

Hugo Costa Takahashi
Miguel Arcanjo de Assis

**OS EFEITOS DO FORTALECIMENTO EXCÊNTRICO E EM
POSIÇÕES ESPECÍFICAS SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS MUSCULARES MECÂNICAS:
REVISÃO DA LITERATURA**

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
2008

Hugo Costa Takahashi
Miguel Arcanjo de Assis

**OS EFEITOS DO FORTALECIMENTO EXCÊNTRICO E EM
POSIÇÕES ESPECÍFICAS SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS MUSCULARES MECÂNICAS:
REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Graduação em Fisioterapia da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Fisioterapia.

Orientadora: Prof. Daniela Virgínia Vaz

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
2008

RESUMO

Intervenções a fim de alterar as características musculares mecânicas (CMM) são constantemente utilizadas na prática fisioterapêutica. O alongamento muscular é a intervenção mais comumente utilizada com o intuito de provocar mudanças nas CMM, porém há evidências de que as alterações atingidas com esta técnica não estão relacionadas a mudanças de CMM. Por outro lado, o fortalecimento muscular tem sido apontado como capaz de induzir um processo de remodelação do músculo, gerando mudanças efetivas nas CMM. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão da literatura investigando os efeitos do fortalecimento muscular em angulações específicas e o fortalecimento excêntrico sobre as CMM. Foram encontradas evidências de que o fortalecimento é intervenção capaz de gerar um processo de remodelação tecidual do músculo, alterando assim suas CMM. Aumentos na rigidez e capacidade de absorção de energia foram demonstrados após diversos programas de fortalecimento, provavelmente por um aumento de massa muscular ocorrido após estas intervenções. Um aumento do comprimento muscular além de um aumento da capacidade de absorção de energia foi demonstrado por meio de um programa de fortalecimento em posição alongada. Foi encontrado também evidências sugerindo um aumento do comprimento muscular uma semana após a realização de contrações excêntricas e também após um programa regular de fortalecimento excêntrico. São necessários mais estudos, realizados em humanos e de melhor qualidade metodológica, que demonstrem os efeitos de programas regulares de treinamento e que relacionem a modificação das CMM com o alcance de metas terapêuticas; além de estudos longitudinais para investigar se os ganhos obtidos são duradouros.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	1
2- METODOLOGIA.....	5
3- REVISÃO DA LITERATURA.....	6
3.1- Fortalecimento em posição específica.....	7
3.2- Fortalecimento excêntrico.....	12
4- DISCUSSÃO.....	16
5- CONCLUSÃO.....	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

1 INTRODUÇÃO

Alterações do comprimento e das características mecânicas do músculo estriado esquelético são apontadas como uma das causas de diversas disfunções do movimento¹. Alterações posturais^{2, 3, 4}, lesões musculares^{5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14} e déficits no desempenho funcional^{2, 15, 16, 17, 18, 19} são disfunções comumente relacionadas a estas características musculares.

Características musculares mecânicas (CMM) são determinadas pelo comportamento do músculo quando submetido a cargas mecânicas de deformação, seja durante a contração ativa ou durante o estado de repouso. Estas características estão relacionadas aos componentes estruturais do músculo, como o tecido conectivo intramuscular e as estruturas intracelulares¹, além da sua arquitetura²⁰.

Quando um músculo é isolado e alongado em laboratório, pode-se mensurar a força de resistência contra a deformação desenvolvida pelo tecido em função do seu comprimento. Plotando-se um gráfico obtém-se a curva força-deformação (passive length tension)¹. Esta curva pode ser normalizada, dividindo-se a força de resistência pela área de secção transversa do músculo e a deformação desenvolvida pelo comprimento inicial, obtendo-se assim uma curva força-deformação normalizada (stress-strain), que reproduz as propriedades do tecido, independente do seu tamanho e espessura¹. A rigidez passiva do músculo testado é dada pela razão entre a variação da tensão de resistência oferecida pelo músculo e a variação da deformação imposta sobre ele, ou seja, a inclinação da curva força-deformação¹.

Outra CMM que pode ser extraída da curva força-deformação é a capacidade de absorção de energia pelo músculo, que é dada pela área abaixo da curva^{7, 21, 22, 23, 24}. Músculos mais rígidos e músculos mais longos (com maior capacidade de distender-se sem romper) apresentam uma grande área abaixo da curva força-deformação e, conseqüentemente, maior capacidade de absorção de energia^{23, 24}.

Da mesma forma, pode-se mensurar a relação entre o comprimento e a tensão desenvolvida ativamente por um músculo quando em contração, obtendo-se a curva comprimento-tensão ativa (active length-tension)^{2, 25}. A tensão ativa máxima é produzida em um comprimento ótimo dado pela superposição ideal dos filamentos de actina e miosina, e diminui à medida que o músculo é encurtado ou alongado^{2, 25, 26}.

Em estudos realizados com animais, podem-se realizar métodos cirúrgicos para remoção do músculo e a obtenção direta da curva comprimento-tensão. Porém, como tais métodos não podem ser realizados em humanos, a mensuração da curva torque-ângulo tem sido realizada como forma de fazer inferências sobre mudanças na curva comprimento-tensão após intervenções, uma vez que o braço de alavanca do músculo não sofre variações nas medidas pré e pós intervenção^{8, 9, 15, 19, 23}.

Em situações *in vivo*, em que não é possível realizar mensurações diretas do comprimento muscular, mudanças nessa característica podem ser inferidas por meio da curva comprimento-tensão ativa^{8, 9, 23, 24}. Um aumento do número de sarcômeros em série gera um deslocamento do ponto de geração de força máxima (dada pela sobreposição ideal dos miofilamentos) no sentido de maior comprimento muscular, enquanto uma diminuição do número de sarcômeros gera um

deslocamento do ponto de geração de força máxima no sentido de menor comprimento muscular^{15, 25}.

