na comparação entre os testes (p<0,05).

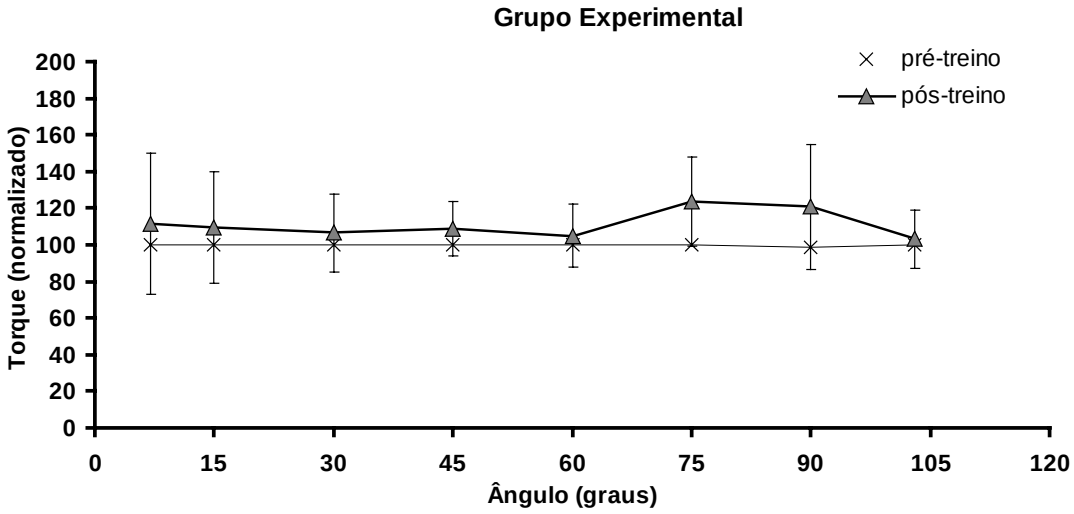

Figura 12. Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo experimental. Normalização pelo torque do ângulo específico do primeiro dia de teste (média e desvio padrão; n=10). Aumento generalizado dos valores de torque pós-treino (p<0,05).

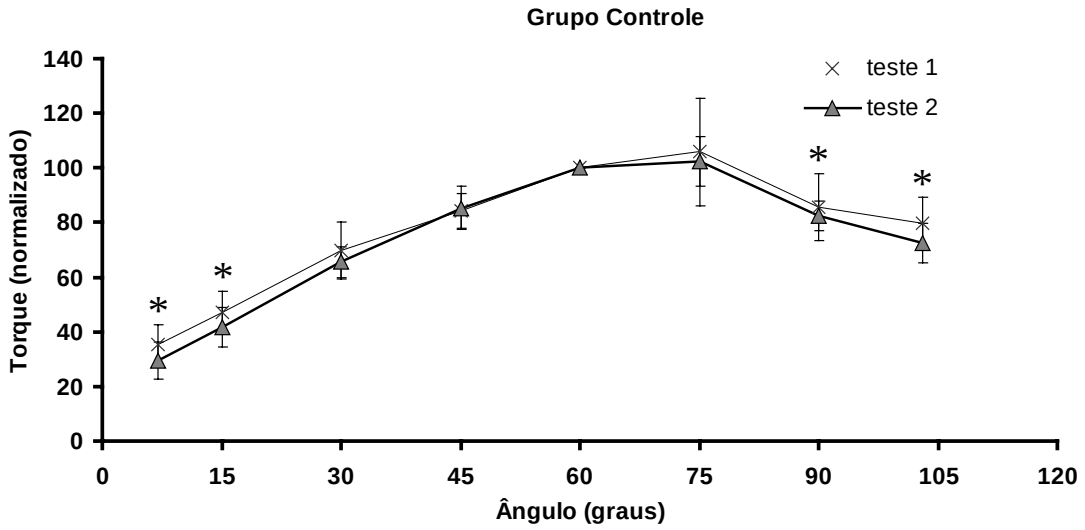

Figura 13. Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo controle. Normalização pelo torque máximo do dia de teste (média e desvio padrão; n=11). * = diferença significativa na comparação entre os testes (p<0,05).

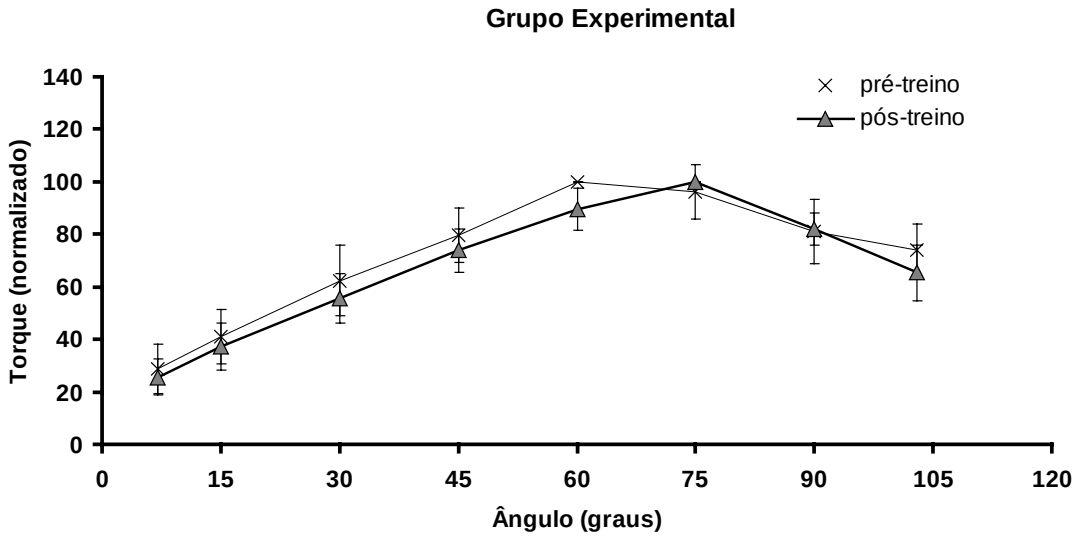

Figura 14. Relação torque-ângulo para valores normalizados de torque do grupo experimental. Normalização pelo torque máximo do dia de teste (média e desvio padrão; n=10).

6.3. EMG - Relação Torque-Velocidade

As figuras 15 e 16 apresentam os valores RMS normalizados pela CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral dos grupos controle e experimental, respectivamente. Não houve diferença significativa na ativação do músculo reto femoral entre os grupos no primeiro dia de teste. Os músculos vasto lateral e vasto medial apresentaram atividade elétrica diferente entre os grupos no teste 1 ($p<0,001$ para ambos músculos). Houve um aumento significativo da ativação do reto femoral do primeiro para o último teste no grupo controle ($p<0,001$) (figura 15) e no grupo experimental ($p<0,001$) (figura 16). Resultados semelhantes foram encontrados para a ativação dos músculos vasto lateral e vasto medial dos dois grupos (resultados não mostrados). No grupo experimental, o aumento foi evidenciado na velocidade angular de -60°/s para o músculo reto femoral (velocidade do treino) (comparação -60°/s com -120°/s: $p=1,0$ pré-treino, $p=0,027$ pós-treino). Para o mesmo músculo, foi verificada uma diminuição não significativa dos valores nas velocidades angulares concêntricas (figura 16).

Em todas as situações para os três músculos, os valores RMS das contrações excêntricas foram significativamente menores quando comparados com contrações concêntricas ($p<0,05$).

6.4. EMG - Relação Torque-Ângulo

As figuras 17 e 18 apresentam os resultados dos valores RMS normalizados pela CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral para os dois grupos, e

são representativos dos resultados encontrados de uma maneira geral para o grupo muscular extensor do joelho. Não foram encontradas diferenças significativas entre os valores RMS dos dois grupos no teste inicial para os músculos reto femoral e vasto medial, sendo que os valores RMS do músculo vasto lateral do grupo experimental foram superiores aos do grupo controle no teste inicial (p=0,008). Também não foram encontradas diferenças nos valores RMS dos testes inicial e final do grupo controle para os músculos reto femoral e vasto lateral e vasto medial. No grupo experimental houve um aumento significativo dos valores RMS normalizados (p= 0,015 reto femoral; p=0,030 vasto lateral) nos ângulos de 45° (comparação 7° com 45°: p=0,262 pré-treino, p=0,038 pós-treino) e 60° (comparação 60° com 90°: p=0,262 pré-treino, p=0,029 pós-treino) para o músculo reto femoral e nos ângulos de 45° (comparação 45° com 103°: p=0,47 pré-treino, p=0,039 pós-treino)e 75° (comparação 75° com 103°: p=0,47 pré-treino, p=0,043 pós-treino), para o músculo vasto lateral.

