

Arquitetura muscular e envelhecimento: adaptação funcional e aspectos clínicos; revisão da literatura

Muscle architecture and aging: functional adaptation and clinical aspects; a literature review

Rafael Reimann Baptista¹, Marco Aurélio Vaz²

Estudo desenvolvido no Laboratório de Pesquisa do Exercício da Esef/UFRGS – Escola de Educação Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

¹ Prof. assistente da Faculdade de Educação Física e Ciências do Desporto da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

² Prof. associado da Esef/ UFRGS

ENDEREÇO PARA
CORRESPONDÊNCIA

Marco Aurélio Vaz
Laboratório de Pesquisa do Exercício, Esef/ UFRGS
R. Felizardo 750 Jardim Botânico
90690-200 Porto Alegre RS
e-mail: marcovaz@esef.ufrgs.br

APRESENTAÇÃO
mar. 2009

ACEITO PARA PUBLICAÇÃO
out. 2009

RESUMO: O envelhecimento é associado a um progressivo declínio na massa muscular, conhecido como sarcopenia, que afeta diretamente a arquitetura e a capacidade de produção de força muscular. O objetivo deste artigo foi revisar a literatura sobre os efeitos do envelhecimento sobre a arquitetura muscular, bem como revisar as principais evidências dos efeitos de programas de treinamento de força nas propriedades morfológicas da musculatura esquelética, discutindo as implicações clínicas da adaptação funcional na população idosa. Foram selecionados 42 artigos publicados entre 1993 e 2008 nas bases de dados Pubmed, Science Direct e Scopus, utilizando os descritores *aging*, *older adults*, *elderly*, *muscle architecture*, *strength training* e *resistance training*. Os artigos revisados suportam a idéia de que existem diferenças na arquitetura do músculo esquelético de idosos acometidos por sarcopenia quando comparados a adultos jovens saudáveis. As evidências parecem ser unânimes quanto à redução no volume, área de seção transversa fisiológica e ângulo de penação do músculo esquelético de idosos. Além disso, também há evidências de que o envelhecimento determina uma redução do comprimento fascicular e da espessura muscular, o que gera uma redução também da área de seção transversa anatômica. Programas terapêuticos de treinamento de força têm sido utilizados com o objetivo de retardar e até mesmo reverter os efeitos do envelhecimento sobre a musculatura dos idosos.

DESCRIPTORES: Adaptação fisiológica; Envelhecimento; Músculo esquelético

ABSTRACT: Ageing is associated to a progressive decline in muscle mass – a phenomenon known as sarcopenia – which directly affects muscle architecture and force production capacity. The purpose of this study was to review current literature on the effects of aging on muscle architecture, as well as review evidences on the effects of resistance training programs onto morphological properties of skeletal muscles, also discussing clinical implications of functional adaptation among the elderly. Forty-two articles, published between 1993 and 2008, were selected from Pubmed, Science Direct and Scopus databases, by using the key words *aging*, *older adults*, *elderly*, *muscle architecture*, *strength training*, and *resistance training*. The reviewed studies support the idea that there are differences in the architecture of elderly affected by sarcopenia when compared to healthy young adults. Evidences seem to be unanimous as to reduction in skeletal muscle volume, physiological cross sectional area and pennation angle due to aging. Aging also leads to a reduction in fascicular length and muscle width, which determines a reduction in anatomical cross-sectional area. Strength training programs have been used as a therapeutic technique in order to postpone or even revert aging effects on elderly skeletal muscle.

KEY WORDS: Adaptation, physiological; Ageing; Muscle, skeletal

INTRODUÇÃO

Os avanços da medicina e os relativamente recentes incentivos à prevenção de doenças na população têm gerado um aumento na longevidade e expectativa de vida dos indivíduos. Por outro lado, os avanços tecnológicos facilitaram a adoção de um estilo de vida sedentário, o que faz com que nem sempre esses indivíduos alcancem a terceira idade com a saúde e qualidade de vida esperada.