Outra CMM frequentemente utilizada para se inferir o comprimento muscular é a flexibilidade. Esta propriedade é definida como a capacidade do tecido muscular alongar-se, permitindo que a articulação se movimente ao longo da amplitude de movimento articular (ADM)⁶. Desta forma, a flexibilidade poderia ser operacionalizada como a ADM disponível quando a articulação é submetida a uma força capaz de promover um alongamento dos músculos que a atravessam^{27, 28}. Assim, a adequação dessa medida é limitada para informar sobre o comprimento do músculo, já que a flexibilidade se relaciona a outros fatores, como as propriedades viscoelásticas do tecido muscular^{21, 29} e a tolerância do indivíduo ao alongamento do músculo^{27, 28}.

A importância destas propriedades em várias disfunções de movimento tem sido relatada na literatura. A rigidez passiva e o comprimento muscular são propriedades que contribuem para o alinhamento postural^{2, 3, 4, 30, 31}. Um modelo utilizado para explicitar essa contribuição é a hipótese do ponto de equilíbrio de Bizzi et. al.,³⁰ que propõe que o ponto de intercessão das curvas de rigidez do par de músculos que age sobre uma articulação define seu ponto de equilíbrio e, portanto, seu ponto de repouso. Assim, mudanças no comprimento e rigidez dos músculos que atravessam uma articulação podem alterar sua posição de repouso^{30, 31}.

Além disso, mudanças no ângulo de torque máximo da curva torque ângulo, ou seja, no comprimento em que o músculo é capaz de gerar ativamente a tensão máxima podem aumentar ou diminuir a eficiência do movimento por permitir que os músculos passem a produzir força máxima, durante a execução da atividade, em

um novo comprimento, ou seja, uma nova angulação articular ^{2, 17, 18, 19}. E ainda, intervenções capazes de aumentar a capacidade de absorção de energia de um músculo, por meio do aumento da rigidez e/ou do comprimento muscular podem prevenir lesões musculares, visto que as lesões ocorrem quando a energia aplicada excede a capacidade de absorção e dissipação que o músculo possui ^{7, 22}.

Dessa forma, diante da importância dessas características, várias intervenções têm sido investigadas a fim de determinar seus efeitos na estrutura muscular. Para se gerar alterações prolongadas nas CMM é necessário causar uma mudança da estrutura do músculo, remodelando o tecido muscular ¹.

O alongamento muscular é a intervenção mais comumente utilizada com o intuito de provocar mudanças nas CMM ^{13, 14}. A maioria dos estudos que investigou os efeitos desta intervenção mostrou que há um aumento da ADM articular dos indivíduos testados ^{27, 28}, o que a princípio sugere aumento do comprimento muscular. No entanto, a literatura aponta duas hipóteses explicativas para os ganhos de ADM que não estão relacionadas a mudanças de propriedades musculares mecânicas. Uma delas está associada ao comportamento viscoelástico do músculo, de maneira que os ganhos de ADM observados seriam transitórios ^{21, 29}. Outra explicação seria um aumento da tolerância dos indivíduos ao alongamento ^{27, 28}.

O fortalecimento muscular, por outro lado tem sido apontado como uma forma de remodelar o músculo, por causar um aumento da área de secção transversa do músculo ^{32, 33, 34}, devido a um aumento do número de sarcômeros em paralelo. Outros estudos sugerem que o fortalecimento em posições em que o músculo se encontra alongado ou encurtado ^{23, 24, 31} e o treino muscular priorizando a fase excêntrica ^{8, 9, 10, 15, 35}, podem causar um processo de remodelação muscular

modificando o número de sarcômeros em série, gerando mudanças efetivas nas CMM.

Diante da importância em se determinar que formas de intervenção são capazes de promover mudanças duradouras sobre as CMM, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão da literatura investigando os efeitos de algumas modalidades de fortalecimento, especificamente o fortalecimento em angulações específicas e o fortalecimento excêntrico, sobre as CMM de rigidez passiva, flexibilidade, relação comprimento tensão e capacidade de absorção de energia.

2 METODOLOGIA

Foram realizadas consultas aos bancos de dados Medline, Scielo, Lilacs, PEDro e Cochrane no período de janeiro a dezembro de 2007. Para a busca dos artigos foram utilizadas as palavras chaves: muscle stiffness, length tension curve, stress-strain curve, length tension relationship, combinadas com as palavras strength training, eccentric training, isometric training.

Foram incluídos estudos experimentais e observacionais, realizados tanto em animais quanto em humanos. As buscas foram feitas sem limitações de data, já que estudos clássicos sobre o assunto foram publicados nos anos 80. Os artigos considerados relevantes pelos autores foram incluídos na revisão. Além disso, as listas de referências bibliográficas dos artigos selecionados foram examinadas para obtenção de trabalhos adicionais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Vários estudos demonstraram que músculos submetidos a diferentes tipos de programa de fortalecimento muscular passam por um processo de remodelação tecidual, o que gera mudanças nas suas CMM^{8, 9, 10, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38}. Estudos em animais apontaram aumentos na rigidez e capacidade de absorção de energia de alguns músculos dos membros inferiores após programas de treinamento que envolviam saltos, corridas de alta velocidade (sprints) ou treino de resistência muscular^{37, 38}. Estudos em humanos também relataram um aumento da rigidez e capacidade de absorção de energia de músculos após serem submetidos a programas de fortalecimento isométrico e isotônico^{32, 38}. As mudanças observadas nestas CMM seriam explicadas pelo aumento da área de secção transversa que ocorre em músculos que passam por este tipo intervenção^{33, 34}. Chleboun³⁹ apresentou uma relação linear entre a rigidez angular e o volume dos flexores do cotovelo. Desta forma, qualquer programa de fortalecimento capaz de gerar hipertrofia muscular poderia gerar um aumento da rigidez, e conseqüentemente um aumento da capacidade de absorção de energia do músculo treinado.

Além de o fortalecimento muscular poder gerar alterações das CMM por aumento do trofismo muscular, alguns estudos têm proposto que algumas modalidades de fortalecimento como o fortalecimento em posição alongada/encurtada^{23, 31} e o treino excêntrico^{15, 8, 35, 10, 9, 11, 12, 40, 41} podem gerar outras alterações sobre as CMM através, por exemplo, da mudança do número de sarcômeros em série.