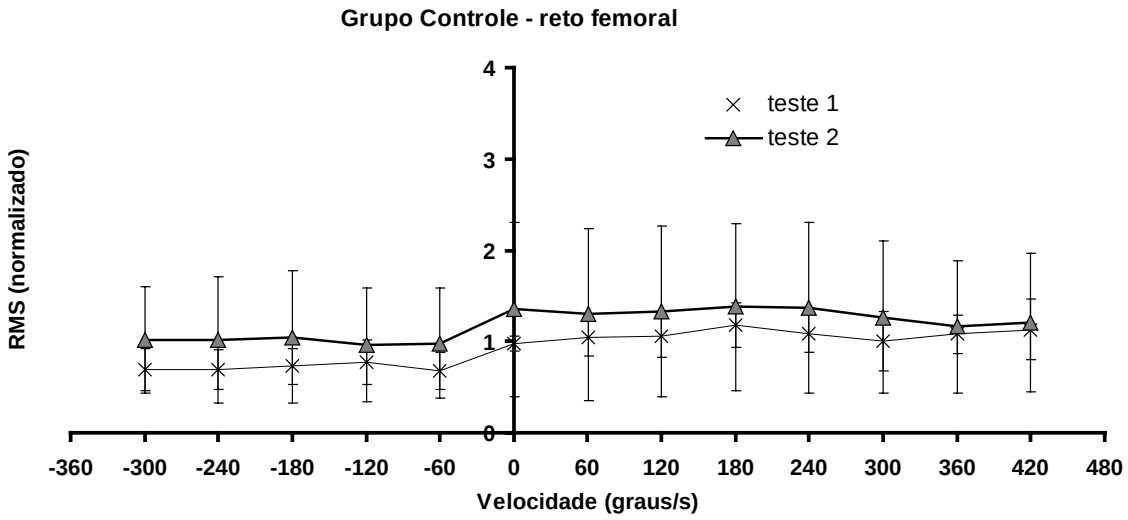

Figura 15. Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral no grupo controle (média e desvio padrão; n=11). Aumento generalizado dos valores RMS no teste 2 ($p<0,05$).

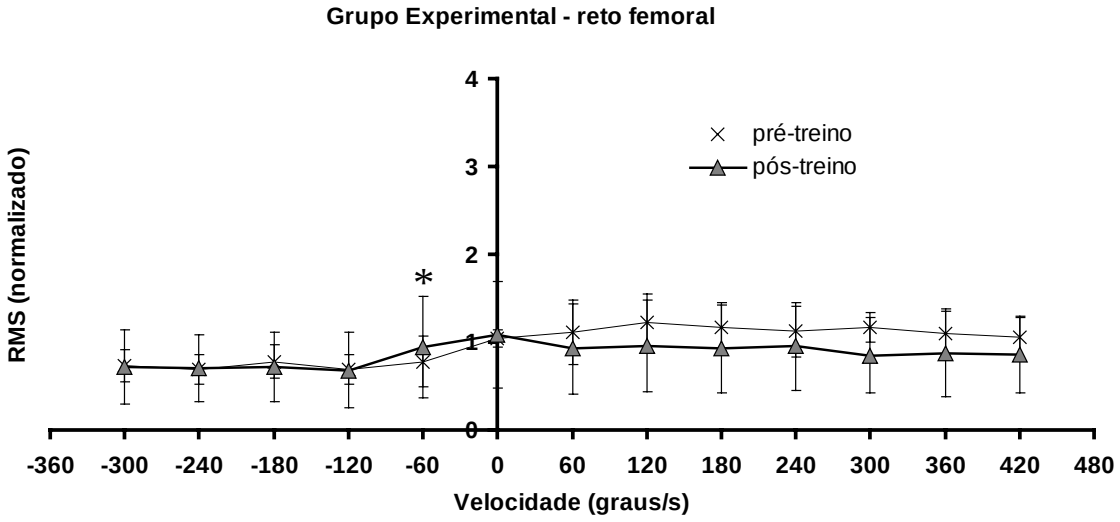

Figura 16. Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral no grupo experimental (média e desvio padrão; n=10). * = diferença significativa ($p<0,05$).

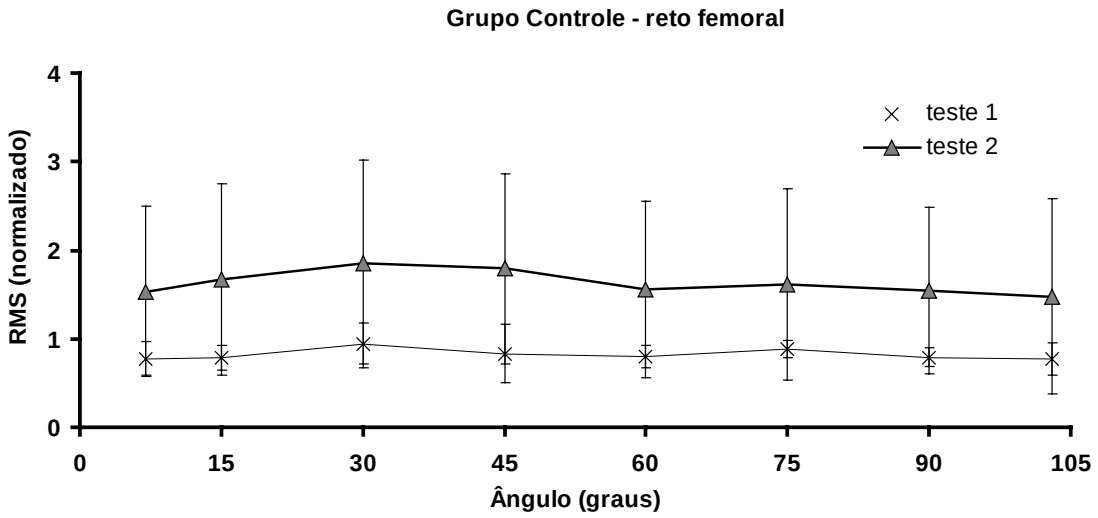

Figura 17. Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral no grupo controle (média e desvio padrão; n=11).

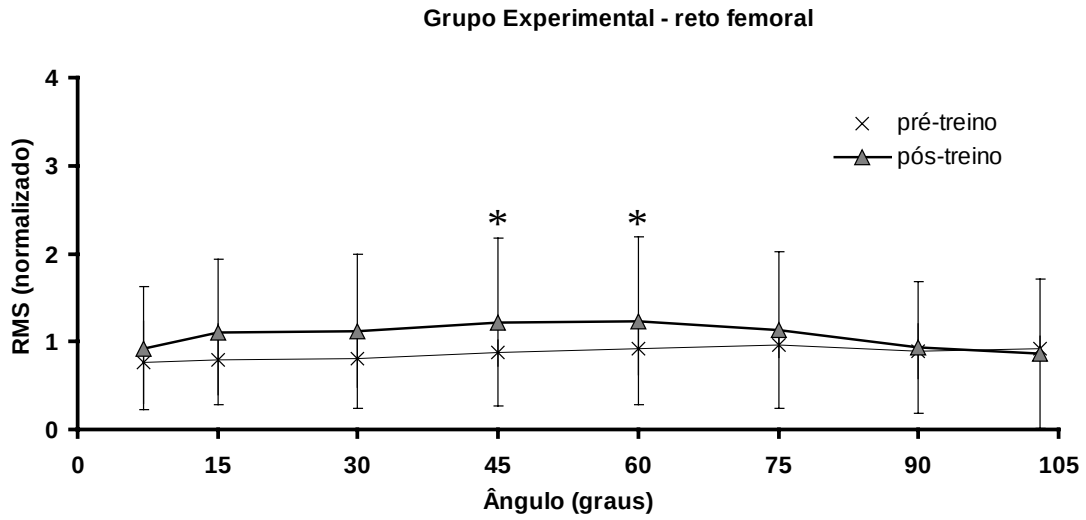

Figura 18. Valores RMS normalizados pelo valor RMS da CVM isométrica do primeiro dia de teste do músculo reto femoral no grupo experimental (média e desvio padrão; n=10). * = diferença significativa ($p<0,05$).

7. DISCUSSÃO

O objetivo do presente estudo foi verificar a influência do treinamento excêntrico, realizado por um período de doze semanas, nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores do joelho em seres humanos. As propriedades mecânicas foram avaliadas através das relações T-V e T-A e as propriedades elétricas através da técnica da EMG. Os resultados deste estudo mostram que adaptações no sistema neuromuscular ocorrem em função da realização de um programa de treinamento excêntrico. As hipóteses inicialmente formuladas serão discutidas a seguir, a partir dos resultados encontrados.

Partindo-se da premissa de que os grupos controle e experimental deveriam ser semelhantes antes da realização do treinamento excêntrico, nossa primeira hipótese era de que não deveria existir diferença nas propriedades mecânicas, mais especificamente na relação T-V, dos dois grupos. Essa hipótese foi confirmada, uma vez que não foi encontrada diferença significativa na relação T-V dos dois grupos na primeira avaliação (figuras 5 e 6).

Considerando-se que o grupo controle não sofreu nenhum tipo de intervenção ao longo de 12 semanas, esperávamos que não ocorresse nenhuma alteração na relação T-V desse grupo entre a primeira e segunda avaliações (hipótese 2). No entanto, houve um aumento na capacidade de produção de torque da segunda para a primeira avaliação que não era esperada (figura 5). Esse aumento na capacidade de produção de torque parece estar relacionado a um efeito de aprendizagem na realização dos testes excêntricos (os quais exigem uma boa coordenação motora) ou de melhora do controle motor na realização dos testes, uma vez que os sujeitos realizaram um teste a

cada quatro semanas. Evidências nesse sentido podem ser observadas na figura 15 (representativa dos resultados de ativação dos músculos extensores do joelho), onde se observa um aumento da ativação elétrica (valores RMS) do músculo reto femoral da segunda para a primeira avaliação.