A OMS – Organização Mundial da Saúde – define a população idosa como acima dos 60 anos, mas faz uma distinção quanto ao país de origem dos idosos. Esse limite é válido para países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, mas sobe para 65 anos quando se trata de países desenvolvidos¹. O envelhecimento da população brasileira acompanha uma tendência internacional impulsionada pela queda da taxa de natalidade e pelos avanços da biotecnologia². De modo geral, vem se observando um crescimento da população de idosos de forma mais acentuada nos países em desenvolvimento, embora esse contingente ainda seja proporcionalmente bem inferior ao encontrado nos países desenvolvidos. A Alemanha, por exemplo, apresentava em 1999 21,8% de pessoas com 60 anos ou mais de idade, enquanto o Brasil no mesmo ano apresentava 8,6%². Nesse sentido, faz-se necessário estudar o idoso brasileiro, que em 2000 já configurava um contingente de quase 15 milhões de pessoas².

Diversas evidências têm apontado para o fato de que o envelhecimento está associado a um progressivo declínio na massa muscular, fenômeno conhecido como sarcopenia³. A sarcopenia afeta diretamente a arquitetura muscular, reduzindo a área de seção transversa anatômica (ASTA), comprimento das fibras musculares, volume e ângulo de penação dos músculos, além de reduzir a capacidade de produção de força específica, ou seja, a força produzida por unidade de massa muscular⁴.

Com os avanços tecnológicos a área da Biomecânica iniciou nas duas últimas décadas o estudo da estrutura muscular esquelética *in vivo* por meio da ultrasonografia. Em função da possibilidade de se estudar a plasticidade muscular, a comunidade científica passou a dar

atenção para o que se convencionou chamar de arquitetura muscular. O estudo por ultra-sonografia da musculatura e medição *in vivo* da arquitetura muscular foi validado por medições anatômicas diretas em cadáveres humanos^{5,6}, e tem permitido avaliar a plasticidade muscular tanto pela adaptação funcional ao aumento do uso (treinamento físico)⁷⁻¹³ como a redução do uso (imobilização, envelhecimento e microgravidade)¹⁴⁻¹⁸ da musculatura esquelética.

Além disso, a arquitetura muscular tem sido estudada juntamente com o tendão, como “unidade músculo-tendão”. De fato, essas duas estruturas formam uma unidade indivisível que requer dos pesquisadores seu estudo conjunto, para um correto entendimento dos fenômenos do movimento humano. Estudos recentes têm demonstrado que o envelhecimento está associado a uma redução na rigidez dos tendões, aumentando dessa forma sua complacência e diminuindo sua capacidade de transmissão de força aos ossos^{19,20}.

Modificações morfológicas na unidade músculo-tendão como a sarcopenia ou a diminuição da rigidez tendínea reconhecidamente causam alterações de suas propriedades mecânicas²¹. As propriedades mecânicas dos músculos determinam sua capacidade de produção de força em diferentes comprimentos e velocidades, podendo assim influenciar de maneira significativa as atividades de vida diária dos seres humanos, independente da faixa etária.

Segundo alguns autores, o processo de sarcopenia começa aproximadamente a partir dos 50 anos de idade³. Quando indivíduos idosos são submetidos a um programa de treinamento de força, os efeitos deletérios do envelhecimento são contrabalançados, sugerindo que grande parte dos mecanismos relacionados à sarcopenia são decorrentes do sedentarismo²²⁻²⁶.

O objetivo deste artigo foi revisar a literatura corrente sobre os aspectos relacionados à arquitetura muscular e o envelhecimento, bem como apresentar os resultados de programas de treinamento de força nas propriedades morfológicas da musculatura esquelética, indicando perspectivas clínicas na adaptação funcional dessa população.

METODOLOGIA

Esta foi uma revisão bibliográfica de artigos publicados em periódicos Qualis A1, com exceção de duas referências: as referências da Organização Mundial de Saúde e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística tiveram o objetivo de definir o termo idoso e apresentar alguns dados estatísticos sobre o envelhecimento. Dentre todos os artigos publicados entre 1993 e 2008, foram selecionados 42 disponíveis nas bases de dados Pubmed, Science Direct e Scopus. Os artigos foram obtidos por meio dos descritores *aging*, *older adults*, *elderly*, *muscle architecture*, *strength training* e *resistance training*. Optou-se por manter artigos da década de 1990, devido aos estudos clássicos que foram publicados nesse período sobre arquitetura muscular e treinamento de força.