3.1 Fortalecimento em posição específica

Estudos clássicos realizados em animais demonstram que músculos imobilizados em posição encurtada apresentam uma perda do número de sarcômeros em série, com um deslocamento da curva comprimento-tensão para a esquerda, diminuição do comprimento muscular e aumento da rigidez passiva^{26, 42, 43}. Músculos imobilizados em posição alongada apresentam um acréscimo do número de sarcômeros em série, um aumento do seu comprimento e um deslocamento da curva comprimento-tensão para a direita²⁶. Entretanto, foi demonstrado em outros estudos que a associação da eletroestimulação à imobilização em posição alongada e encurtada potencializa os efeitos de adição e redução do número de sarcômeros em série^{42, 43, 44}. Estes resultados sugerem que a contração muscular enquanto o músculo é mantido em posições encurtada ou alongada pode gerar alterações mais potentes sobre a sua estrutura, modificando assim suas características mecânicas.

Segundo Herbert¹, estimular o músculo a trabalhar em angulações onde seu comprimento está aumentado ou diminuído é uma das maneiras mais eficazes de induzir mudanças nas propriedades musculares, por alterar o número de sarcômeros em série. De fato, alguns estudos têm demonstrado que situações em que se altera o padrão de uso de músculos estriados esqueléticos geram alterações em suas características mecânicas por remodelação tecidual^{17, 18, 19, 45}, especialmente quando o músculo passa a ser utilizado em posição mais encurtada ou alongada. Shrager et. al.^{17, 18} demonstraram que o diafragma de ratos com enfisema pulmonar apresentava ângulo ótimo para gerar tensão em uma posição mais encurtada. Cinco meses após a realização de uma cirurgia de redução do

volume pulmonar, o diafragma apresentou um ângulo ótimo para gerar tensão num maior comprimento muscular^{17, 18} e um aumento do número de sarcômeros em série¹⁸. Herzog et. al.¹⁹ demonstrou uma relação comprimento-tensão do músculo reto-femoral diferente entre corredores e ciclistas, sendo que os primeiros geram mais torque com o músculo em posição alongada e os últimos em posição encurtada. Isto seria explicado pelo padrão de uso do reto-femoral destes dois tipos de atletas. Os corredores, que treinam o reto-femoral em comprimentos maiores, teriam músculos com mais sarcômeros em série, e, assim, gerariam mais torque na posição alongada; enquanto os ciclistas, que treinam o reto-femoral em comprimentos menores, apresentariam reto-femoral com menos sarcômeros em série⁴⁶.

O processo de remodelação muscular, por meio alteração do número de sarcômeros em série, também poderia explicar alguns resultados de estudos de treino de força isométrica⁴⁶, quando este é realizado em angulação diferente daquela que o músculo está no comprimento em que gera torque máximo. Kitae e Sale⁴⁷ apresentaram mudanças na relação torque-ângulo de mulheres que realizaram treino isométrico de flexores plantares no ângulo de 0° graus (neutro). A curva torque-ângulo apresentou após a intervenção um aumento significativo da força nos ângulos próximos ao de treinamento (-5, 0 e 5°), além de uma tendência de diminuição da força a partir deste ângulo em direção a dorsiflexão (posição mais alongada), o que não acontecia na curva antes da intervenção. Segundo Koh⁴⁶, os resultados deste estudo poderiam ser explicados por uma diminuição do número de sarcômeros em série, que faria com que os flexores plantares desenvolvessem força máxima numa posição mais encurtada que antes do treinamento.

Como visto até agora, os estudos que demonstraram um processo de alteração das CMM após estimular o músculo a trabalhar em posição encurtada ou alongada foram realizados em animais ^{17, 18, 42, 43, 44, 45}, e/ou foram baseados num processo crônico de adaptação a demanda imposta ^{17, 18, 19, 45}, não de um programa de treinamento de força, como realizado na prática clínica. Há poucos estudos em humanos investigando os efeitos de um programa de fortalecimento muscular em uma angulação onde este músculo se encontra em posição alongada ou encurtada sobre as CMM. Foram realizados três estudos no Programa de Pós-graduação em Ciências da Reabilitação da UFMG que buscaram documentar alterações nas CMM após este tipo de intervenção.

Ocarino ³¹ investigou as alterações da rigidez e posição de repouso do cotovelo após dois modelos de treinamento de hipertrofia muscular de flexores do antebraço: treino em ADM completa e treino em ADM final de flexão (com os flexores em posição encurtada). O treinamento foi realizado três vezes por semana durante dois meses. Ao final do treinamento, foi encontrado um aumento da rigidez articular no grupo que realizou fortalecimento em ADM completa, além de uma mudança da posição de repouso. Este aumento da rigidez seria explicado por uma possível hipertrofia dos flexores após o programa de fortalecimento em ADM completa. Já a mudança na posição de repouso poderia ser explicado pela teoria do ponto de equilíbrio de Bizzi ³⁰. O ponto de intercessão das curvas de rigidez dos flexores e extensores do cotovelo se deslocou no sentido de flexão, já que a rigidez dos flexores aumentou e dos extensores provavelmente não se alterou. No grupo que realizou fortalecimento em posição encurtada, não foi demonstrado aumento da rigidez articular, porém também ocorreu uma mudança da posição de repouso do cotovelo para flexão. Segundo os autores isto seria devido a uma redução do

número de sarcômeros em série associado a uma diminuição do comprimento muscular, deslocando a curva força-deformação para a esquerda e a posição de repouso do cotovelo no sentido de flexão, aplicando mais uma vez da teoria do ponto de equilíbrio de Bizzi³⁰. A ausência de aumento de rigidez neste grupo não corrobora com estudos realizados em animais que demonstraram um aumento da rigidez após intervenções que diminuíram o comprimento muscular, deslocando a curva força-deslocamento para a esquerda^{26, 42, 43, 44}. No entanto, os referidos estudos em animais utilizam modelos de imobilização do músculo em posição encurtada, em contraste com o protocolo de treinamento ativo utilizado pelos autores. A ausência de aumento de rigidez pode ter sido devida ao fato de o volume de trabalho realizado não ter sido suficiente para gerar um aumento do volume muscular necessário para aumentar a rigidez.