Nossa terceira hipótese estava baseada no fato de que o treinamento excêntrico altera as propriedades mecânicas do músculo-esquelético a partir de um aumento no número de sarcômeros em série nas fibras do músculo, conforme demonstrado em estudos com animais (LYNN e MORGAN, 1994; KOH e HERZOG, 1998; BUTTERFIELD e HERZOG, 2003 e 2004). Nesse sentido, um aumento no número de sarcômeros em série seria indicado por um aumento da capacidade de produção de força (ou torque) a maiores velocidades angulares concêntricas e excêntricas de movimento.

Apesar de a relação T-V ter sofrido alteração com o treinamento (conforme pode ser observado na figura 6), o aumento na capacidade de produção de torque não ocorreu de forma sistemática em todas as velocidades angulares de movimento. Houve um aumento do torque nas velocidades de 0 a -120°/s com o treinamento, demonstrando apenas um aumento parcial na parte excêntrica da relação T-V.

Esse aumento do torque somente na parte excêntrica da curva parece estar relacionado à especificidade do treinamento (hipótese 4) que foi realizado em uma velocidade angular de movimento de -60°/s. Nossos resultados dão suporte a essa idéia, uma vez que o maior aumento percentual do torque (55%) ocorreu na velocidade de treinamento, sendo quase duas vezes superior ao segundo maior percentual (29%) que ocorreu na velocidade de -120°/s.

Esses achados são semelhantes aos resultados encontrados por LESMES et al. (1978), onde foi observado um aumento significativo do torque na velocidade de treinamento e nas velocidades menores do que a do treino, após 7 semanas de treinamento concêntrico dos músculos extensores do joelho. No presente estudo a menor velocidade avaliada foi a própria velocidade de treinamento (-60°/s), portanto, não foi possível comparar os nossos resultados com os achados de LESMES et al. (1978) em relação a aumento do torque em velocidades menores. Entretanto o estudo de LESMES et al. (1978) não mostrou aumento significativo nas velocidades maiores que a do treino, como demonstrado no presente estudo. Na comparação entre os dois estudos percebe-se que independente do tipo de contração utilizado no treinamento, o torque sofre aumento significativo na velocidade do treino.

Os resultados do presente estudo também concordam com os encontrados por CAIOZZO et al. (1981). Nesse estudo, foi realizado um treinamento concêntrico dos músculos extensores do joelho em velocidades altas (240°/s) e baixas (96°/s). Independente da velocidade utilizada, foi observado um aumento mais significativo na velocidade de treinamento e nas velocidades próximas à velocidade de treinamento.

HORTOBÁGYI et al. (1996) também encontraram aumento significativo do torque apenas em contrações excêntricas, após realizar um treinamento excêntrico de 12 semanas dos músculos extensores de joelho e aumento do torque apenas em contrações concêntricas, após um treinamento concêntrico semelhante. O estudo também mostrou um aumento da área das fibras tipo II significativamente maior no grupo de treinamento excêntrico. Os autores relacionam os resultados com um recrutamento preferencial de fibras musculares tipo II durante contrações excêntricas (ENOKA, 1996; LINNAMO et al., 2003). Segundo HORTOBÁGYI et al. (1996), para o

grupo excêntrico, apenas durante as avaliações excêntricas, existiu a preferência de recrutamento das fibras que sofreram maior hipertrofia, explicando a inexistência de aumento de torque durante as avaliações concêntricas. Entretanto no estudo de HORTOBÁGYI et al. (1996) não foram realizadas avaliações em velocidades diferentes da velocidade do treinamento (-60°/s e 60°/s), o que impossibilita maiores comparações com nossos resultados.

Os resultados da relação T-V diferem dos achados de SMITH e RUTHERFORD (1995). Os autores encontraram aumento significativo do torque concêntrico após 20 semanas de treinamento excêntrico. O torque excêntrico não foi avaliado. O treinamento utilizado pelos autores foi diferente do realizado no presente estudo. No trabalho de SMITH e RUTHERFORD (1995) foi controlado o tempo do movimento, mas não a velocidade e a amplitude de movimento. Além disso, o período de treinamento foi maior. Esses fatores podem influenciar na especificidade da adaptação, e podem ser responsáveis pelas diferenças encontradas entre os estudos.

KOMI e BUSKIRK (1972) também encontraram resultados diferentes dos encontrados no presente trabalho em relação à avaliação da atividade eletromiográfica. Os autores não evidenciaram alterações na atividade elétrica (EMG integrada) do músculo bíceps braquial após 7 semanas de treinamento excêntrico, independente do tipo de contração avaliada (concêntrica ou excêntrica). A velocidade do treinamento e dos testes não foi controlada, apenas calculada a partir do tempo de execução e da amplitude de movimento. Portanto, as alterações encontradas nos valores RMS na velocidade de treino, assim como as diferenças observadas nos músculos vasto lateral e medial pós-treinamento (veja abaixo) diferem dos resultados de KOMI e BUSKIRK

(1972). As diferenças encontradas talvez possam ser explicadas pelo diferente tipo de análise do sinal eletromiográfico realizado pelos dois estudos.

Um dado importante a ser destacado é que as alterações provocadas pelo treinamento excêntrico na relação T-V não podem ser totalmente explicadas pela ativação elétrica (valores RMS), pois não ocorreu um aumento da atividade elétrica somente nas velocidades onde houve aumento dos valores de torque. Houve diferença no comportamento dos valores RMS normalizados do músculo reto femoral, e um pequeno aumento dos valores RMS dos músculos vasto lateral e vasto medial com o treinamento. Além disso, houve um aumento da ativação do músculo reto femoral na velocidade angular de treinamento (-60°/s). Caso a adaptação neural fosse o único fator responsável pelas alterações na capacidade de produção de força dos músculos extensores do joelho, seria de se esperar um aumento dos valores RMS nas velocidades de 0 e -120°/s também, o que não ocorreu. Dessa forma, podemos concluir que os resultados da ativação explicam apenas parcialmente as adaptações ocorridas nesse grupo muscular.

Os resultados de torque e EMG do presente estudo suportam a idéia de que as alterações na capacidade de produção de força dos músculos extensores do joelho devido ao treinamento excêntrico estão relacionadas a adaptações intrínsecas e neurais no grupo experimental, enquanto as alterações ocorridas no grupo controle são indicativas apenas de uma adaptação neural.

A ausência de aumento específico de ativação elétrica dos músculos avaliados na velocidade excêntrica de -120º/s (onde foi evidenciado aumento de torque) pode estar relacionada com o fato de as adaptações neurais precederem as musculares (MORITANI e DEVRIES, 1979; HÄKKINEN e KOMI, 1983; SALE, 1988). Portanto, na

avaliação após 12 semanas de treinamento, provavelmente as adaptações intrínsecas musculares predominaram sobre as neurais, fazendo com que as últimas não fossem significativas no sentido de mostrar aumentos específicos da ativação nas mesmas velocidades onde ocorreu aumento do torque. Segundo KOMI e BUSKIRK (1972) o aumento da força sem aumento da atividade elétrica pode ser explicada pelo fato de que, com o treinamento, um menor número de unidades motoras precisariam ser ativadas para produzir a mesma força de contração. Conseqüentemente, para produzir maiores valores de força, o número de unidades motoras requeridas poderia ser próximo dos valores iniciais (pré-treinamento).

HÄKKINEN e KOMI (1983) também mostraram evidências de uma economia por parte do sistema neuromuscular no decorrer do treinamento. Entretanto a diminuição da atividade elétrica (EMG integrada) dos músculos extensores do joelho apareceu mais tarde nesse estudo. Os valores de força isométrica aumentaram até as primeiras 12 semanas de treinamento concêntrico-excêntrico, com manutenção dos valores nas últimas 4 semanas (total de 16 semanas de treinamento), enquanto a atividade eletromiográfica sofreu aumento até a 12ª semana, com posterior diminuição dos valores. Mesmo com diminuição da atividade elétrica, os valores de força foram mantidos, mostrando uma adaptação predominantemente muscular no final do período de treinamento. Apesar de os grupos musculares serem semelhantes entre o presente estudo e o trabalho de HÄKKINEN e KOMI (1983), talvez o tipo de treinamento (concêntrico-excêntrico, com contrações tanto submáximas quanto máximas) ou o tipo de análise do sinal eletromiográfico utilizado pelos autores tenham sido responsável pelas diferenças entre os estudos.

Os resultados da EMG encontrados discordam em parte com o estudo de HÄKKINEN e KOMI (1983). Os autores encontraram aumento significativo da atividade elétrica do músculo reto femoral após 12 semanas de treinamento. Entretanto o músculo vasto medial sofreu aumento de ativação durante testes isométricos, evidência não verificada no presente estudo. Algumas diferenças podem ser ressaltadas entre os dois estudos, que talvez possam explicar os resultados diferentes. No estudo de HÄKKINEN e KOMI (1983), o treinamento utilizado foi concêntrico-excêntrico, a velocidade do treino não foi controlada e o tipo de análise para quantificação do sinal eletromiográfico utilizada foi EMG integrada.