Os artigos selecionados foram analisados criticamente quanto à menção de modificações morfológicas e funcionais devido ao envelhecimento, bem como aos aspectos clínicos dos efeitos do treinamento de força na adaptação funcional do músculo esquelético.

DISCUSSÃO

O termo sarcopenia foi inicialmente introduzido na literatura por Rosenberg em 1989, embora esse fenômeno já tivesse sido constatado na década de 1970. Sarcopenia provém das palavras gregas *sarx* que significa carne e *penia* que significa perda^{27,28}.

A prevalência da sarcopenia é de aproximadamente 25% em indivíduos com 65 anos ou mais, e aumenta para em torno de 30 a 50% naqueles com 80 anos ou mais. O gênero parece afetar de forma importante a sarcopenia, pois os homens parecem experimentar o dobro de perda de massa muscular quando comparados às mulheres²⁷.

O processo de sarcopenia pode afetar a célula muscular em si, independente das questões neuropáticas, o que pode ser verificado por meio de evidências da contribuição da apoptose de miócitos na sarcopenia. A apoptose das células musculares parece ser causada por ativação de mensageiros celulares específicos, iniciadas pela ligação do TNF- α a recep-

tores de membrana, envolvendo uma série de reações enzimáticas mediadas por endoproteases, as quais levam a ativação de uma caspase efetora responsável pela proteólise, resultando no catabolismo da célula e morte. Adicionalmente, as próprias mitocôndrias da fibra muscular podem provocar a apoptose, tanto por meio da liberação de citocromo "c" no sarcoplasma (que leva à ativação das caspases efetoras), quanto pela liberação de proteínas pró-apoptóticas (as quais geram fragmentação do DNA). O estresse do retículo sarcoplasmático também pode levar a apoptose, pela liberação de cálcio no sarcoplasma que eventualmente ativa as caspases efetoras²⁹.

O resultado desses eventos celulares é uma redução no número (hipoplasia) e no tamanho (hipotrofia) das fibras musculares – este último provavelmente em resposta também a uma redução na proliferação de células satélites em função da queda de fatores de crescimento como os IGFs (*insulin-like growth factors*)²⁹. Apesar de a sarcopenia ser alvo de estudos há várias décadas, ainda existem controvérsias a respeito dos mecanismos celulares aí envolvidos, tais como se a hipotrofia preferencial das fibras musculares rápidas, verificadas em ratos idosos, também ocorre em humanos. Resultados em modelo animal sugerem que a sarcopenia parece estar relacionada tanto com a hipoplasia quanto com a hipotrofia das fibras musculares. O envelhecimento parece ainda aumentar a heterogeneidade da ASTA das fibras musculares, principalmente em músculos altamente solicitados como o sóleo, produzindo uma hipotrofia seletiva de algumas fibras dentro de um músculo que apresenta um grande número de fibras aparentemente normais³. A literatura parece, portanto, indicar a existência de uma relação direta entre o envelhecimento e a arquitetura muscular.

Envelhecimento e arquitetura muscular

Diversos estudos têm demonstrado diferenças na arquitetura do músculo esquelético de idosos acometidos por sarcopenia quando comparado ao de

adultos jovens saudáveis. Essas evidências parecem ser unânimes quanto à redução no volume, área de seção transversa fisiológica (ASTF) e ângulo de penação do músculo esquelético de idosos^{4,30-33}.

A redução na ASTF do músculo de idosos parece estar associada à diminuição na capacidade de produção de força verificada nesses indivíduos³³. De fato, a ASTF apresenta correlação com a capacidade de produção de força muscular, variando grandemente entre os músculos do corpo humano, com diferentes características arquitetônicas²¹. Uma das características da arquitetura muscular que influenciam a ASTF é o ângulo de penação, ou seja, o ângulo entre a direção das fibras musculares e a linha de geração de força de um músculo²¹. Evidências mostram que em músculos hipertrofiados o ângulo de penação encontra-se significativamente aumentado³⁴. Ainda, os homens apresentam maiores ângulos de penação quando comparados às mulheres³¹, e a redução no ângulo de penação decorrente do envelhecimento parece estar associada à diminuição da ASTF^{4,31,33}.