Em outro estudo realizado no Programa de Pós-Graduação em Ciências da Reabilitação da UFMG, Aquino²³ comparou os efeitos de um programa de fortalecimento em amplitudes iniciais de flexão de joelho (com os isquiossurais em posição alongada) e de um programa de alongamento passivo desta mesma musculatura sobre as CMM rigidez passiva, flexibilidade, relação comprimento-tensão e energia absorvida. As intervenções foram realizadas 3 vezes por semana durante oito semanas. Este estudo apresentou como principal resultado uma mudança do ângulo de pico de torque no sentido de extensão de joelho, ou seja, em amplitude mais alongada dos isquiossurais no grupo fortalecimento em posição alongada. Esse resultado sugere um aumento do comprimento muscular por meio de um processo de remodelação tecidual por adição de sarcômeros em série. Também foram observados nesse grupo um aumento da tolerância ao alongamento e da energia absorvida. O grupo que realizou alongamento apresentou apenas um

aumento da tolerância ao alongamento, além de um aumento na energia absorvida, porém menor do que aquele observado no grupo que realizou fortalecimento. Este aumento da tolerância obtida no grupo submetido a alongamento foi associado pelos autores a fatores neurofisiológicos, já que não foram observados neste grupo indícios de remodelação associada a um aumento do comprimento muscular. Já no grupo que realizou fortalecimento, o aumento de tolerância pode ter sido produzido pela adição de sarcômeros em série, o que permite a estes músculos serem alongados numa maior amplitude. O aumento da capacidade de absorção de energia em ambos os grupos seria explicado pela maior ADM proporcionada pelo aumento da tolerância ao alongamento durante os testes. Entretanto, o grupo fortalecimento apresentou um aumento mais significativo desta variável. Tal resultado é condizente com a interpretação de ganho de comprimento muscular apenas no grupo que realizou fortalecimento muscular, uma vez que a capacidade de absorção de energia é influenciada por comprimento e rigidez da musculatura^{7,21}.

Em estudo complementar, Brício²⁴ analisou a reversibilidade das modificações das CMM apresentadas por ambos os grupos do estudo de Aquino²³, quatro e oito semanas pós-treinamento. Os resultados demonstraram que não houve perda significativa dos ganhos no ângulo de torque máximo no sentido de extensão observados no grupo fortalecimento, após oito semanas do término do treinamento, sugerindo que o fortalecimento em posição alongada foi capaz de produzir ganhos duradouros no comprimento muscular. Esses ganhos duradouros reforçam a interpretação de ocorrência de remodelação muscular nesse grupo. Em contrapartida, o destreinamento ocasionou uma perda significativa dos ganhos obtidos na tolerância dos indivíduos ao alongamento e na capacidade de absorção de energia pelos isquiossurais, após oito semanas no grupo alongamento e após

quatro semanas no grupo fortalecimento. A perda da capacidade de absorção de energia adquirida pelo treinamento após sua suspensão seria atribuída à redução da tolerância ao alongamento observada nos dois grupos. Como já foi mencionado, a capacidade de absorção de energia por um músculo é influenciada por seu comprimento e rigidez ^{7, 21}. No grupo fortalecimento, uma vez que o ganho de comprimento muscular foi mantido após oito semanas, outro fator, no caso a diminuição da rigidez, seria associado ao resultado de perda da energia absorvida. Esta diminuição da rigidez seria consequência de uma possível perda de trofismo muscular, previamente adquirida pelo treinamento.

Estes foram os únicos estudos experimentais realizados em humanos encontrados nessa revisão. Seus resultados demonstram que um programa de fortalecimento muscular realizado numa angulação onde o músculo se encontra em posição alongada ou encurtada gera alterações sobre as CMM, em especial uma mudança no ângulo de torque máximo, sugerindo um processo de remodelação tecidual por meio da alteração do número de sarcômeros em série.

3.2 Fortalecimento excêntrico

Vários estudos têm demonstrado mudanças das CMM ao se estimular um músculo a realizar contrações excêntricas ^{8, 9, 10, 11, 12, 15, 35, 40, 41}. Segundo Albert ⁴⁸, o termo excêntrico é definido como sendo “uma carga muscular que envolve a aplicação de uma força externa com aumento de tensão durante o alongamento físico da unidade músculo-tendínea” .

Alguns estudos em animais demonstraram que músculos estimulados a contrair excêntrica apresentam um aumento de sarcômeros em série após cinco ¹⁵ ou dez semanas ³⁵. Lynn et. al. ³⁵, em estudo realizado com ratos, demonstrou um aumento significativo do número de sarcômeros em série do músculo vasto intermédio após 5 dias de exercícios excêntricos em uma esteira com declive, com o músculo sendo contraído excêntrica e em posição alongada.

Tem sido relatado com freqüência na literatura que logo após a realização de contrações excêntricas ocorre um deslocamento do ângulo de pico de torque para a direita, ou seja, para uma posição de maior comprimento muscular ^{8, 9, 40}. Brocket ⁸ investigou os efeitos agudos do exercício excêntrico para isquiossurais em indivíduos destreinados demonstrando um deslocamento significativo da curva torque-ângulo para a direita imediatamente após o exercício. Neste caso, o mecanismo da sarcomerogênese demonstrado em animais ^{15, 35} como efeito crônico do treinamento não explica o aumento no ângulo de pico de torque. Um hipótese seria que esse deslocamento seja devido às microrupturas nos sarcômeros, aumentando a complacência muscular ^{8, 9}. Além disso, Brocket ⁸ também observou que o deslocamento se manteve após 8 dias da realização dos exercícios. Esse resultado pode ter sido decorrente de um aumento do número de sarcômeros em série ^{8, 9}.