HORTOBÁGYI et al. (1996) encontraram aumento significativo da atividade elétrica (valores RMS) dos músculos vasto lateral e vasto medial durante contrações excêntricas (-60º/s, velocidade do treino) e isométricas (45º), após treinamento excêntrico de 12 semanas. O aumento não foi evidenciado durante os testes concêntricos. Esses resultados diferem dos resultados do presente estudo em relação ao aumento da ativação em contrações isométricas após o treinamento para o músculo vasto medial. O músculo reto femoral não foi avaliado no trabalho de HORTOBÁGYI et al. (1996). Os autores avaliaram apenas a atividade elétrica na velocidade do treino (-60º/s) e na velocidade concêntrica correspondente (60º/s). Em relação à velocidade do treino, as evidências são semelhantes; entretanto a comparação não pode se ser estendida a outras velocidades angulares.

Na avaliação da atividade elétrica, também foram evidenciados menores valores RMS para as contrações excêntricas quando comparadas com as concêntricas. Esses achados concordam com diversos estudos: KOMI e BUSKIRK, 1972; FANG et al., 2001; BIJKER et al., 2002; GRABINER e OWINGS, 2002. A redução na EMG durante as

contrações excêntricas é associada à ação das estruturas não-contráteis (responsáveis pela força passiva), que não produzem sinal eletromiográfico (PADDON-JONES e ABERNETHY, 2001; ALBERT, 2002). Nesse sentido, o fortalecimento dessas estruturas com o treinamento excêntrico poderia talvez explicar, por exemplo, o aumento do torque nas velocidades de 0°/s e -120°/s sem aumento da ativação elétrica.

As hipóteses 5 e 6 foram formuladas a partir de um raciocínio semelhante ao usado na formulação das hipóteses 1 e 2 da relação T-V, com a única diferença de terem sido formulados para a relação T-A. Nesse sentido, não esperávamos diferenças no torque máximo isométrico em diferentes ângulos entre os grupos (hipótese 5) na avaliação inicial, assim como também não esperávamos diferenças entre as avaliações inicial e final do grupo controle (hipótese 6).

A hipótese 5 foi confirmada, uma vez que a relação T-A dos dois grupos foi semelhante na avaliação inicial (teste 1 x pré-treino). Já a hipótese 6 não foi confirmada, uma vez que houve um aumento do torque nos ângulos intermediários do teste final comparado aos resultados do teste inicial para o grupo controle (figura 9). Novamente aqui, parece ter ocorrido uma melhora do controle motor (ou uma adaptação neural) do grupo controle, uma vez que as médias dos valores RMS normalizados (pela CVM isométrica do teste inicial) dos três músculos se mostrou sempre superior no teste final em relação ao inicial. No entanto, a grande variabilidade dos resultados não possibilitou a determinação de diferenças significativas entre a ativação dos músculos nos dois testes.

A hipótese 7 assumia as mesmas premissas da hipótese 3, ou seja, que o treinamento excêntrico deveria produzir um aumento no número de sarcômeros em série das fibras musculares, segundo as evidências dos efeitos do treinamento

excêntrico dos estudos com animais (LYNN e MORGAN, 1994; KOH e HERZOG, 1998; BUTTERFILED e HERZOG, 2003 e 2004). Segundo o modelo proposto por KOH (1995), um aumento no número de sarcômeros em série provocaria um deslocamento da curva da relação T-A para a direita como um todo, tanto em menores quanto em maiores ângulos articulares (ou comprimentos musculares). Evidências nesse sentido foram fornecidas por WILLIAMS e GOLDSPINK (1978), que mostraram um deslocamento de toda a curva força-comprimento no sentido de maiores comprimentos, juntamente com um aumento do número de sarcômeros em série da fibra muscular do rato, após período de imobilização em comprimentos alongados. Apesar de não termos encontrado estudos com resultados semelhantes, após um período de treinamento excêntrico, esperava-se, portanto, que esse aumento no número de sarcômeros em série produzisse um deslocamento para a direita na relação T-A após o treinamento.

Os resultados da figura 10 demonstram que houve um deslocamento do ângulo de produção de torque máximo do ângulo de 60º para o ângulo de 75º, o que seria condizente com a idéia de aumento no número de sarcômeros em série. No entanto, os resultados do torque normalizado pelo torque inicial (figura 12) e os resultados da normalização pelo torque máximo em cada dia de teste (figura 14) não dão suporte à idéia acima, uma vez que no primeiro caso houve aumento generalizado do torque pós-treino em relação ao pré-treino e, no segundo caso, não houve diferença significativa entre o pré- e o pós-treino nessa relação.

McHUGH (2003) faz alguns questionamentos a respeito do aumento do número de sarcômeros em série como responsável pelo efeito protetor após a realização de um treinamento excêntrico. O autor coloca que apesar de alguns estudos terem demonstrado adição de sarcômeros em animais (LYNN e MORGAN, 1994; KOH e

HERZOG, 1998), NOSAKA e NEWTON (2002) mostraram que um treinamento excêntrico submáximo não confere proteção em contrações excêntricas máximas subseqüentes. Segundo McHUGH (2003), se o efeito protetor estivesse relacionado apenas com aumento do número de sarcômeros em série, a proteção deveria ser evidenciada em qualquer nível de intensidade nas contrações subseqüentes. Além disso, o autor coloca que ainda não foi determinado se o efeito protetor pode ser evidenciado quando as contrações subseqüentes são realizadas em comprimentos maiores do que a do treinamento.

Os resultados da ativação elétrica (valores RMS) dos músculos extensores do joelho demonstram que ocorreram diferenças na ativação entre o pré- e o pós-treino para o grupo experimental nos ângulos de 45° e 60° para o músculo reto femoral (figura 18) e nos ângulos de 45° e 75° para o músculo vasto lateral (resultados não mostrados). Esses resultados não dão suporte à nossa hipótese 10 e são indicativos de que as adaptações funcionais ocorridas no grupo extensor de joelho após 12 semanas de treinamento excêntrico estão relacionadas tanto com adaptações intrínsecas quanto com adaptações neurais.

Por fim, nossas hipóteses 8 e 9 sugeriam que a ativação muscular relativa (valores RMS) dos músculos extensores do joelho deveria ser semelhante entre os grupos antes do treinamento (hipótese 8), e que a ativação desse grupo muscular deveria ser semelhante entre as duas avaliações no grupo controle (hipótese 9). De uma maneira geral, ambas hipóteses foram confirmadas pelos nossos resultados para os músculos extensores do joelho.

Algumas limitações do estudo relacionadas com a EMG devem ser consideradas aqui. O reposicionamento dos eletrodos não foi realizado exatamente no mesmo local,

conforme sugerido por diversos autores (KOMI e BUSKIRK, 1972; HÄKKINEN et al., 1998; HÄKKINEN et al., 2001). Isso pode ter ocasionado um aumento na variabilidade dos resultados. Entretanto LUH et al. (1999) não encontraram diferenças significativas nos valores RMS ao alterar em até 4cm a posição dos eletrodos no músculo bíceps braquial. No presente estudo, diferentes posicionamentos não foram testados; entretanto a remoção dos pêlos no local da colocação dos eletrodos possibilitou um reposicionamento com pequenas variações.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho trouxe evidências de adaptações do sistema neuromuscular provenientes do treinamento excêntrico. Considerando que trabalhos com medidas diretas para estudo dos mecanismos de adaptação funcional em seres humanos são difíceis de serem realizados, o estudo através de medidas indiretas torna-se importante para o esclarecimento desses mecanismos. Entretanto, a partir dos resultados do presente estudo, foi possível notar que alterações das propriedades mecânicas (relacionadas com aumento no número de sarcômeros em série) não são facilmente determináveis com medidas indiretas após um período de treinamento excêntrico de 12 semanas dos músculos extensores do joelho. Caso tenha existido um aumento no número de sarcômeros em série, ele não foi evidente, ou outros mecanismos podem ter predominado sobre as alterações intrínsecas na estrutura do músculo. As alterações neurais parecem ter precedido as musculares, considerando que não foi verificado aumento da atividade elétrica após o período de treinamento em todos os ângulos e velocidades onde foi evidenciado aumento de torque.

A realização de trabalhos que possam trazer mais evidências sobre os mecanismos de adaptação relacionados com um programa de treinamento excêntrico, ainda se mostra necessária para a determinação desses mecanismos. O desenvolvimento de técnicas não invasivas, que possibilitem a avaliação direta da estrutura muscular, também seria extremamente benéfico para o estudo das contrações excêntricas.