Se, por um lado, músculos com uma maior ASTF possuem uma maior capacidade de produção de força, músculos com maior comprimento de fibra têm sido associados a uma maior velocidade de contração. Essa afirmativa é particularmente verdadeira para músculos com uma arquitetura longitudinal, como o bíceps braquial²¹. Todavia, as informações disponíveis sobre as adaptações do comprimento das fibras musculares ao envelhecimento são conflitantes. Narici *et al.*⁴ constataram que o comprimento das fibras do músculo gastrocnêmio medial de idosos era significativamente menor que a de adultos jovens. Ao avaliar esse mesmo parâmetro, Morse *et al.*³² encontraram uma redução significativa no comprimento de fibras nesse músculo em idosos, mas não lograram verificar os mesmos achados nos músculos sóleo e gastrocnêmio lateral.

Curiosamente, Kubo *et al.*³¹ não verificaram redução alguma significativa no comprimento das fibras musculares dos músculos tríceps braquial e gastrocnêmio medial em homens e mulheres idosas. Por outro lado, os autores cons-

tatarem que as fibras musculares do músculo vasto lateral de mulheres idosas eram menores do que em mulheres jovens; salientam ainda que as mulheres apresentam maiores comprimentos de fibras musculares do que os homens, em ambas as faixas etárias³¹.

Parece haver também uma diferença nas adaptações musculares ao envelhecimento entre os membros superiores e inferiores. Kubo *et al.*³¹ verificaram que o ângulo de penação e o volume muscular do tríceps braquial de idosos não estavam significativamente reduzidos quando comparados aos de jovens. É possível também que o maior envolvimento dos músculos dos membros inferiores nas atividades de vida diária faça com que sejam mais afetados pelo processo de envelhecimento, da mesma forma que outros processos de desuso, como imobilização e microgravidade, também afetam mais os músculos com predomínio de fibras de contração lenta como o sóleo, considerados antigravitacionais ou responsáveis pela manutenção da postura, do que músculos com predomínio de fibras de contração rápida, como o gastrocnêmio^{35,36}.

Esses indícios reforçam a idéia de que a estimulação do músculo esquelético durante o envelhecimento representa uma importante abordagem não-farmacológica no manejo de idosos acometidos por sarcopenia. Nesse sentido, diversas evidências têm demonstrado a efetividade do treinamento de força na melhora de parâmetros estruturais e funcionais do músculo esquelético de idosos³⁷⁻³⁹. Todavia, não se pode precisar se as alterações na arquitetura muscular ocorrem devido ao envelhecimento ou em função da redução dos níveis de atividade física apresentada pelos idosos.

Morse *et al.*⁴⁰ demonstraram que septuagenários são pelo menos 20% mais sedentários e apresentam um menor volume e torque muscular nos flexores plantares que sujeitos entre 20 e 29 anos de idade. Preocupados em isolar essa variável, Narici *et al.*⁴ compararam jovens e idosos pareados pelo nível de atividade física e verificaram que os idosos apresentavam um volume muscular e ASTF 25,4% e 15,2% menores no gastrocnêmio, respectivamente. Esses

autores verificaram ainda que o comprimento fascicular e o ângulo de penação do gastrocnêmio desses idosos eram 10,2% e 13,2% menores do que em indivíduos jovens, sugerindo que as diferenças na arquitetura muscular são devidas ao envelhecimento por se.

Adicionalmente, a perda de força muscular ultrapassa a perda de massa muscular, e, como conseqüência, o idoso experimenta um declínio na força por unidade de área de seção transversa. Essas evidências sugerem que outros fatores como alterações neurais contribuem para a perda de força durante o envelhecimento. Essas alterações poderiam ser resumidas a um aumento na co-ativação dos músculos antagonistas e uma redução no recrutamento e no sincronismo de ativação das unidades motoras²⁹. É importante também ressaltar que fatores intrínsecos da fibra muscular podem alterar a contratilidade, tais como sensibilidade sarcomérica ao íon cálcio e diminuição da densidade miofibrilar^{41,42}.

