

Isquemia local transitória induzida pela contração isométrica voluntária e sua relação com a função arterial

Transient localized ischemia induced by isometric voluntary contraction and its relationship with arterial function

MAGALHÃES, Manuel Armando Ribeiro¹

SILVA, Regina Coeli Souza e¹

FERREIRA, Arthur de Sá¹

Resumo

O músculo esquelético é um tecido especializado na transformação de energia química em energia mecânica, com estrutura proteica própria para executar esta função relacionada com o movimento do corpo humano. Em casos fisiológicos, a redução de oxigenação local, durante a contração, é geralmente transitória e compensada por ajustes cardiorrespiratórios sistêmicos. Entretanto, em condições patológicas, os miócitos não conseguem sintetizar quantidades necessárias de ATP, devido à reduzida disponibilidade de O₂ para a respiração celular. Assim, é fundamental o conhecimento da função do músculo esquelético, em condições de fluxo livre e isquemia, e dos fatores circulatórios que influenciam a oferta de oxigenação local, para que a reabilitação musculoesquelética possa ser otimamente prescrita. Este trabalho discute os efeitos da isquemia transitória na função muscular e a aplicação de métodos para monitorização das funções muscular e arterial, tais como a eletromiografia de superfície e a tonometria por aplanagem arterial. Os benefícios dos métodos citados incluem seu aspecto não invasivo, o baixo custo, a rapidez na realização de todos os procedimentos, a automação de quase todos os processos no processamento, a mobilidade do sistema e a facilidade de aprendizado para uso. Em conjunto, os dois exames podem prover informações importantes sobre a associação entre o estado vascular e a capacidade de contração muscular em indivíduos saudáveis e em populações específicas.

Palavras-chave: Contração muscular; Endotélio vascular; Eletromiografia.

¹ Laboratório de Análise do Movimento Humano, Centro Universitário Augusto Motta/UNISUAM, Rio de Janeiro, RJ.
E-mail: arthur_sf@ig.com.br; arthurde@unisuamdoc.com.br

Abstract

Skeletal muscle is a specialized tissue that converts chemical energy into its mechanical counterpart. Its protein structure allows the execution of this task related to the human body movement. Under physiological conditions, the reduction in local blood flow is generally transient and is compensated by systemic cardiorespiratory adjustments. However, under pathological conditions the myocyte cannot synthesize the necessary amount of ATP due to reduced O₂ availability for cellular respiration. Hence, knowledge about the skeletal muscle function under both free and restricted blood flow - and the factors which influence local oxygenation - is fundamental for an optimized musculoskeletal rehabilitation program. This study revised the effects of transient ischemia on muscle function and the application of methods for muscle and arterial functions monitoring, such as the surface electromyography and arterial applanation tonometry. The benefits of the cited methods comprise their noninvasive nature, relative low-cost, the fast execution of the exams, the automation of almost all procedures during signal processing, the mobility of those systems, and the fast learning of their application. All together, the above-cited exams may provide relevant information concerning the relationship between the vascular state and muscle contraction capacity in healthy and disease-specific populations.

Keywords: Muscle contraction; Vascular endothelium; Electromyography.

Introdução

O músculo esquelético é um tecido especializado na transformação de energia química em energia mecânica, com estrutura proteica própria para executar esta função relacionada com o movimento do corpo humano. As fibras contráteis extrafusais podem ser divididas em, pelo menos, três tipos, em função de sua resistência à fadiga, capacidade de produzir força e constituintes intracelulares, dentre outros critérios. A capacidade funcional de cada músculo é determinada pela combinação dos referidos tipos de fibras, conferindo, ao músculo esquelético, capacidades variadas de potência e resistência à fadiga (1). Apesar das diferenças anatomofuncionais existentes entre as fibras musculares, todas apresentam, em maior ou menor grau, a necessidade de oxigenação para executar sua função.

A oxigenação tecidual pode ser restringida, em diversas condições fisiológicas e patológicas; pode, ainda, ser parcial ou total, transitória ou permanente e local ou sistêmica. Independentemente da condição, a restrição parcial ou total da oxigenação tecidual inicia um processo de adaptação celular que pode se tornar irreversível, caso a oferta de oxigênio não seja restabelecida (2). Em casos fisiológicos, a redução de oxigenação local é, geralmente, transitória e compensada por ajustes cardiorrespiratórios sistêmicos, tais como os que ocorrem durante o exercício físico. Em condições patológicas, especialmente do sistema circulatório, o restabelecimento da oxigenação pode ser muito lento ou mesmo não ocorrer. Em doenças circulatórias e metabólicas crônicas, a adaptação das fibras musculares às condições isquêmicas crônicas altera significativamente a sua capacidade de realizar atividades recreativas, laborais e desportivas (3). Assim, é fundamental o conhecimento da função do músculo esquelético, em condições de fluxo livre e isquemia e dos fatores circulatórios que influenciam a oferta de oxigenação local, para que a reabilitação musculoesquelética possa ser otimamente prescrita.