9. CONCLUSÃO

O treinamento excêntrico de 12 semanas produz alterações nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores do joelho. Essas alterações se manifestam na relação T-V com um aumento dos valores de torque e dos valores RMS na velocidade de treinamento, e na relação T-A, com uma alteração no ângulo ótimo de produção de torque e um aumento dos valores RMS nos ângulos de 45°, 60° e 75°. As modificações encontradas parecem estar relacionadas tanto com adaptação neural, quanto com adaptações nas estruturas intrínsecas musculares. O mecanismo exato dessas adaptações e as estruturas específicas afetadas pelo treinamento excêntrico ainda necessitam ser determinadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbott BC, Wilkie DR. The relation between velocity of shortening and tension-length curve of skeletal muscle. *J Physiol*, 120: 214-223, 1953.

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

Anderson J, Almeida-Silveira MI, Pérot C. Reflex and muscular adaptations in rat soleus muscle after hindlimb suspension. *J Exp Biol*, 202: 2701-2707, 1999.

Armstrong RB. Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Med Sci Sports Exerc*, 16: 529-538, 1984.

Barash IA, Peters D, Burdi M, Yuan P, Fridén J, Lutz GJ, Lieber RL. Structural and functional changes in muscle after eccentric contractions. *Anais Banff Symposium on Sekeletal Muscle*, Canada, 2002.

Basmajian JV, De Luca CJ. Description and analysis of the EMG signal. *Muscles Alive: Their Functions Reveleated by Electromyography.* Ed John Butler. Baltimore, Williams & Wilkins, 19-167, 1985.

Beltman JGM, Sargeant AJ, vanMechelen W, Haan A. Voluntary activation level and muscle fiber recruitment of human quadriceps during lengthening contractions. *J Appl Physiol*, 97: 619-626, 2004.

Bijker KE, Groot G, Hollander AP. Differences in leg muscle activity during running and cycling in humans. *Eur J Appl Physiol*, 87: 556-561, 2002.

Bochdansky TH, Kollmitzer J, Zwick EB, Lechner H, Leibl K. Studying torque- and EMG -changes during dynamic maximal voluntary contractions. In: Bouisset S, Métral S, Monod H, *Abstr XIVth ISB Congress of Biomechanics*, 1993.

Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. *Med Sci Sports Exerc*, 33: 783-790, 2001.

Butterfield T, Herzog W. Sarcomere number adaptation in the rabbit tibialis anterior after chronic eccentric exercise. *American Society of Biomechanics Congress XXV*, Toledo, Ohio, 2003.

Butterfield TA, Herzog W. Small changes in the timing of activation affects fiber lengths and serial sarcomere number adaptations in rabbit tibialis anterior exposed to eccentric exercise. *American Society of Biomechanics Annual Meeting*, Portland, Oregon, 2004.

Caiozzo VJ, Perrine JJ, Edgerton VR. Training-induced alterations of the in vivo force-velocity relationship of human muscle. *J Appl Physiol,* 51: 750-754, 1981.

Caiozzo VJ, Baker MJ, Herrick RE, Tao M, Baldwin KM. Effect of spacefligth on skeletal muscle: mechanical properties and myosin isoform content of slow muscle. *J Appl Physiol*, 76: 1764-1773, 1994.

Cervieri A, Schneider AF, Zaro M, Vaz MA. Adaptação do braço mecânico do dinamômetro isocinético Cybex (modelo Norm) para medições de flutuações de força. *VII Congresso Brasileiro de Biomecânica,* Florianópolis, 1999.

Clarkson PM, Nosaka K, Braun B. Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med Sci Sports Exerc*, 24: 512-520, 1992.

Clarkson PM. Eccentric exercise and muscle damage. *Int J Sports Med*, 18: S314-S317, 1997.

Close R. Dynamic properties of fast and slow skeletal muscles of the rat during development. *J Physiol*, 173: 74-95, 1964.

Enoka RM. Eccentric contractions require unique activation strategies by nervous system. *J Appl Physiol*, 81: 2339-2346, 1996.

Enoka RM. Neural adaptations with chronic physical activity. *J Biomech*, 30: 447-455, 1997.

Fahlström M, Jonsson P, Lorentzon R, Alfredson H. Chronic Achilles tendon pain treated with eccentric calf-muscle training. *Knee Surg Sports Traumatol Arthosc*, 11: 327-333, 2003.

Fang Y, Siemionow V, Sahgal V, Xiong F, Yue GH. Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions. *J Neurophysiol*, 86: 1764-1772, 2001.

Farthing JP, Chilibeck PD. The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *Eur J Appl Physiol*, 89: 578-586, 2003.

Fenn WO, Marsh BS. Muscular force at different speeds of shortening. *J Physiol*, 85: 277-297, 1935.

Fleck SJ, Kraemer WJ. *Fundamentos do treinamento de força muscular*. Artes Médicas, Porto Alegre, 1999.

Fox EL, Bowers RW, Foss ML. *The Physiological Basis of Physical Education and Athletics*. Dubuque, Wm. C. Brown Publishers, 1989.

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

Fração VB, Vaz MA. Influência da adaptação funcional na relação torque-velocidade de bailarinas clássicas e atletas de voleibol. *IX Congresso Brasileiro de Biomecânica*, 2001a.

Fração VB, Vaz MA. Influence of functional adaptation on the torque-angle relation. 2001b. *XVIII International Society of Biomechanics Congress*, Zürich, 2001b.

Fração VB, Lammerhirt Hm, Vaz MA. Functional adaptation of the dorsiflexor torque-velocity relation. *IV Biomechanics World Congress*, Canada, 2002.

Fridén J, Lieber RL. Structural and mechanical basis of exercise-induced muscle injury. *Med Sci Sports Exerc*, 24: 521-530, 1992.

Fyfe I, Stanish WD. The use of eccentric training and stretching in the treatment and prevention of tendon injuries. *Clin Sports Med*, 11: 601-624, 1992.

Garnett R, Stephens JA. Changes in the recruitment threshold of motor units produced by cutaneous stimulation in man. *J Physiol*, 311:463-473, 1983.

Gomes, AC. *Treinamento Desportivo. Estruturação e Periodização*. Artes Médicas, São Paulo, 2002.

Gordon AM, Huxley AF, Julian FJ. The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. *J Physiol*, 184: 170-192, 1966.

Grabiner MD, Owings TM. EMG differences between concentric and eccentric maximum voluntary contractions are evident prior to movement onset. *Exp Brain Res*, 145: 505-511, 2002.

Gross MT. Chronic tendinitis: pathomechanics of injury, factors affecting the healing response, and treatment. *J Orthop Sports Phys Ther*, 16: 248-255, 1992.

Herzog W, Guimarães AC, Anton MG, Carter-Erdman KA. Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. *Med Sci Sports Exerc,* 23: 1289-1296, 1991.

Herzog W, Kamal S, Clarke HD. Myofilament lengths of cat skeletal muscle: theoretical considerations and functional implications. *J Biomec*, 25: 945-948, 1992.

Herzog W, Ter Keurs HEDJ. A method for determination of force-length relation of selected in-vivo human skeletal muscles. *Pflugers Arch*, 411: 637-641, 1988.

Hill AV. The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc R Soc Lond*, 126:136-195, 1938.

Häkkinen K, Komi PV, Tesch PA. Effect of combined concentric and eccentric strength training and detraining on force-time, muscle fibre, and metabolic characteristics of leg extensor muscles. *Scand J Sports Sci*, 3: 50-58, 1981.

Häkkinen K, Komi PV. Electromyographic changes during strength training and detraining. *Med Sci Sports Exerc*, 15: 455-460, 1983.

Häkkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Mälkia E, Kraemer WJ, Newton RU, Alen M. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol*, 84: 1341-1349, 1998.

Häkkinen K, Pakarinen A, Kraemer WJ, Häkkinen A, Valkeinen H, Alen M. Selective muscle hypertrophy, changes in EMG and force, and serum hormones during strength training in older women. *J Appl Physiol*, 91: 569-580, 2001.

Hortobágyi T, Dempsey L, Fraser D, Zheng D, Hamilton G, Lambert J, Dohm L. Changes in muscle strength, muscle fibre size and myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J Physiol*, 524: 293-304, 2000.

Hortobágyi T, Hill JP , Houmard JA, Fraser DD, Dudek R, Lambert NJ, Israel RG. Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *J Appl Physiol*, 80: 765-772, 1996.

Jensen K, DiFabio RP. Evaluation of eccentric exercise in treatment of patellar tendonitis. *Phys Ther*, 69: 211-218, 1989.

Jones C, Allen T, Talbot J, Morgan DL, Proske U. Changes in the mechanical properties of human and amphibian muscle after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*, 76: 21-31, 1997.

Kandel ER, Schwartz JH, Jessel TM. *Principles of Neural Science*. New York, Elsevier, 1991.

Koh TJ. Do adaptations in serial sarcomere number occur with strength training? *Human Movement Science*, 14: 61-77, 1995.

Koh TJ, Herzog W. Eccentric training does not increase sarcomere number in rabbit dorsiflexor muscles. *J Biomech*, 31: 499-501, 1998.

Komi PV, Buskirk ER. Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics*, 15: 417-434, 1972.

Lesmes GR, Costill DL, Coyle EF, Fink WJ. Muscle strength and power changes during maximal isokinetic training. *Med Sci Sports*, 10: 266-269, 1978.

Lieber LR. *Skeletal Muscle Structure and Function*. Williams and Wilkins, Baltimore, 1992.