Independente dos fatores relacionados à fraqueza muscular durante o processo de envelhecimento, como já mencionado, a estimulação do sistema muscular parece reverter os efeitos deletérios do envelhecimento e pode contribuir para a melhora da qualidade de vida dos idosos.

Aspectos clínicos e efeitos do treinamento de força

As características arquitetônicas do músculo esquelético têm alta influência nos aspectos funcionais do movimento humano^{21,43}. Conseqüentemente, as alterações estruturais relacionadas ao envelhecimento e os efeitos do treinamento de força na estrutura muscular acabam por também influenciar a capacidade de movimento de idosos.

Um dos efeitos do envelhecimento é a diminuição da espessura muscular³⁰, um parâmetro que pode ser avaliado por

ultra-sonografia por meio da determinação da distância entre a aponeurose superficial e profunda de um músculo. A espessura muscular é um dos parâmetros associados ao número de sarcômeros em paralelo, o que significa dizer que a menor espessura muscular representa uma menor capacidade de produção de força, trazendo um impacto negativo na qualidade de vida de idosos. Felizmente o treinamento de força parece aumentar o ângulo de penação e o comprimento dos fascículos musculares, aumentando assim também a espessura muscular¹².

Quando a massa muscular é estimada pela ASTA, evidências mostram que o aumento na massa muscular decorrente de aproximadamente três meses de treinamento de força em idosos gira em torno de 5 a 17%, o que é comparável com os achados em jovens adultos submetidos a períodos similares de treinamento³⁷.

Da mesma forma, programas de exercícios de 14 semanas contra-resistência em idosos têm se mostrado efetivos no aumento da força específica, ou seja, a força relativa à ASTF³⁷. A força específica é considerada um indicador de qualidade muscular, ou seja, a força por unidade de massa muscular. Há evidências de que, para a maioria dos músculos com predomínio de fibras de contração rápida, a força específica²¹ seja em torno de 22,5 N/cm², embora possam ser encontrados relatos de índices de força específica um pouco menores, na ordem de 13,1 N/cm² para o músculo gastrocnêmio lateral e na ordem de 15 N/cm² para o músculo tibial anterior³³.

Também há evidências de que a força específica seja significativamente menor em idosos, mesmo quando o aumento da co-ativação dos músculos antagonistas não está presente. Os autores acreditam que a redução da força específica está relacionada com a diminuição da força das fibras musculares individuais, devido, em especial, a uma hipotrofia seletiva das fibras de contração rápida³³.

Outro aspecto recentemente verificado são as modificações nas propriedades mecânicas do músculo esquelético com o envelhecimento, bem como a influência do treinamento de força nas mesmas³⁷⁻³⁹. Evidências recentes sugerem uma reduzida relação torque-velocidade-potência em idosos, quando comparados a adultos jovens³⁷.

Alguns estudos demonstraram que o treinamento de força é capaz de aumentar o comprimento e o ângulo de penação das fibras musculares em idosos, sugerindo que os efeitos desse tipo de atividade nessa população podem ser verificados tanto no aumento do número de sarcômeros em série quanto em paralelo^{38,39}. Esse aumento do chamado efeito em série do músculo influencia fortemente sua relação torque-ângulo, podendo ser capaz de aumentar a amplitude de movimento e velocidade de contração dos idosos³⁸.

A adaptação dos tendões com o treinamento de força também é outro fator que parece influenciar as propriedades mecânicas do músculo esquelético em idosos. Evidências mostraram que o treinamento de força aumenta a rigidez do tendão devido a adaptações nas propriedades materiais, como as estruturas fibrosas e a matriz extracelular tendínea. Essas adaptações aumentam significativamente a transmissão de força muscular aos ossos pelos tendões, aumentando a velocidade de desenvolvimento de torque no músculo⁴⁴.