Dentre os métodos que permitem a avaliação da função muscular, a Eletromiografia de Superfície (EMGs) tem recebido destaque, por ser um método não invasivo, de fácil execução e

que pode gerar informações importantes sobre o metabolismo e a função muscular. A EMGs compreende a medida da atividade elétrica dos músculos voluntários (4-5). Dentre os métodos para Avaliação da Função Arterial (AFA), a tonometria por aplanção arterial permite a captação não invasiva das ondas de pulso em sítios arteriais e, também, tem sido considerada de fácil execução e de baixo custo, além de permitir o cálculo de parâmetros associados ao estado do segmento arterial no qual é calculada e do sistema arterial (6). Apesar da ampla utilização da EMGs e da AFA, poucos estudos têm correlacionado as modificações dos padrões eletromiográficos com as respostas hemodinâmicas, durante a execução de contração muscular em condições de fluxo livre e isquemia (7-10). Portanto, este trabalho tem o objetivo de discutir os efeitos da isquemia transitória, na função muscular, e a aplicação de métodos para monitorização das funções muscular e arterial, tais como a Eletromiografia de Superfície e a tonometria por aplanção arterial, evidenciando o impacto das alterações circulatórias nesse processo.

Contração Muscular em Diferentes Condições de Oxigenação

Em condições fisiológicas de fluxo sanguíneo, os miócitos são capazes de utilizar o ATP disponível no citoplasma e, simultaneamente, sintetizar o ATP gasto em reações anteriores, mediante a captação do oxigênio (O_2) transportado pelo sangue. O ATP é fundamental para a contração do músculo esquelético, uma vez que este permite o acoplamento das proteínas contráteis e o seu desacoplamento: contração e relaxamento, respectivamente (1). Fisiologicamente, a própria contração muscular restringe temporariamente o suprimento de sangue para os músculos, por aumento da pressão intramuscular (e da pressão extramural), com conseqüente redução da oferta de O_2 (11). Em resposta a essa redução de O_2 , ocorre vasodilatação arteriolar local, para que haja maior fluxo sanguíneo e, conseqüentemente, maior oferta de O_2 para a resíntese de ATP (3).

Entretanto, em condições isquêmicas prolongadas, nas quais, há redução do suprimento de O_2 devido à redução do fluxo sanguíneo regional, os miócitos não conseguem sintetizar, por fosforilação oxidativa, quantidades necessárias de ATP, devido à indisponibilidade de O_2 para a respiração celular. Em conseqüência, as capacidades de acoplamento e desacoplamento das proteínas musculares ficam comprometidas e, também, a sua função, ou seja, a geração de trabalho (12). Além da diminuição dos níveis de ATP intracelular para a demanda de ATPases, ocorrem outros distúrbios metabólicos no músculo, tais como acúmulo de H^+ e a inibição de aberturas no canal de Ca^{2+} (13). Assim, a isquemia por curto período de tempo – até 5-10 minutos (7,14-15) – ocasiona importantes modificações bioquímicas, como o acúmulo de substratos metabólicos e alterações na permeabilidade da membrana da célula muscular, levando à diminuição da produção de força. Com o retorno do fluxo sanguíneo, após esse período transitório, ocorre a restauração da homeostase celular com conseqüente recuperação da função muscular (2). Após 3 horas de isquemia, os níveis de ATP reduzem-se, drasticamente, e há piora da acidose. Acredita-se que a reperfusão, feita até esse período de 3 horas, seja capaz de restabelecer os níveis de ATP, sem gerar lesões teciduais (3).

A própria contração das fibras musculares extrafusais provoca seu encurtamento no sentido longitudinal, mas, também, um aumento do volume muscular. Esse aumento de volume eleva a pressão intramuscular, comprimindo todos os tecidos que permeiam essas fibras, inclusive os vasos sanguíneos arteriais e venosos. As veias são as primeiras a serem comprimidas, impedindo o retorno venoso pelo segmento corporal no qual os músculos estão em atividade. Entretanto, essa compressão não afeta a oxigenação tecidual. Em níveis de pressão mais elevados – aproximadamente maiores

que 70% da contração isométrica voluntária máxima – as artérias são, também, comprimidas, o que provoca graus de isquemia parcial ou mesmo total (11). Em exercícios físicos, tais contrações duram poucos segundos, o que não compromete o processo metabólico da célula de resíntese de ATP. Entretanto, em condições de exercício extenuante de longa duração ou de alta intensidade e curta duração, ou mesmo de trabalho físico repetitivo com predominância de contrações isométricas de baixa intensidade, as células musculares podem sofrer estímulos mais prolongados que produzem reações inflamatórias (1).