Lieber LR, Fridén J. Selective damage of fast glycolytic muscle fibres with eccentric contraction of the rabbit tibialis anterior. *Acta Physiol Scand*, 133: 587-588, 1988.

Linnamo V, Moritani T, Nicol C, Komi PV. Motor unit activation patterns during isometric, concentric and eccentric actions at different force levels. *J Electromyogr Kinesiol,* 13: 93-101, 2003.

Luh JJ, Chang GC, Cheng CK, Lai JS, Kuo TS. Isokinetic elbow joint torques estimation from surface EMG and joint kinematic data: using an artificial neural network model. *J Electromyogr Kinesiol*, 9: 173-183, 1999.

Lynn R, Morgan DL. Decline running produces more sarcomeres in rat vastus intermedius muscle fibers than does incline running. *J Appl Physiol*, 77: 1439-1444, 1994.

McArdlle WD, Katch FI, Katch VL. *Fisiologia do exercício*. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1992.

McHugh MP. Recent advances in the understanding of the repeated bout effect: the protective effect against muscle damage from a single bout of eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports*, 13: 88-97, 2003.

MacLean CL, Tauton JE, ClementDB, Regan WD, Stanish WD. Eccentric kinetic chain exercise as a conservative means of functionally rehabilitating chronic isolated insufficiency of the posterior cruciate ligament. *Clin J Sports Med*, 9: 142-150, 1999.

Morgan DL. New insights into behavior of muscle during active lengthening. *Biophys J*, 57: 209-221, 1990.

Moritani T, DeVries HA. Neural factors vs hypertrophy in time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med Rehabil*, 58: 115-130, 1979.

Nigg BM, Herzog W. *Biomechanics of the Musculo-Skeletal System*. John Wiley & Sons, Toronto, 1994.

Nosaka K, Newton M. Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med Sci Sports Exerc*, 34: 920-907, 2002.

Paddon-Jones D, Abernethy P. Acute adaptation to low volume eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 33: 1213-1219, 2001.

Perrine JJ, Edgerton VR. Muscle force-velocity and power-velocity relationships under isokinetic loading. *Med Sci Sports Exerc*, 10: 159-166, 1978.

Rocha CSS, Vaz MA, Freitas CR. Adaptação Funcional dos Músculos Extensores de Joelho ao Treinamento Excêntrico*. X Congresso Brasileiro de Biomecânica*, Ouro Preto, 2003.

Sale DG. Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, 20: S135-S145, 1988.

Saxton JM, Donnelly AE. Length-specific impairment of skeletal muscle contractile function after eccentric muscle actions in man. *Clin Sci*, 90: 119-125, 1996.

Smith RC, Rutherford OM. The role of metabolites in strength training. I – A comparison of eccentric and concentric contractions. *Eur J Appl Physiol*, 71: 332-336, 1995.

Soderberg, G.L., Knutson, L.M. A guide for use and interpretation of kinesiologic electromyographic data. *Phys Ther*, 80: 485-498, 2000.

Tabary JC, Tabary C, Tardieu C, Tardieu G, Goldspink G. Physiological and structural changes in the cat's soleus muscle due to immobilization at different lengths by plaster casts. *J Physiol*, 224: 231-244, 1972.

Vaz MA, Fração VB, Lammerhirt HM, Rassier DJE, Herzog W. Functional adaptation of the dorsiflexor torque-angle relation. *Banff Symposium on Skeletal Muscle*, Canada, 2002.

Westing SH, Seger JY, Thorstensson A. Effects of electrical stimulation on eccentric and concentric torque-velocity relationships during knee extension in man. *Acta Physiol Scand*, 140: 17-22, 1990.

Williams PE, Goldspink G. Changes in sarcomere length and physiological properties in immobilized muscle. *J Anat*, 127: 459-468, 1978.

Wood AS, Morgan DL, Proske U. Effects of repeated eccentric contractions on structure and mechanical properties of toad sartorius muscle. *Am J Physiol*, 265:C792-C800, 1993.

ANEXO 1

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MÚSCULOS ESQUELÉTICOS

(a) RELAÇÃO FORÇA-VELOCIDADE

NIGG e HERZOG (1994) definem a relação força-velocidade como a relação existente entre a força máxima de um músculo e sua taxa instantânea de alteração de comprimento. O primeiro trabalho que demonstrou a relação entre a carga aplicada e a velocidade de encurtamento da fibra muscular, foi o estudo de FENN e MARSH (1935). Alguns anos depois, HILL (1938) estabeleceu a existência de uma relação hiperbólica para a relação força-velocidade, onde a força diminui de forma exponencial com o aumento da velocidade de encurtamento do músculo (figura 19). Além disso, HILL (1938) descreveu matematicamente essa relação hiperbólica. A curva encontrada por HILL (1938) foi confirmada por vários trabalhos posteriores (CLOSE, 1964; ABBOTT e WILKIE, 1953), e se tornou a curva clássica da relação força-velocidade.

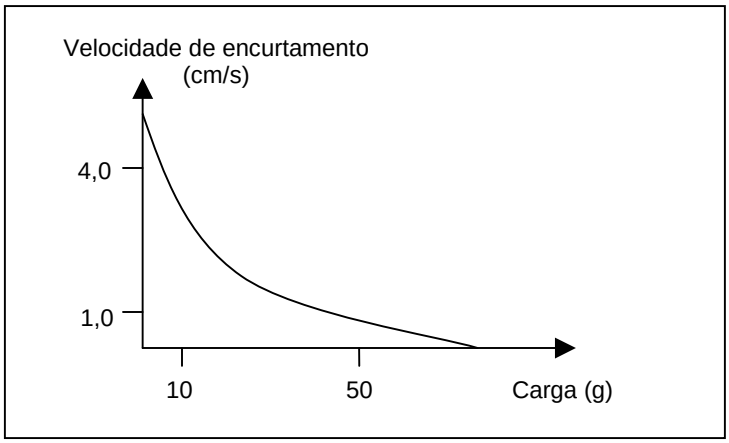

Figura 19. Relação força-velocidade de encurtamento do músculo (adaptado de HILL, 1938).

Para força excêntrica, foi observado um aumento da força com aumento da velocidade em baixas velocidades. Em maiores velocidades, entretanto, a força se manteve em um platô (figura 20) (WESTING et al., 1990).

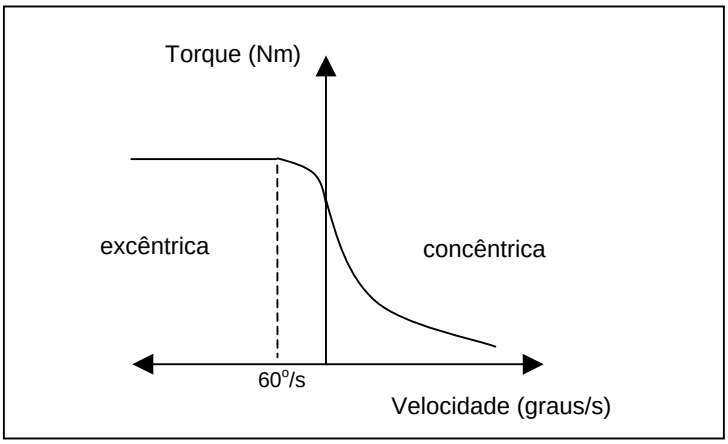

Figura 20. Relação torque-velocidade concêntrica e excêntrica. (adaptado de WESTING et al., 1990).

A dificuldade de mensuração da força produzida pelos músculos individualmente em estudos com seres humanos, levou ao estabelecimento da relação torque-velocidade. Segundo PERRINE e EDGERTON (1978), a determinação da relação força-velocidade *in vivo*, ou seja, relação torque-velocidade, foi possível somente após o surgimento dos dinamômetros isocinéticos em 1967.

(b) RELAÇÃO FORÇA-COMPRIMENTO

De acordo com HERZOG e TER KEURS (1988), a relação força-comprimento descreve a força isométrica máxima que um determinado músculo pode exercer em função do comprimento de seus elementos contráteis. Em 1966, GORDON et al. descreveram a relação força-comprimento ao nível do sarcômero ao estudar fibras

musculares de animais. Neste trabalho, foram produzidas contrações isométricas em diferentes comprimentos do sarcômero, e a força produzida em cada comprimento foi mensurada. Obteve-se, assim, a curva clássica da relação-força comprimento, caracterizada por três fases: ascendente, platô, e descendente (Figura 21).

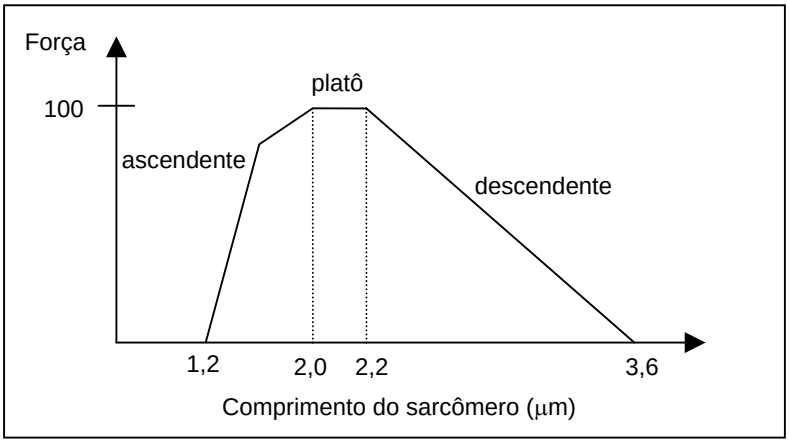

Figura 21. Relação força-comprimento do sarcômero (adaptado de GORDON et al., 1966).

