

O mecanismo de contração muscular durante o movimento humano

Carlos Alberto Veiga Bruniera¹ & Lenita Brunetto Bruniera²

Resumo

A atividade física desportiva se diferencia das demais pelos gestos próprios, distintos entre as diversas tarefas diárias, que devem advir de um perfeito conhecimento da estrutura do movimento, objetivando sua otimização. A base desta estrutura está no sistema neuromuscular humano. O movimento é consequência direta da função contrátil muscular, que transforma energia química em mecânica, possibilitando o movimento de determinadas partes do corpo humano ou do corpo como um todo. O organismo humano possui em sua constituição um número aproximado de 430 músculos esqueléticos, distribuídos em todas as regiões do corpo. O músculo é composto por fibras, que são constituídas por filamentos de actina e miosina. Durante a contração muscular, ocorre o deslizamento dos filamentos de actina sobre os de miosina. O sinal para a contração do músculo esquelético inicia-se a partir de um impulso elétrico, a partir de um nervo, e é seguido por uma mudança química na célula muscular e pela contração, um processo mecânico.

Palavras-chave: movimento; músculo; contração; energia; actina; miosina.

BRUNIERA, C. A. V.; BRUNIERA, L. B. O mecanismo de contração muscular durante o movimento humano. *UNOPAR Cient., Ciênc. Biol. Saúde*, Londrina, v. 2, n. 1, p. 135-141, out. 2000.

Introdução

O corpo humano possui cerca de 430 músculos, cuja composição química é de aproximadamente 75% de água, 5% de sais inorgânicos e outras substâncias (fosfatos de alta energia, uréia, ácido láctico, cálcio, magnésio e fósforo) e 20% por proteínas, das quais as mais abundantes são: miosina (cerca de 50% da proteína total), actina (cerca de 20%), tropomiosina (15%) e a proteína conjugada mioglobina. Outras proteínas, em concentrações bem menores, também são encontradas: troponina, alfa actina, beta actina, entre outras (Hamill & Knutzen, 1999; Winter, 1979; Basmajian & De Luca, 1985 e Nigg & Herzog, 1994). Os músculos são formados por células cilíndricas chamadas fibras e somam aproximadamente 250 milhões, representando de 30% a 40% do peso total. A distribuição das fibras é feita no sentido longitudinal do músculo, paralelas entre si, sendo que a força de contração é desenvolvida ao longo do eixo longitudinal.

As fibras encontram-se agrupadas no músculo, em formações que variam de 20 a 100, denominadas feixes primários ou fascículos. Essa quantidade depende do controle requerido pelo músculo. Por exemplo, músculos que desenvolvem grande quantidade de força apresentam um maior número de fibras do que aqueles que requerem um maior controle de movimento.

¹ Docente da Universidade Norte do Paraná (UNOPAR), Universidade Estadual de Londrina (UEL) e Universidade Paranaense (UNIPAR). End. para correspondência: Av. Paris, 675. Jardim Piza. 86041-140 Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: bruniera@sercomtel.com.br

² Docente do Centro de Estudos Superiores de Londrina (CESULON). Doutoranda em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Londrina (UEL).

A teoria aceita para a contração e relaxamento de um músculo em seus diferentes graus está relacionada ao princípio do tamanho da unidade motora recrutada para o movimento. A unidade motora é definida fisiologicamente como a base da organização funcional do movimento voluntário ou reflexo. É constituída pelo neurônio motor, seu axônio motor correspondente e as fibras musculares estriadas inervadas pelo axônio. Cada fibra muscular recebe apenas uma fibra nervosa, mas um mesmo neurônio motor pode servir a várias fibras musculares.

Portanto, as primeiras unidades motoras solicitadas para gerar tensão em um músculo são as menores, e as grandes por último. Essa forma de recrutamento permite ao músculo gerar tensões graduais durante a realização de um gesto motor. A redução de tensão segue o processo inverso, iniciando pelas maiores unidades e, por último, as menores.

O movimento humano frente a tarefas desportivas é altamente variável, não somente entre indivíduos, mas para um mesmo indivíduo a diferentes velocidades. Além disso, é um complexo processo que necessita de um elaborado controle dos sistemas músculo-esquelético e nervoso. O movimento não é um único fenômeno, mas muitos fenômenos interligados, constituindo-se em uma estrutura complexa para análise e interpretação.

Contração muscular

O movimento é uma característica fundamental do comportamento humano, tanto para realizar tarefas diárias como para atividades esportivas. Ele é realizado pela contração dos músculos esqueléticos que atuam sobre um sistema de alavancas e polias formado pelos ossos, tendões, articulações e ligamentos. Isso porque o tecido muscular é o único capaz de desenvolver tensão ativa.

A ação resultante da tensão muscular é concêntrica, excêntrica ou isométrica, dependendo se o músculo encurta, alonga ou permanece no mesmo comprimento (Hay & Reid, 1985; Rash, 1991; Hall, 1993 e Hamill & Knutzen, 1999).

O músculo, de maneira isolada, pode desempenhar duas funções básicas: desenvolver tensão e relaxar-se. Essas ações são dependentes da forma, número e disposições das fibras, ação uniarticular ou biarticular das articulações envolvidas, tendão de origem e inserção em relação ao tamanho e ângulo de união com o osso e distância do ponto de apoio, refletindo a vantagem mecânica das alavancas ósteo-musculares.

Entretanto, são raras as vezes em que o músculo esquelético desempenha uma função de maneira isolada. Geralmente, os movimentos são executados por um conjunto de músculos, atuando em grupo, na organização dos movimentos do corpo humano frente a tarefas esportivas, na fixação de partes do corpo ou na manutenção da postura ereta.