Doença Vascular e sua Repercussão na Função Muscular

Além de causas fisiológicas, diversos distúrbios podem afetar direta ou indiretamente a oxigenação muscular e tecidual, comprometendo a função global e com repercussões na qualidade de vida dos pacientes com esses distúrbios. De modo geral, distúrbios circulatórios e metabólicos são caracterizados por doença microvascular difusa. Pode-se citar, como as principais doenças, a hipertensão arterial sistêmica (HAS) e o diabetes mellitus (DM), discutidas a seguir. Outras condições patológicas de interesse para o estudo simultâneo da função muscular e arterial compreendem a doença arterial periférica crônica, obstrução arterial aguda e aterosclerose (16). A HAS, definida como a elevação da pressão arterial sistólica e/ou diastólica (17), afeta diretamente o sistema cardiovascular, principalmente as artérias – por meio do processo de remodelagem vascular, caracterizado por modificações na parede vascular provocada por estímulos dinâmicos e tróficos. Hipertensos podem desenvolver hipertrofia e hiperplasia das células de músculo liso, devido à hipertensão prolongada, que resulta em espessamento da parede arterial, diminuição do diâmetro interno, elevação da resistência periférica total e, conseqüentemente, da pressão arterial (18). Por sua vez, o DM é, também, uma doença multisistêmica capaz de causar complicações diversas, principalmente do sistema cardiovascular, fazendo com que a principal causa de morbidade e mortalidade em indivíduos acometidos por DM seja conseqüente às doenças cardiovasculares por complicações microvasculares ou macrovasculares (19). Em ambas as condições, comumente se observa a rarefação arteriolar ou capilar nos músculos esqueléticos (20-21). Os vasos capilares são a região do sistema circulatório responsável pelas trocas gasosas na circulação sistêmica e pulmonar. Devido a essa rarefação, os músculos esqueléticos trabalham em condições não ideais de fluxo sanguíneo (isquemia parcial ou total).

Instrumentos e Métodos para a Avaliação da Função Muscular

A fim de compreender o processo patológico em andamento com o paciente, é necessária a identificação das alterações estruturais e funcionais dos sistemas envolvidos, assim como a comparação dos mesmos exames em indivíduos hígidos. No caso da função muscular e sua relação com o suprimento sanguíneo, é de interesse, o registro da atividade elétrica muscular e das ondas de pulso arterial, respectivamente. Ambos os sinais possuem características que demonstram alterações estruturais e funcionais dos respectivos sistemas.

A EMGs é um método que utiliza eletrodos cutâneos, para a observação da atividade muscular, por meio da detecção e registro do potencial elétrico proveniente das fibras musculares esqueléticas. A EMGs permite avaliar a ativação muscular e sua duração, a ocorrência de fadiga, a alteração da composição das unidades motoras resultante de programas de treinamento muscular, assim como as estratégias neurais de recrutamento (quantidade e velocidade) das unidades motoras (15). É um

método muito utilizado em pesquisa, mas, ainda, pouco na área clínica. Suas aplicações compreendem condições normais (estudos biomecânicos, cinesiológicos e funcionais) ou patológicas (síndromes dolorosas, disfunções neuromusculares e doenças neurológicas) (15,22-23).

O sinal eletromiográfico pode ser analisado de duas formas: pelo domínio do tempo e/ou domínio da frequência. A amplitude do sinal pode ser manipulada eletronicamente, para facilitar a quantificação dos dados brutos por meio da raiz quadrada da média dos quadrados (*Root Mean Square* - RMS). O domínio da frequência expressa mudanças na velocidade de condução, no pH intramuscular, modificação no recrutamento, sincronização da unidade motora e tipo de fibra. Entretanto, é a velocidade de condução do potencial de ação que melhor representa as alterações decorrentes da ausência de fluxo sanguíneo no músculo. A velocidade de condução altera outras propriedades do sinal eletromiográfico, sendo bem representada pela frequência mediana do eletromiograma de superfície (22-23).