O único estudo encontrado nessa revisão que demonstra um aumento do ângulo de pico de torque após um protocolo de treinamento excêntrico é um estudo piloto de Clark ¹⁰, que utilizou o mesmo exercício excêntrico usado por Brocket ⁸ em atletas amadores, encontrando uma mudança na posição do pico de torque dos isquiossurais (deslocado para a direita) após 4 semanas de treinamento.

Têm sido propostos dois mecanismos que justificariam o deslocamento da curva comprimento-tensão ativa para a direita após um período de treinamento. Um dos mecanismos seria a adição de sarcômeros em série ^{8, 9, 15, 35} enquanto o outro estaria relacionado um aumento na tensão passiva na posição alongada do músculo devido a uma adaptação estrutural de algumas proteínas do citoesqueleto celular, principalmente a titina ¹². LaStayo et. al. ¹¹ sugere que uma vez que ambos os componentes passivos e ativos do músculo contribuem para a curva comprimento-tensão ativa, um aumento na rigidez passiva em posições onde o músculo se encontra alongado pode deslocar a curva para a direita.

Diante da possibilidade de que a adaptação ao exercício excêntrico envolva a adição de sarcômeros em série, outro efeito associado ao treinamento seria o aumento de comprimento muscular e, conseqüentemente, aumento da flexibilidade. No entanto, somente um estudo na literatura pesquisada relacionou diretamente a flexibilidade ao treino muscular excêntrico. Nelson ⁴⁹ demonstrou que um programa de exercícios excêntricos gerou um ganho de flexibilidade semelhante ao ganho observado em um programa de alongamento passivo.

O exercício excêntrico também tem sido relacionado a uma mudança na rigidez muscular. Este aumento na rigidez passiva tem sido demonstrado de forma aguda ⁴⁰ e crônica (alguns dias após o exercício) ⁴¹. Whitehead ⁴⁰, em um estudo realizado em animais e humanos, demonstrou um aumento da rigidez passiva e deslocamento da curva comprimento-tensão para a direita imediatamente após o exercício excêntrico. Os autores sugerem que o aumento agudo na rigidez muscular pode estar ligado a um aumento na liberação de cálcio provocada pelas microrupturas nos sarcômeros, causando um desequilíbrio na homeostase do cálcio intracelular e, conseqüentemente, microcontraturas no tecido muscular após o

exercício excêntrico. Em outro estudo realizado em ratos, Reich ⁴¹ mostrou que após um período de 8 semanas (30 minutos/5 vezes por semana) de exercícios excêntricos na esteira, ocorreu um aumento significativo na rigidez do músculo tríceps sural.

Não há evidências diretas de efeitos do exercício excêntrico sobre a capacidade de absorção de energia. Entretanto, uma vez que a capacidade de absorção de energia é dada pela área abaixo da curva força-deformação ^{5, 7}, e que músculos mais rígidos e mais longos (com maior capacidade de distender-se sem romper) possuem área maior, o exercício excêntrico pode alterar também essa capacidade de absorção de energia, devido aos resultados apresentados anteriormente de aumento da rigidez ^{40, 41} e deslocamento da curva comprimento-tensão para a direita ^{8, 10, 27}.

4 DISCUSSÃO

Este trabalho constou de uma revisão da literatura a fim de identificar os efeitos de algumas modalidades de fortalecimento, especificamente o fortalecimento em angulações específicas e o fortalecimento excêntrico, sobre algumas CMM. Foram encontradas evidências sugerindo que o fortalecimento é intervenção capaz de gerar um processo de remodelação tecidual do músculo, por meio, principalmente, do acréscimo de sarcômeros em paralelo^{31, 32, 33, 34, 37, 38} e em série^{8, 9, 10, 11, 12, 15, 35, 40, 41}.

Aumentos na rigidez muscular foram demonstrados após programas de treino de resistência³⁸ e força muscular isométrica³² e isotônica³¹, provavelmente por meio de um aumento de massa muscular^{33, 34}. Associado a este aumento de rigidez, um aumento na capacidade de absorção de energia tem sido demonstrado neste tipo de treino de força^{32, 38}. Um aumento da capacidade de absorção de energia também foi demonstrado por meio de um programa de fortalecimento em posição alongada, o que pode ser atribuído a possível hipertrofia e a um aumento do comprimento muscular, observado por um deslocamento da curva comprimento-tensão para a direita após este tipo de intervenção²³.

Tem sido demonstrado também um aumento do ângulo de torque máximo da curva torque-ângulo imediatamente e uma semana após a realização de contrações excêntricas^{8, 9, 40}, e também após um programa regular^{10, 15, 35} de fortalecimento muscular em fase excêntrica. Os mecanismos envolvidos no efeito imediato seriam possíveis microrrupturas nos sarcômeros, aumentando a complacência muscular^{8, 9}. Os mecanismos do efeito crônico (após uma semana ou por meio de treinamento)

seriam um aumento do número de sarcômeros em série^{8, 9, 15, 35} ou um aumento na rigidez passiva em posições onde o músculo se encontra alongado^{11, 12}.

A aplicabilidade destas modalidades de fortalecimento muscular na prática clínica de fisioterapeutas é grande. Frequentemente esses profissionais buscam modificar CMM a fim de alcançar objetivos como melhora da postura dos segmentos corporais^{2, 4, 30}, melhora do desempenho funcional^{2, 15, 16} e prevenção de lesões^{5, 6, 7}.

O alinhamento inadequado dos segmentos corporais pode ser considerado fator contribuinte para o aparecimento de patologias musculoesqueléticas, já que pode levar a padrões de movimento inadequados, aumentando a sobrecarga sobre as estruturas ósseas e tecidos moles². Aplicando-se a teoria do ponto de equilíbrio proposto por Bizzi³⁰, a posição de repouso de uma articulação pode ser alterada com medidas que alterem as CMM rigidez passiva e comprimento muscular.