CONCLUSÃO

O processo de envelhecimento leva a modificações na arquitetura muscular como redução do ângulo de penação, comprimento fascicular, espessura muscular e, conseqüentemente, da área de seção transversa anatômica e fisiológica. Muitas dessas modificações podem, em parte, ser revertidas com o treinamento resistido.

REFERÊNCIAS

- 1 WHO – World Health Organization. Definition of an older or elderly person. Geneva; 2009. Disponível em: <http://www.who.int/healthinfo/survey/ageingdefnolder/en>.
- 2 IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Perfil dos idosos responsáveis pelos domicílios no Brasil. Rio de Janeiro; 2009. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/25072002pidoso.shtm>.
- 3 Hepple RT. Sarcopenia: a critical perspective. *Sci Aging Knowledge Environ*. 2003;19(46):31-40.
- 4 Narici MV, Maganaris CN, Reeves ND, Capodaglio P. Effect of aging on human muscle architecture. *J Appl Physiol*. 2003;95(6):2229-34.
- 5 Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T. Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J Appl Physiol*. 1993;74(6):2740-4.
- 6 Narici MV, Binzoni T, Hiltbrand E, Fasel J, Terrier F, Cerretelli P. In vivo human gastrocnemius architecture with changing joint angle at rest and during graded isometric contraction. *J Physiol (Lond)*. 1996;496:287-97.
- 7 Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P, Leffers AM, Wagner A, Peter Magnusson S, et al. A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J Physiol (Lond)*. 2001;534:613-23.
- 8 Alegre LM, Jimenez F, Gonzalo-Orden JM, Martin-Acero R, Aguado X. Effects of dynamic resistance training on fascicle length and isometric strength. *J Sports Sci*. 2006;24(5):501-8.
- 9 Blazeovich AJ, Gill ND, Bronks R, Newton RU. Training-specific muscle architecture adaptation after 5-wk training in athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35(12):2013-22.
- 10 Blazeovich AJ, Gill ND, Deans N, Zhou S. Lack of human muscle architectural adaptation after short-term strength training. *Muscle Nerve*. 2007;35(1):78-86.
- 11 Blazeovich AJ, Giorgi A. Effect of testosterone administration and weight training on muscle architecture. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(10):1688-93.
- 12 Kawakami Y, Abe T, Kuno SY, Fukunaga T. Training-induced changes in muscle architecture and specific tension. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1995;72(1-2):37-43.
- 13 Seynnes OR, De Boer M, Narici MV. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *J Appl Physiol*. 2007;102(1):368-73.
- 14 Kawakami Y, Muraoka Y, Kubo K, Suzuki Y, Fukunaga T. Changes in muscle size and architecture following 20 days of bed rest. *J Gravit Physiol*. 2000;7(3):53-9.
- 15 De Boer MD, Seynnes OR, di Prampero PE, Pisot R, Mekjavic IB, Biolo G, et al. Effect of 5-weeks horizontal bed rest on human muscle thickness and architecture of weight bearing and non-weight bearing muscles. *Eur J Appl Physiol*. 2008;104(2):401-7.
- 16 Reeves ND, Maganaris CN, Ferretti G, Narici MV. Influence of simulated microgravity on human skeletal muscle architecture and function. *J Gravit Physiol*. 2002;9(1):P153-4.
- 17 Kawakami Y, Akima H, Kubo K, Muraoka Y, Hasegawa H, Kouzaki M, et al. Changes in muscle size, architecture, and neural activation after 20 days of bed rest with and without resistance exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2001;84(1-2):7-12.
- 18 Biolo G, Heer M, Narici M, Strollo F. Microgravity as a model of ageing. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. 2003;6(1):31-40.
- 19 Karamanidis K, Arampatzis A. Mechanical and morphological properties of different muscle-tendon units in the lower extremity and running mechanics: effect of aging and physical activity. *J Exp Biol*. 2005;208(Pt 20):3907-23.
- 20 Karamanidis K, Arampatzis A. Mechanical and morphological properties of human quadriceps femoris and triceps surae muscle-tendon unit in relation to aging and running. *J Biomech*. 2006;39(3):406-17.
- 21 Lieber RL, Fridén J. Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve*. 2000;23(11):1647-66.
- 22 Hakkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Malkia E, et al. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol*. 1998;84(4):1341-9.
- 23 Izquierdo M, Hakkinen K, Ibanez J, Garrues M, Anton A, Zuniga A, et al. Effects of strength training on muscle power and serum hormones in middle-aged and older men. *J Appl Physiol*. 2001;90(4):1497-507.
- 24 Kraemer WJ, Hakkinen K, Newton RU, Nindl BC, Volek JS, McCormick M, et al. Effects of heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs. older men. *J Appl Physiol*. 1999;87(3):982-92.
- 25 Kalapotharakos VI, Michalopoulos M, Tokmakidis SP, Godolias G, Gourgoulis V. Effects of a heavy and a moderate resistance training on functional performance in older adults. *J Strength Cond Res*. 2005;19(3):652-7.