Assim sendo, a EMGs tem sido usada para a análise da contração muscular sustentada, mediante isquemia total ou parcial do fluxo sanguíneo muscular, já que permite observar alterações no recrutamento das unidades motoras e a velocidade de condução (e, conseqüentemente, a frequência mediana do sinal) das fibras musculares sob essas condições. MAGORA et al. (24) e FARINA et al. (15) verificaram que o eletromiograma apresentava diminuição na frequência mediana, confirmando a hipótese de que a ausência de fluxo sanguíneo leva ao acúmulo de metabólitos, diminuição do potencial de membrana e alterações na permeabilidade da membrana da célula.

Instrumentos e Métodos para a Avaliação da Função Arterial

A avaliação da função arterial pode ser feita, mediante aplicações de um teste de reatividade vascular (Hiperemia Reativa Pós-Oclusiva, HRPO), realizado com sensores não invasivos de pressão arterial chamado de tonometria por aplanção. Este teste tem o objetivo de verificar a resposta do vaso aos estímulos das substâncias vasoativas ou da sua capacidade de autorregulação. Envolve, também, a avaliação da biodisponibilidade e da bioatividade dos fatores derivados do endotélio vascular. O teste consiste na obstrução do fluxo sanguíneo por 3-5 minutos seguida da restauração abrupta da circulação segmentar. Um manguito de pressão é posicionado ao redor do segmento corporal em estudo – geralmente membro superior ou inferior – e é aplicada sobre o mesmo uma pressão no mínimo superior à pressão sistólica do indivíduo. Em consenso, trabalha-se com, no mínimo, 200 mmHg; caso o indivíduo apresente pressão sistólica superior a esse valor, adicionam-se 20 mmHg, para garantir a obstrução arterial total. Em todos os casos, faz-se a palpação do pulso periférico associado ao segmento em estudo, para verificar a ausência de pulsação no segmento (6,25). Imediatamente após a restauração do fluxo, indivíduos responsivos liberam os agentes vasodilatadores produzidos durante o período de isquemia, devido ao estresse de cisalhamento na parede do vaso. Embora o período de resposta à isquemia possa durar 15 minutos, a vasodilatação máxima ocorre nos primeiros 30-60 segundos pós-oclusão (26-27).

O processamento do exame inclui a análise da onda de pressão de pulso batimento-a-batimento, constando do sinal de reatividade vascular obtido por meio do teste de HRPO. Este teste possibilita a verificação dos mecanismos de autorregulação do fluxo sanguíneo no leito vascular em estudo. A variação de amplitude da onda de pulso observada, bem como a morfologia da onda de pulso e a velocidade de restauração do fluxo sanguíneo são os parâmetros derivados desse teste associados à função arterial (26-27).

Considerações Finais

A oferta de O₂ para a atividade muscular, é fundamental para o bom funcionamento desse tecido. Em conjunto, a EMGs e a AFA podem prover informações importantes sobre a associação entre o estado vascular e a capacidade de contração muscular em indivíduos saudáveis e em populações específicas. Os benefícios dos métodos propostos incluem seu aspecto não invasivo, o baixo custo, a rapidez na realização de todos os procedimentos, a automação de quase todos os processos no processamento, a mobilidade do sistema e a facilidade de aprendizado para uso. Os dois exames integrados provêm métodos de avaliação que podem ser úteis em estudos populacionais de larga escala.

Referências

1. Ferreira AT. Fisiologia da Contração Muscular. *Rev Neurociências*. 2005;13(3):60-2.
2. Brandão ML, Roselino JES, Piccinato CE, Cherri J. Mitochondrial alterations in skeletal muscle submitted to total ischemia. *J Surg Res*. 2003 Mar;110(1):235-40.
3. Silveira M, Yoshida WB. Isquemia e reperfusão em músculo esquelético: mecanismos de lesão e perspectivas de tratamento. *J Vasc Bras*. 2004;3(4):367-78.
4. Rowe PJ. Sistemias de mensuração. In: Durward BR, Baer GD, Rowe PJ, editores. *Movimento Funcional Humano: Mensuração e Análise*. São Paulo: Manole; 2001. p.35-55.
5. Robinson AJ, Kellog R. Estudo clínico eletrofisiológico. In: Robinson AJ, Snyder-Mackler L, editores. *Eletrofisiologia Clínica: Eletroterapia e Teste Eletrofisiológico*. 2ª ed. Porto Alegre: Artmed; 2001. p.319-81.
6. Nichols WW, O'Rourke MF. Measuring Principles of Arterial Waves. In: Nichols WW, O'Rourke MF, editores. *McDonald's Blood Flow in Arteries: theoretic, experimental and clinical principles*. 3rd ed. London: Arnold; 1998. p.143-83.
7. Rongen G, Van Dijk J, Van Ginneken E, Stegeman D, Smits P, Zwarts M. Repeated ischaemic isometric exercise increase muscle fibre conduction velocity in humans: involvement of Na(+)-K(+)-ATPase. *J Physiol*. 2002 May 1;540(Pt 3):1071-8.
8. Russ DW, Kent-Braun JA. Sex differences in human skeletal muscle fatigue are eliminated under ischemic conditions. *J Appl Physiol*. 2003 Jun;94(6):2414-22.
9. Lanza IR, Wigmore DM, Befroy DE, Kent-Braun JA. In vivo ATP production during free-flow and ischaemic muscle contractions in humans. *J Physiol*. 2006 Nov 15;511(Pt 1):353-67.
10. Lanza IR, Larsen RG, Kent-Braun JA. Effects of old age on human skeletal muscle energetics during fatiguing contractions with and without blood flow. *J Physiol*. 2007 Sep 15;583(Pt 3):1093-105.
11. Humphreys PW, Lind AR. Blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained handgrip contractions. *J Physiol*. 1963 Apr;166:120-35.
12. Hogan MC, Gladden LB, Grassi B, Sary CM, Samaja M. Bioenergetics of contracting skeletal muscle after partial reduction of blood flow. *J Appl Physiol*. 1998 Jun;84(6):1882-8.
13. Blei M, Conley KE, Kushmerick MJ. Separate measures of ATP utilization and recovery in human skeletal muscle. *J Physiol*. 1993 Jun;465:203-22.