Ocarino³¹ demonstrou uma alteração da posição de repouso do cotovelo no sentido de flexão em indivíduos que realizaram fortalecimento isotônico devido ao aumento da rigidez dos flexores por uma possível hipertrofia destes músculos. No mesmo estudo também foi observada uma alteração da posição de repouso do cotovelo para flexão no grupo que realizou fortalecimento em posição encurtada, mas não ocorreu aumento da rigidez de flexores deste grupo³¹. A alteração ocorreu devido a uma possível redução do número de sarcômeros em série, deslocando a curva força-deformação para a esquerda³¹.

Dois estudos realizados no Programa de Pós-Graduação em Ciências da Reabilitação da UFMG buscaram relacionar as características mecânicas dos músculos do complexo do ombro com a postura de protrusão de ombros. Anjos³ analisou a força e comprimento dos retradores e protradores da escápula de

indivíduos com e sem protrusão de ombros. Foi observado que os retradores da escápula do primeiro grupo eram mais fracos e mais longos que os do segundo. Esta diferença somente foi encontrada entre os homens avaliados. Não houve diferenças significativas na força e comprimento dos protradores entre os grupos. Lima ⁴ realizou uma série de 4 estudos experimentais de caso único com indivíduos assintomáticos e com protrusão de ombros, nos quais realizou intervenções com o objetivo de alterar as CMM dos músculos escapulo torácicos a fim de corrigir a postura de protrusão de ombros. Os programas de intervenção foram personalizados, uma vez que os exercícios foram determinados com base avaliação clínica de rigidez e força dos músculos tóraco-escapulares de cada indivíduo. Porém, nenhum dos indivíduos apresentou alteração da postura de protrusão de ombros. O autor conclui que o padrão de uso dos músculos tóraco-escapulares durante as demandas ocupacionais parece ser o principal responsável pelas alterações observadas e não o programa de exercícios ⁴. Portanto, intervenções que não modifiquem o padrão de uso dos músculos não parecem ser capazes de reduzir a protrusão de ombros ⁴.

Estes são os únicos estudos encontrados que buscaram relacionar as CMM com alterações posturais comuns a prática clínica. São necessários mais estudos deste tipo, que consigam investigar os efeitos reais de um processo de remodelação tecidual sobre a postura.

Melhoras do movimento funcional também poderiam ser alcançadas com intervenções que alteram as CMM. Intervenções capazes de alterar o ponto ótimo em que o músculo gera tensão podem aumentar ou diminuir a eficiência do movimento por permitir que os músculos passem a produzir força máxima, durante a execução da atividade, em um novo comprimento, ou seja, uma nova angulação ².

^{17, 18, 19}. Além disso, intervenções que buscam alterar a rigidez dos músculos são frequentemente utilizadas, uma vez que esta CMM contribui para padrão de movimento e síndromes de disfunção dos movimentos ².

Os exercícios excêntricos têm sido relatados pela literatura na área da reabilitação demonstrando efeitos positivos na prevenção e na recuperação de lesões ^{9, 11, 12}. A maioria dos estudos sobre exercício excêntrico estão relacionados às lesões por estiramento (strain injuries) principalmente da musculatura dos isquiossurais devido sua alta incidência no esporte de alto desempenho.

Curiosamente, a realização de uma única série de exercícios excêntricos leva a um processo de microlesão nos sarcômeros, induzindo à dor após o exercício ^{8, 9}, no entanto, quando realizados de forma sistemática, os mesmos exercícios podem conferir ao músculo proteção contra lesões e tal efeito é denominado “repeated bout effect” ^{8, 9}. Diferentes mecanismos têm sido propostos para explicar o efeito protetor dos exercícios excêntricos, porém a hipótese mais aceita é o aumento no comprimento das fibras musculares através de adição de sarcômeros em série ^{8, 9, 45, 35} decorrente desses exercícios.

Segundo Morgan ⁵⁰, a parte descendente da curva comprimento-tensão é uma região de instabilidade onde a intensidade da força produzida ativamente diminui progressivamente com o aumento do comprimento muscular. Quando os sarcômeros são alongados durante a contração excêntrica sobre a região descendente, os sarcômeros mais fracos serão mais alongados do que os outros. Estes sarcômeros se tornarão progressivamente mais fracos até não haver mais sobreposições entre seus miofilamentos. Quando as contrações excêntricas se repetem, mais sarcômeros serão estirados, na seqüência dos mais fracos para os mais fortes. Ao final de cada contração, quando o músculo estiver relaxado, certo

número de sarcômeros não irão se reintegrar, o que caracteriza sua ruptura. Os sarcômeros rompidos se dispersarão sem direção através das fibras musculares, aumentando assim sua capacidade de distensão. Os sarcômeros rompidos representam um ponto de fraqueza no músculo e à medida que as contrações se repetem as regiões de rupturas tendem a aumentar até romperem a membrana da fibra muscular.

A adaptação de aumento de comprimento através da adição de sarcômeros em série é útil na medida em que um músculo mais longo irá escapar da região instável da curva (descendente) durante futuras contrações excêntricas ⁹. Assim após uma possível sarcomerogênese, o comprimento do sarcômero será menor para um dado comprimento muscular. De fato, Askilling ¹³ e Arnason ¹⁴ demonstraram em seus estudos que um programa de fortalecimento muscular priorizando a fase excêntrica diminui a incidência de lesões de IQS em atletas de elite.

Somente dois estudos ^{10, 41} em humanos investigaram as alterações sobre as CMM geradas por um treinamento excêntrico regular. São necessários mais estudos, que avaliem os efeitos de um programa de exercícios excêntricos, como são realizados na prática clínica. Além disso, são necessários estudos longitudinais para investigar o efeito de um treinamento de fortalecimento excêntrico nas CMM em longo prazo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho constou de uma revisão da literatura a fim de identificar os efeitos de algumas modalidades de fortalecimento, especificamente o fortalecimento em angulações específicas e o fortalecimento excêntrico, sobre algumas CMM. Foram encontradas evidências sugerindo de que o fortalecimento seja intervenção capaz de gerar um processo efetivo de remodelação tecidual do músculo, gerando alterações nas suas CMM. Porém, a maioria destes estudos foi realizado em animais, e daqueles realizados em humanos, poucos demonstraram os efeitos de diversos programas de fortalecimento realizados em longo prazo. São necessários mais estudos em humanos que demonstrem os efeitos de programas regulares de fortalecimento muscular em posição específica (encurtada ou alongada) e fortalecimento excêntrico, como os que são realizados na prática clínica. São necessários também estudos longitudinais, que demonstrem se os ganhos obtidos pelos programas de fortalecimento são realmente duradouros.