Em estudos com seres humanos, torna-se difícil mensurar a força produzida por cada músculo individualmente e o comprimento muscular. Portanto, nesses estudos, costuma-se estabelecer a relação T-A, onde a articulação é colocada em diferentes ângulos, e é feita a medida do torque produzido por todo o grupo muscular.

ALTERAÇÃO DAS RELAÇÕES FORÇA-VELOCIDADE E FORÇA-COMPRIMENTO

Alterações nas estruturas intrínsecas do músculo podem modificar sua capacidade de produção de força e, conseqüentemente, alterar suas relações força- velocidade e força- comprimento (FRAÇÃO e VAZ, 2000).

Segundo LIEBER (1992), a arquitetura muscular é um dos fatores responsáveis pela alteração da relação força-velocidade de um músculo. Músculos com fibras musculares mais longas deverão continuar produzindo força a velocidades maiores de contração do que músculos com fibras mais curtas, que cessam sua produção de força a velocidades menores (figura 22). Portanto, um aumento no número de sarcômeros em série de uma fibra muscular irá torná-la mais longa, alterando a relação força-velocidade desse músculo.

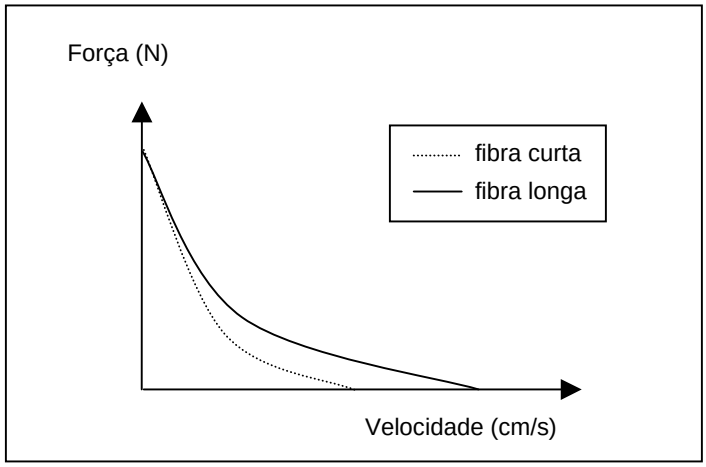

Figura 22. Comparação da relação força-velocidade entre fibras curtas e longas (adaptado de LIEBER, 1992).

Segundo MORGAN (1990), um aumento no número de sarcômeros em série no músculo provoca um deslocamento da curva força-comprimento (ou T-A) para a direita, ou seja, na direção de maiores comprimentos. Se o número de sarcômeros em série de uma fibra muscular for aumentado, os sarcômeros não serão mais capazes de produzir força máxima no mesmo comprimento da fibra (figura 23 A e B). O comprimento ótimo

dos sarcômeros (comprimento no qual é produzida força máxima) passará a ser atingido em comprimentos maiores da fibra (figura 23 C).

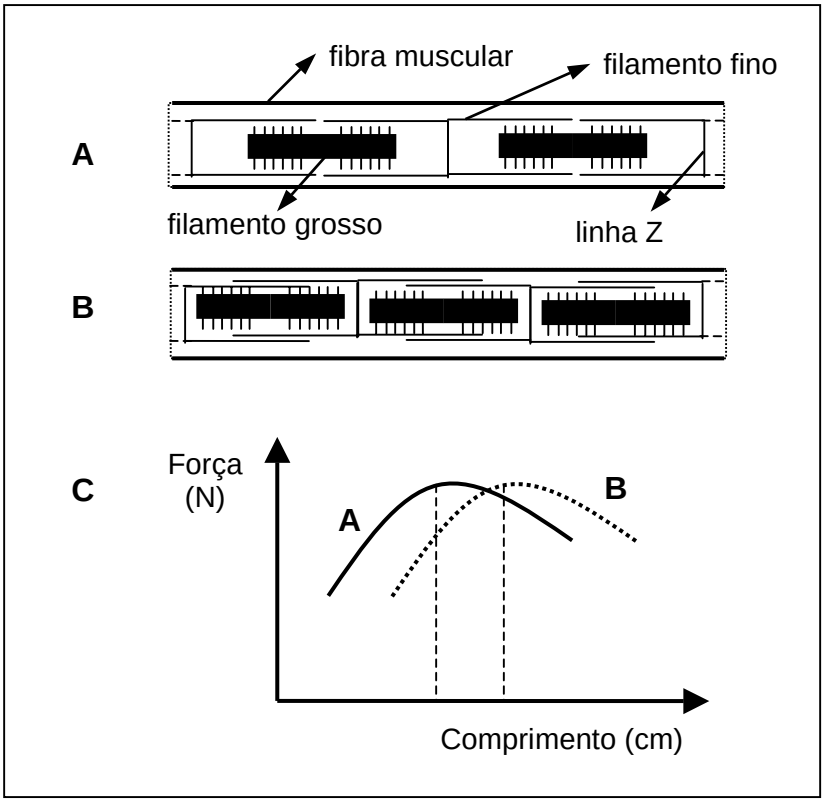

Figura 23. Desenho esquemático de sarcômeros dentro de uma região da fibra muscular. A: sarcômeros em menor número e em seu comprimento ótimo. B: sarcômeros em maior número e em comprimento menor do que o ótimo. C: Relação força-comprimento para as fibras A e B.

ANEXO 2

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA
LABORATÓRIO DE PESQUISA DO EXERCÍCIO

Linha de Pesquisa: BASES NEUROMECÂNICAS DO MOVIMENTO

Título do Projeto: **Influência do treinamento excêntrico nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores do joelho.**

Objetivos: Investigar as alterações das propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores de joelho decorrentes de um período de treinamento excêntrico .

Investigadores: Clarice Sperotto dos Santos Rocha e Marco Aurélio Vaz

Termo de Consentimento do Participante e Sumário Informativo
Grupo Experimental

As propriedades mecânicas dos músculos extensores de joelho serão avaliadas através das relações torque-ângulo e torque-velocidade. A relação torque-ângulo permite determinar a força máxima produzida por um grupo muscular em diferentes ângulos de uma articulação. A relação torque-velocidade determina a força máxima produzida por um grupo muscular durante contrações em diferentes velocidades de movimento.

Para avaliar a força de um grupo muscular utiliza-se a variável “torque”, que representa a força produzida pelo grupo muscular multiplicada pela distância entre o ponto de aplicação da força até o eixo de movimento da articulação. As medidas de torque serão obtidas utilizando-se um equipamento chamado dinamômetro isocinético (marca Cybex).

Além do torque, será avaliada também a ativação dos músculos extensores do joelho durante os protocolos das relações torque-ângulo e torque-velocidade, utilizando-se a técnica da Eletromiografia. A Eletromiografia consiste em uma técnica não-invasiva que detecta a atividade elétrica do músculo por meio de eletrodos colocados na pele do indivíduo.

Nesse estudo, você será submetido a um programa de treinamento constituído por contrações excêntricas (onde o músculo produz força juntamente com aumento de seu comprimento) dos músculos extensores (anteriores) e flexores (posteriores) de joelho durante 12 semanas. O treinamento também será realizado no dinamômetro isocinético.

Esse termo de consentimento, cuja cópia lhe foi entregue, é apenas parte de um processo de consentimento informado. Ele deve lhe dar uma idéia básica do que se

trata o projeto, e o que sua participação envolverá. Se você quiser mais detalhes sobre algo mencionado aqui, ou informação não incluída aqui, sinta-se livre para solicitar. Por favor, leia atentamente esse termo,a fim de que você tenha entendido plenamente o objetivo desse projeto, e o seu envolvimento nesse estudo como sujeito participante. O investigador tem o direito de encerrar o seu envolvimento nesse estudo, caso isso se faça necessário. De igual forma, você pode retirar o seu consentimento em participar no mesmo a qualquer momento. Você será solicitado a participar dos seguintes procedimentos:

1. três contrações voluntárias máximas dos músculos extensores e flexores do joelho (CVM) serão executadas por um período de 5 segundos cada;
2. um protocolo de relação torque-velocidade concêntrica será realizado em sete velocidades angulares diferentes (de 60°/s a 420°/s);
3. um protocolo de relação torque-velocidade excêntrica será realizado em cinco velocidades angulares diferentes (de 60°/s a 300°/s);
4. um protocolo de relação torque-ângulo será realizado em oito ângulos articulares diferentes (de 7° a 103°);
5. será realizado um treinamento com contrações excêntricas de flexores e extensores de joelho direito e esquerdo 3 vezes por semana, durante 12 semanas (constituído de 4-6 séries de 6-12 repetições);
6. os testes descritos nos itens 1, 2, 3 e 4 serão realizados apenas no membro inferior direito e serão repetidos a cada quatro semanas, totalizando 4 avaliações.