14. Barnes WS, Williams JH. Effects of ischemia on myoelectrical signal characteristics during rest and recovery from static work. *Am J Phys Med.* 1987 Oct;66(5):249-63.
15. Farina D, Merletti R, Enoka RM. The Extraction of Neural Strategies from the Surface EMG. *J Appl Physiol.* 2004 Apr;96(4):1486-95.
16. Nakano L. Avaliação objetiva de isquemia de membros superiores: uso do dinamômetro isocinético [Tese de Doutorado]. São Paulo (SP): Universidade de São Paulo. Programa de Pós-graduação em Clínica Cirúrgica; 2005.
17. Mancia G, Backer G, Dominiczak A, Cifkova R, Fagard R, Germano G, et al. The Task Force for the Management of Arterial Hypertension of the European Society of Hypertension (ESH) and of the European Society of Cardiology (ESC). *J Hypertens.* 2007 Jun;25(6):1105-87.
18. Ward MR, Pasterkamp G, Yeung AC, Borst C. Arterial remodeling: mechanisms and clinical implications. *Circulation.* 2000 Sep 5;102(10):1186-91.
19. Deshpande AD, Harris-Hayes M, Schootman M. Epidemiology of diabetes and diabetes-related complications. *Phys Ther.* 2008 Nov;88(11):1254-64.
20. Antonios TFT, Singer DRJ, Markandu ND, Mortimer PS, MacGregor GA. Structural Skin Capillary Rarefaction in Essential Hypertension. *Hypertension.* 1999 Apr;33(4):998-1001.
21. Hernández N, Torres SH, Finol HJ, Vera O. Capillary Changes in Skeletal Muscle of Patients with Essential Hypertension. *Anat Record.* 1999 Dec 1;256(4):425-32.
22. Merletti R, Knaflitz M, DeLuca C. Electrically evoked myoelectric signals. *Crit Rev Biomed Eng.* 1992;19(4):293-340.
23. Ferreira AS, Guimarães FS, Silva JG. Aspectos metodológicos da eletromiografia de superfície: considerações sobre os sinais e processamentos para estudo da função neuromuscular. *Rev Bras Ciênc Esporte.* 2010;31(2):11-30.
24. Magora A, Blank A, Gonen B. Effects of artificially induced ischemia (AII) on the electrophysiological pattern of muscular fatigue in healthy humans. *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 1980 Mar-Apr;20(2):125-40.
25. Ferreira AS, Barbosa Filho J, Souza MN. Model for post-occlusive reactive hyperemia as measured noninvasively with pressure pulse waveform. *Biomed Signal Process Control.* 2011;6:410-3.
26. Ferreira AS, Barbosa Filho J, Cordovil I, Souza MN. Noninvasive method for assessment of endothelial function based on reflection index obtained with post-occlusive reactive hyperemia, In: World Congress of Cardiology, Buenos Aires. *Circulation.* 2008;117:218.
27. Ferreira AS, Barbosa Filho J, Cordovil I, Souza MN. Noninvasive Pulse Waveform Analysis of Flow-Mediated Vasodilation Evoked by Post-Occlusive Reactive Hyperemia Maneuver. *Biomed Signal Process Control.* 2012;7:616-21.

Recebido em: 17/04/2013

Aceito em: 04/08/2013