Por fim, são necessários mais estudos que relacionem a modificação das CMM obtidas por diversos tipos intervenção com o alcance de metas terapêuticas como prevenção de lesão, melhora do desempenho e movimento funcional e correção do alinhamento postural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - HERBERT, R. The passive mechanical properties of muscle and their adaptations to altered patterns of use. **Aust. J. physiother.**, v. 34, n. 3, p. 141-149, 1988.
- 2 - SAHRMANN, S.A. ***Diagnosis and Treatment of Movement Impairment Syndromes***, 1st ed. St. Louis: Mosby, 2002. 460 p.
- 3 – ANJOS, M. T. S. **Análise das propriedades musculares de indivíduos com e sem postura de protrusão de ombros**. 2006. 93 f. Dissertação (mestrado em Ciências da reabilitação) – Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- 4 – LIMA, D. B. M. **Análise da eficácia de um programa de intervenção na modificação da postura de protrusão de ombros por meio de exercícios para alteração de propriedades musculares**. 2007. 103 f. Dissertação (mestrado em Ciências da reabilitação) – Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- 5 – KIRKENDALL, D. T.; GARRETT, W. E. Session 2: Eccentric muscle injury: *Clinical Perspectives Regarding Eccentric Muscle Injury*, **Clinical orthopaedics and related research**, n. 403S, p. 81–89, out. 2002.
- 6 - MALONE, T. R.; GARRETT, W. E.; ZACHAZEWSKI, J. E. Muscle: deformation, injury, repair. In: ZACHAZEWSKI, J. E.; MAGEE, D. J.; QUILLEN, W. S. **Athletic injuries and rehabilitation**. Philadelphia: WB Saunders Company, 1996. p. 71-91
- 7 - GARRETT, W.E.; SAFRAN, M.R.; SEABER, A.V.; *et al.* Biomechanical comparison of stimulated and nonstimulated skeletal muscle pulled to failure. **Am J Sports Med**, v. 15, n.5, p. 448-454, Sept. 1987
- 8 - BROCKETT C.L.; MORGAN, D.L.; PROSKE, U. Human hamstring muscle adapt to eccentric exercises by changing optimum length. **Med. Sci. Sports Exerc.**, v. 33, n. 5, p. 783-790. 2001.
- 9 - PROSKE, U.; MORGAN, D.L.; BROCKETT, C. and Percival, P. Identifying athletes at risk of hamstring strains and how to protect them. **Clin. Exp. Pharmacol. Physiol.** V. 31, p. 546-550, 2004.

10 – CLARK, R.; *et al.* The effects of hamstring strength training on dynamic jumping performance and isokinetic strength parameters. **Phys Ther Sport**, 6: p 67-73 2005

11 – LASTAYO, P. C.; *et al.* Eccentric muscle contractions: Their contribution to injury, prevention, rehabilitation, and sport. **Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy**, v. 33, p. 557–571, 2003.

12 – BRUMHELLI, M; CRONIN, J. Altering the length-tension relationship with eccentric exercise: implications for performance and injury. **Sports Med.**; v. 37 n. 9, p. 807-26, 2007.

13 - ASKLING C.; KARLSSON J.; THORSTENSSON, A. Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. **Scand. J. Med. Sci. Sports**, v. 13, p. 244–250, 2003

14 – ARNASON, A. *et al.* Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. **Scand. J. Med. Sci. Sports**, 2006.

15 – LYNN, R.; TALBOT, J. A.; MORGAN, D. L. Differences in rats skeletal muscles after incline and decline running. **J. Appl. Physiol.**, v. 85, n. 1, p. 98-104, 1998.

16 - VAZ, D. V. *et al.* Alterações musculares em indivíduos com lesão do neurônio motor superior. **Fisiot. e Pesq.** v. 13, n. 2, p. 71-82, 2006.

17 – SHRAGTER, J. B. *et al.* Lung volume reduction surgery restores the normal diaphragmatic length-tension relationship in emphysematous rats. **J of Thorac Cardiovasc Surg**, v. 121, n. 2, p. 217-224, fev. 2001.

18 - SHRAGTER, J. B. *et al.* Sarcomeres Are Added in Series to Emphysematous Rat Diaphragm After Lung Volume Reduction Surgery. **Chest**, v. 121, n. 1, p. 210-215, 2002.

19 – HERZOG, W.; GUIMARAES, A.C.; ANTON, M.G.; *et al.* Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. **Med Sci Sports Exerc**, v. 23, n.11, p. 1289-1296, Nov. 1991.

20 – LIEBER, R. L.; FRIDÉN, J. Functional and Significance of skeletal muscle architecture. **Muscle and Nerve**, v. 27, n. 2, p. 157-64, fev 2003.

21 - TAYLOR, D.C.; DALTON, J.D.; SEABER, A.V.; *et al.* Viscoelastic properties of muscle-tendon units. The biomechanical effects of stretching. **Am J Sports Med**, v. 18, n. 3, p. 300-309, May 1990.

22 - GARRET, W. E. Muscle strain injuries: clinical and basic aspects. **Med. Sci. Sports Exerc.**, v. 22, n. 4, p. 436-443, 1990.