O tempo total necessário para a realização dos testes (itens 1,2,3 e 4) acima é, em média, de uma hora. Cada sessão de treinamento dura aproximadamente 20 minutos.

As seguintes informações/dados serão obtidos: nome, idade, peso, estatura, perimetria da coxa e amplitude articular do joelho.

Eletromiografia: O tipo de EMG que será usada requer o posicionamento de eletrodos de superfície na pele. A pele em sua perna, no local do ventre dos músculos reto femoral, vasto lateral e vasto medial será depilada com aparelho de barbear descartável e limpa antes da colocação dos eletrodos. A limpeza consistirá de uma abrasão com algodão embebido no álcool. Será realizada uma marcação temporária no local da colocação dos eletrodos para garantir o mesmo posicionamento na avaliação seguinte.

Riscos e benefícios: Com o programa de treinamento, haverá um aumento na capacidade de produção de força dos músculos extensores de joelho. O programa de treinamento possivelmente irá promover um efeito de proteção contra lesões musculares nos grupos musculares treinados. Além disso, participando desse estudo, você nos ajudará a esclarecer os mecanismos responsáveis pela adaptação funcional promovida pelo treinamento excêntrico. Os riscos ao participante são os seguintes: após a primeira avaliação e após os primeiros dois dias de treinamento, você irá sentir desconforto e dor muscular devido ao esforço excêntrico. Entretanto, durante os próximos dias de treinamento, os sintomas irão desaparecer. Após os testes, poderá

ocorrer também vermelhidão na pele devido à colocação dos eletrodos na mesma. A vermelhidão deverá desaparecer em seguida, sem qualquer comprometimento da pele.

Confidencialidade: Todas as informações obtidas como parte desse estudo permanecerão confidenciais. As únicas pessoas com acesso aos seus resultados pessoais serão os investigadores e bolsistas envolvidos nesse estudo. Qualquer documento publicado apresentando os resultados desse estudo não identificará os participantes.

A sua assinatura nesse formulário indica que você entendeu satisfatoriamente a informação relativa à sua participação nesse projeto e que você concorda em participar como sujeito. De forma alguma esse consentimento lhe faz renunciar aos seus direitos legais, e nem libera os investigadores, patrocinadores, ou instituições envolvidas de suas responsabilidades pessoais ou profissionais. Você está livre para retirar-se do estudo a qualquer momento que assim o queira. A sua participação continuada deve ser tão bem informada quanto o seu consentimento inicial, de modo que você deve se sentir à vontade para solicitar esclarecimentos ou novas informações durante a sua participação . Se tiver qualquer dúvida referente a assuntos relacionados com esta pesquisa, favor contactar a fisioterapeuta Clarice Sperotto dos Santos Rocha (Fones: 3316-58-58 / 91851819) ou o Dr. Marco Aurélio Vaz (Fone: 3316-58-60). Se você tiver dúvidas relativas aos seus direitos como um possível participante dessa pesquisa, favor contactar o Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS.

_____	_____
Assinatura do participante	Assinatura do investigador
_____	_____
Nome por extenso do participante	Data

ANEXO 3

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA
LABORATÓRIO DE PESQUISA DO EXERCÍCIO

Linha de Pesquisa: BASES NEUROMECÂNICAS DO MOVIMENTO

Título do Projeto: **Influência do treinamento excêntrico nas propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores do joelho.**

Objetivos: Investigar as alterações das propriedades mecânicas e elétricas dos músculos extensores de joelho decorrentes de um período de treinamento excêntrico .

Investigadores: Clarice Sperotto dos Santos Rocha e Marco Aurélio Vaz

Termo de Consentimento do Participante e Sumário Informativo
Grupo Controle

As propriedades mecânicas dos músculos extensores de joelho serão avaliadas através das relações torque-ângulo e torque-velocidade. A relação torque-ângulo permite determinar a força máxima produzida por um grupo muscular em diferentes ângulos de uma articulação. A relação torque-velocidade determina a força máxima produzida por um grupo muscular durante contrações em diferentes velocidades de movimento.

Para avaliar a força de um grupo muscular utiliza-se a variável “torque”, que representa a força produzida pelo grupo muscular multiplicada pela distância entre o ponto de aplicação da força até o eixo de movimento da articulação. As medidas de torque serão obtidas utilizando-se um equipamento chamado dinamômetro isocinético (marca Cybex).

Além do torque, será avaliada também a ativação dos músculos extensores do joelho durante os protocolos das relações torque-ângulo e torque-velocidade, utilizando-se a técnica da Eletromiografia. A Eletromiografia consiste em uma técnica não-invasiva que detecta a atividade elétrica do músculo por meio de eletrodos colocados na pele de um sujeito.

Esse termo de consentimento, cuja cópia lhe foi entregue, é apenas parte de um processo de consentimento informado. Ele deve lhe dar uma idéia básica do que se trata o projeto, e o que sua participação envolverá. Se você quiser mais detalhes sobre algo mencionado aqui, ou informação não incluída aqui, sinta-se livre para solicitar. Por favor, leia atentamente esse termo,a fim de que você tenha entendido plenamente o objetivo desse projeto, e o seu envolvimento nesse estudo como sujeito participante. O

investigador tem o direito de encerrar o seu envolvimento nesse estudo, caso isso se faça necessário. De igual forma, você pode retirar o seu consentimento em participar no mesmo a qualquer momento. Você será solicitado a participar dos seguintes procedimentos:

1. três contrações voluntárias máximas (CVM) serão executadas por um período de 5 segundos cada;
2. um protocolo de relação torque-velocidade concêntrica será realizado em sete velocidades angulares diferentes (de 60°/s a 420°/s);
3. um protocolo de relação torque-velocidade excêntrica será realizado em cinco velocidades angulares diferentes (de 60°/s a 300°/s);
4. um protocolo de relação torque-ângulo será realizado em oito ângulos articulares diferentes (de 7° a 103°);
5. os testes descritos nos itens 1,2,3 e 4 serão realizados apenas no membro inferior direito e serão repetidos a cada quatro semanas, totalizando 4 avaliações.

O tempo total necessário para a realização dos testes (itens 1,2,3 e 4) acima é, em média, de uma hora.

As seguintes informações/dados serão obtidos: nome, idade, peso, estatura, perimetria da coxa e amplitude articular do joelho.

Eletromiografia: O tipo de EMG que será usada requer o posicionamento de eletrodos de superfície na pele. A pele em sua perna, no local do ventre dos músculos reto femoral, vasto lateral e vasto medial será depilada com aparelho de barbear descartável e limpa antes da colocação dos eletrodos. A limpeza consistirá de uma abrasão com algodão embebido no álcool. Será realizada uma marcação temporária no local da colocação dos eletrodos para garantir o mesmo posicionamento na avaliação seguinte.

Riscos e benefícios: Apesar de não haver um benefício direto pelo seu envolvimento nesse estudo, você nos ajudará a compreender melhor os mecanismos relacionados com a adaptação funcional do músculo-esquelético submetido a um programa de treinamento excêntrico. Além disso, o conhecimento sobre a adaptação muscular específica ao treinamento excêntrico pode auxiliar na prescrição adequada de exercícios, tanto em indivíduos saudáveis quanto em pacientes que estejam em fase de reabilitação. Os riscos ao participante são os seguintes: desconforto e/ou dor muscular leve com início entre 24-72 horas após o teste, devido ao esforço excêntrico. Os sintomas diminuirão gradativamente, desaparecendo totalmente em torno de dois dias. Poderá ocorrer também vermelhidão na pele devido à colocação dos eletrodos na mesma. A vermelhidão deverá desaparecer em seguida, sem qualquer comprometimento da pele.

Confidencialidade: Todas as informações obtidas como parte desse estudo permanecerão confidenciais. As únicas pessoas com acesso aos seus resultados pessoais serão os investigadores e bolsistas envolvidos nesse estudo. Qualquer

documento publicado apresentando os resultados desse estudo não identificará os participantes.

A sua assinatura nesse formulário indica que você entendeu satisfatoriamente a informação relativa à sua participação nesse projeto e que você concorda em participar como sujeito. De forma alguma esse consentimento lhe faz renunciar aos seus direitos legais, e nem libera os investigadores, patrocinadores, ou instituições envolvidas de suas responsabilidades pessoais ou profissionais. Você está livre para retirar-se do estudo a qualquer momento que assim o queira. A sua participação continuada deve ser tão bem informada quanto o seu consentimento inicial, de modo que você deve se sentir à vontade para solicitar esclarecimentos ou novas informações durante a sua participação . Se tiver qualquer dúvida referente a assuntos relacionados com esta pesquisa, favor contactar a fisioterapeuta Clarice Sperotto dos Santos Rocha (Fones: 3316-58-58 / 91851819) ou o Dr. Marco Aurélio Vaz (Fone: 3316-58-60). Se você tiver dúvidas relativas aos seus direitos como um possível participante dessa pesquisa, favor contactar o Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS.

_____	_____
Assinatura do participante	Assinatura do investigador
_____	_____
Nome por extenso do participante	Data