Referências (cont.)

- 26 Hunter GR, McCarthy JP, Bamman MM. Effects of resistance training on older adults. *Sports Med.* 2004;34(5):329-48.
- 27 Iannuzzi-Sucich M, Prestwood KM, Kenny AM. Prevalence of sarcopenia and predictors of skeletal muscle mass in healthy, older men and women. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2002;57(12):M772-7.
- 28 Roubenoff R, Hughes VA. Sarcopenia: current concepts. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2000;55(12):M716-24.
- 29 Narici MV, Maganaris CN. Adaptability of elderly human muscles and tendons to increased loading. *J Anat.* 2006;208(4):433-43.
- 30 Kubo K, Kanehisa H, Azuma K, Ishizu M, Kuno SY, Okada M, et al. Muscle architectural characteristics in women aged 20-79 years. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(1):39-44.
- 31 Kubo K, Kanehisa H, Azuma K, Ishizu M, Kuno SY, Okada M, et al. Muscle architectural characteristics in young and elderly men and women. *Int J Sports Med.* 2003;24(2):125-30.
- 32 Morse CI, Thom JM, Birch KM, Narici MV. Changes in triceps surae muscle architecture with sarcopenia. *Acta Physiol Scand.* 2005;183(3):291-8.
- 33 Morse CI, Thom JM, Reeves ND, Birch KM, Narici MV. In vivo physiological cross-sectional area and specific force are reduced in the gastrocnemius of elderly men. *J Appl Physiol.* 2005;99(3):1050-5.
- 34 Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T. Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J Appl Physiol.* 1993;74(6):2740-4.
- 35 Hortobágyi T, Dempsey L, Fraser D, Zheng D, Hamilton G, Lambert J, et al. Changes in muscle strength, muscle fibre size and myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J Physiol (Lond).* 2000;524:293-304.
- 36 Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. *J Exp Biol.* 2001;204:3201-8.
- 37 Narici MV, Maganaris C, Reeves N. Myotendinous alterations and effects of resistive loading in old age. *Scand J Med Sci Sports.* 2005;15(6):392-401.
- 38 Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. In vivo human muscle structure and function: adaptations to resistance training in old age. *Exp Physiol.* 2004;89(6):675-89.
- 39 Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. Effect of resistance training on skeletal muscle-specific force in elderly humans. *J Appl Physiol.* 2004;96(3):885-92.
- 40 Morse CI, Thom JM, Davis MG, Fox KR, Birch KM, Narici MV. Reduced plantarflexor specific torque in the elderly is associated with a lower activation capacity. *Eur J Appl Physiol.* 2004;92(1-2):219-26.
- 41 MacIntosh BR. Role of calcium sensitivity modulation in skeletal muscle performance. *News Physiol Sci.* 2003;18:222-5.
- 42 Rassier DE, Tubman LA, MacIntosh BR. Inhibition of Ca²⁺ release in rat atrophied gastrocnemius muscle. *Exp Physiol.* 1997 Jul;82(4):665-76.
- 43 Lieber RL, Friden J. Clinical significance of skeletal muscle architecture. *Clin Orthop Relat Res.* 2001;(383):140-51.
- 44 Reeves ND, Maganaris CN, Narici MV. Effect of strength training on human patella tendon mechanical properties of older individuals. *J Physiol (Lond).* 2003;548(3):971-81.