23 - AQUINO, C. F. **Comparação de dois programas de intervenção para modificação de propriedades musculares: fortalecimento em amplitudes iniciais de movimento x alongamento muscular.** 2005. 78f. Dissertação (mestrado em Ciências da reabilitação) – Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

24 – BRÍCIO, R.M. **Análise da reversibilidade das modificações nas propriedades mecânicas musculares produzidas pelo alongamento muscular e fortalecimento em posição alongada: um estudo de *follow-up*.** 2006. 49f. Dissertação (mestrado em Ciências da reabilitação) – Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

25 - HERRING, S.W.; GRIMM, A.F.; GRIMM, B.R. Regulation of sarcomere number in skeletal muscle: a comparison of hypotheses. **Muscle Nerve**, v. 7, n. 2, p. 161-173, Feb. 1984.

26 - WILLIAMS, P.E.; GOLDSPINK, G. Changes in sarcomere length and physiological properties in immobilized muscle. **J Anat**, v. 127, n.Pt 3, p. 459- 468, Dec. 1978.

27 - MAGNUSSON, S.P.; SIMONSEN, E.B.; AAGAARD, P.; *et al.* A mechanism for altered flexibility in human skeletal muscle. **J Physiol**, v. 497 (Pt 1), p. 291-298, Nov. 1996.

28 - MAGNUSSON, S.P.; SIMONSEN, E.B.; AAGAARD, P.; *et al.* Biomechanical responses to repeated stretches in human hamstring muscle in vivo. **Am J Sports Med**, v. 24, n.5, p. 622-628, Sept. 1996.

29 – TAYLOR, D.C.; BROOKS, D.E.; RYAN, J.B. Viscoelastic characteristics of muscle: passive stretching versus muscular contractions. **Med Sci Sports Exerc**, v. 29, n. 12, p. 1619-1624, 1997.

30 - BIZZI, E. *et al.* Does the nervous system use equilibrium point control to guide single and multiple joint movements. **Behav. Brain Sci.**, v. 15, p. 603-615. 1992.

31 - OCARINO, J. M. *et al.* Alterations of stiffness and resting position of the elbow joint following flexors resistance training. **Manual Therapy**, v. 5, jun. 2007.

32 – KLINGE, K. *et al.* The Effect of Strength and Flexibility Training on Skeletal muscle Electromyographic Activity, Stiffness, and Viscoelastic Stress Relaxation response. **Am J Sports Med**, v. 25, n. 5, p. 710-716, 1997.

33 – MIKESKY, A. E. *et al.* Changes in muscle fiber size and composition in response to heavy-resistance exercise. **Med Sci Sports Exerc**, v. 23, n.9, p. 1042-1049, 1991.

34 – GARFINKEL, S.; CAFARELLI, E. Relative changes in maximal force, EMG, and muscle cross-sectional area after isometric training. **Med Sci Sports Exerc**, v. 24, n. 11, p. 1220-1227, 1992.

35 – BUTTERFIELD, T. A.; LEONARD, T. R.; HERZOG, W. Differential serial sarcomere number adaptations in knee extensor muscles of rats is contraction type dependent. **J. Appl. Physiol.**, v. 99, p. 1352–1358, jun. 2005.

36 – KOVANEN, V.; SUOMINEN, H.; HEIKKINEN, E. Mechanical properties of fast and slow skeletal muscle with special reference to collagen and endurance training. **J Biomech**, v. 17, n. 10, p. 725- 35, 1984.

37 – MUNIZ, J. *et al.* Effects of sprint and endurance training on passive stress-strain relation of fast- and slow-twitch skeletal muscle in Wistar rat. **Acta, Physiol. Scand**, v. 173, n. 2, p. 207-212, 2001.

38 – DUCOMPS, C. *et al.* The effect of jumping training on passive mechanical stress and stiffness in rabbit skeletal muscle: role of collagen. **Acta Physiol Scand**, v. 178, n.3, p. 215-224, 2003

39 – CHLEBOUN, G.S. *et al.* The relationship between elbow flexor volume and angular stiffness at the elbow. **Clin Biomech (Bristol , Avon)**, v. 12, n. 6, p. 383-92, Sept. 1997

40 – WHITEHEAD, N. P. *et al.* Changes in passive tension of muscle in humans and animals after eccentric exercise. **Journal of Physiology**, 533(2), p. 593–604, 2001

41 – REICH, T. E. *et al.* Is the spring quality of muscle plastic? **American Journal Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology**, v. 278, p. 1661–1666, 2000

42 – WILLIAMS, P.E. *et al.* The importance of stretch and contractile activity in the prevention of connective tissue accumulation in muscle. **J Anat**, v. 158, p. 109-114 1988.

43 – JAKUBIEC-PUKA, A.; CARRARO, U. Remodelling of the contractile apparatus of striated muscle stimulated electrically in a shortened position. **J Anat**, v. 178, p. 83-100, 1991.

44 – WILLIAMS, P.; WATT, P.; BICIK, V.; *et al.* Effect of stretch combined with electrical stimulation on the type of sarcomeres produced at the ends of muscle fibers. **Exp Neurol**, v. 93, n.3, p. 500-509, Sept. 1986.

45 – KOH, T.J.; HERZOG, W. Excursion is important in regulating sarcomere number in the growing rabbit tibialis anterior. **J Physiol**, v. 508 (Pt 1), p. 267-280, Apr.1998.

46 – KOH, T.J. Do adaptations in serial sarcomere number occur with strength training? **Human Movement Science**, v. 14, p. 61-77, 1995.

47 – KITAI, T.A.; SALE, D.G. Specificity of joint angle in isometric training. **Eur J Appl Physiol Occup Physiol**, V. 58, P. 744-748, 1989: APUD: KOH, T.J. Do adaptations in serial sarcomere number occur with strengthtraining? **Human Movement Science**, v. 14, p. 61-77, 1995.

48 – ALBERT, M. **Treinamento excêntrico em esportes e reabilitação**. São Paulo,SP: Manole, 2002

49 – NELSON, R. T.; BANDY, W. D. Eccentric training and Static stretching improve Hamstring Flexibility of High School Males. **J. Athl. Train.**, v. 39, n. 3, p. 254-258, 2004

50 – MORGAN D. L. New insights into the behavior of muscle during active lengthening. **Biophys. J.**, v. 57, p. 209–21, 1990.