O músculo é somente uma máquina de puxar, e não uma máquina de empurrar. Assim sendo, um determinado músculo deve ser antagonizado por outro músculo, ou outras forças, tais como a força elástica de recuo ou força da gravidade (Murray *et al.*, 1994 e Maughan *et al.*, 2000).

Segundo Donskoi & Zatsiorski (1988), a função dos músculos é gerar força interna para a realização do movimento, e isso ocorre pela transformação de energia química armazenada em trabalho mecânico. Em relação a essa transformação de energia, Miyashita (1976) demonstra ser o movimento essencial na transformação de formas de energia, que é o aspecto fundamental no rendimento físico.

Através do movimento, o sistema biológico humano transforma a energia metabólica em energia mecânica. A quantificação da energia metabólica é realizada de forma indireta, através de cálculos a partir do consumo de O_2 , por exemplo. O valor total da energia química armazenada no corpo é representado pelo potencial físico, e o valor da energia mecânica pelo rendimento físico. Portanto, todas as atividades físicas do corpo humano envolvem trocas de energia (Amadio, 1989).

Quando o músculo é estimulado, varia seu estado mecânico, e essa variação é chamada de contração. A contração se manifesta pela variação da tensão e do comprimento do músculo, assim como de outras propriedades mecânicas, tais como elasticidade e rigidez. As propriedades mecânicas

dos músculos são complexas e dependem das estruturas que formam o músculo (fibras musculares, miofibrilas entre outras) e do estado do músculo.

De acordo com Lehmkühl & Smith (1997), o músculo esquelético é composto por feixes de fibras. Cada fibra é composta por uma membrana chamada sarcolema, uma substância similar à “gelatina” chamada sarcoplasma, na qual estão imersos milhares de miofibrilas contráteis e outras estruturas importantes na geração de energia para a contração muscular.

A teoria mais aceita para explicar a contração muscular esquelética mecânica é encontrada em Hanson & Huxley *apud* Lehmkühl & Smith (1997), os quais propõem que um músculo se encurta e alonga porque os miofilamentos grossos e finos deslizam uns sobre os outros, sem que seu comprimento seja alterado. Dessa maneira, os filamentos de actina deslizam sobre os de miosina durante a contração. Portanto, verifica-se que a força necessária para a realização de um determinado movimento é resultado da liberação de energia que ocorre dentro da fibra muscular.

Contudo, para a realização do movimento esportivo é fundamental a força muscular e a velocidade de contração. Acredita-se que o resultado dessas ações (a potência muscular) está diretamente relacionada à secção transversa do músculo.

Quando isolamos uma fibra muscular e observamos ao microscópio, notamos estrias claras e escuras alternando-se regularmente. Dentro do sarcolema (membrana) está o sarcoplasma. Componentes tais como núcleos e as mitocôndrias estão suspensos neste fluido viscoso e avermelhado. O sarcoplasma também contém mioglobina, gordura, glicogênio, fosfocreatina, ATP e centenas de filamentos ou estruturas fibrilares chamados miofibrilas. Estas são constituídas pelas proteínas contráteis actina e miosina, paralelamente. Elas não têm função biológica primariamente estrutural, pois antes participam da atividade contrátil consumidora de energia.

A miosina é uma molécula longa, em forma de bastão, com duas cabeças globulares em uma das extremidades e uma cauda composta por duas cadeias em α -hélice enroladas entre si. Essas cadeias componentes da cauda são chamadas de cadeias pesadas, medem 160 nm e pesam cerca de 200 Kda individualmente. As cadeias leves são proteínas que ligam cálcio. Essas cabeças possuem atividade enzimática, catalisando a hidrólise do ATP (molécula armazenadora de energia química dentro da célula) em ADP + Pi (fósforo inorgânico) gerando, assim, a energia necessária para a contração. Acredita-se que a hidrólise do ATP seja acompanhada de mudanças na forma ou conformação da cabeça da miosina, produzindo força mecânica. Assim, a actina e a miosina, além das outras proteínas do sistema contrátil, são especializadas na transformação da energia química do ATP em energia mecânica da contração muscular.

Os filamentos de actina são delgados e ocorrem em duas formas: actina globular (actina G) e actina fibrosa (actina F). A actina é uma longa cadeia de moléculas de actina G (peso molecular 46.000 Daltons) associadas em forma de filamentos. Dois filamentos de actina F enrolam-se, um ao redor do outro, para formar uma estrutura semelhante a uma corda de dois fios.

Nas fibrilas musculares, os filamentos espessos e delgados estão arranjados de forma paralela, encaixando-se uns nos outros e formando grupos denominados sarcômeros. Durante a contração muscular, os filamentos espessos deslizam para o espaço entre os filamentos delgados provocando o encurtamento de toda a fibra muscular (Lehninger *et al.*, 1995; Murray *et al.*, 1994; Devlin, 1998).

Segundo Lehninger *et al.* (1995), Murray *et al.* (1994), Devlin (1998) e Mathews (1979), a organização dos filamentos de actina e miosina gera o padrão estriado apresentado pelas miofibrilas. As áreas claras são chamadas de banda I e as escuras de banda A. No meio de cada banda I existe uma linha escura, a linha Z (do alemão *zwischen*, que significa “entre”). Essas denominações são relativas ao que acontece quando a luz atravessa as bandas. Por exemplo, quando uma onda de luz passa através da banda A, a velocidade da luz emergente não é igual em todas as direções, ou seja, é anisotrópica. Quando passa através da banda I, a luz emerge com velocidade igual em todas as direções, e por isso é isotrópica (Figura 1).

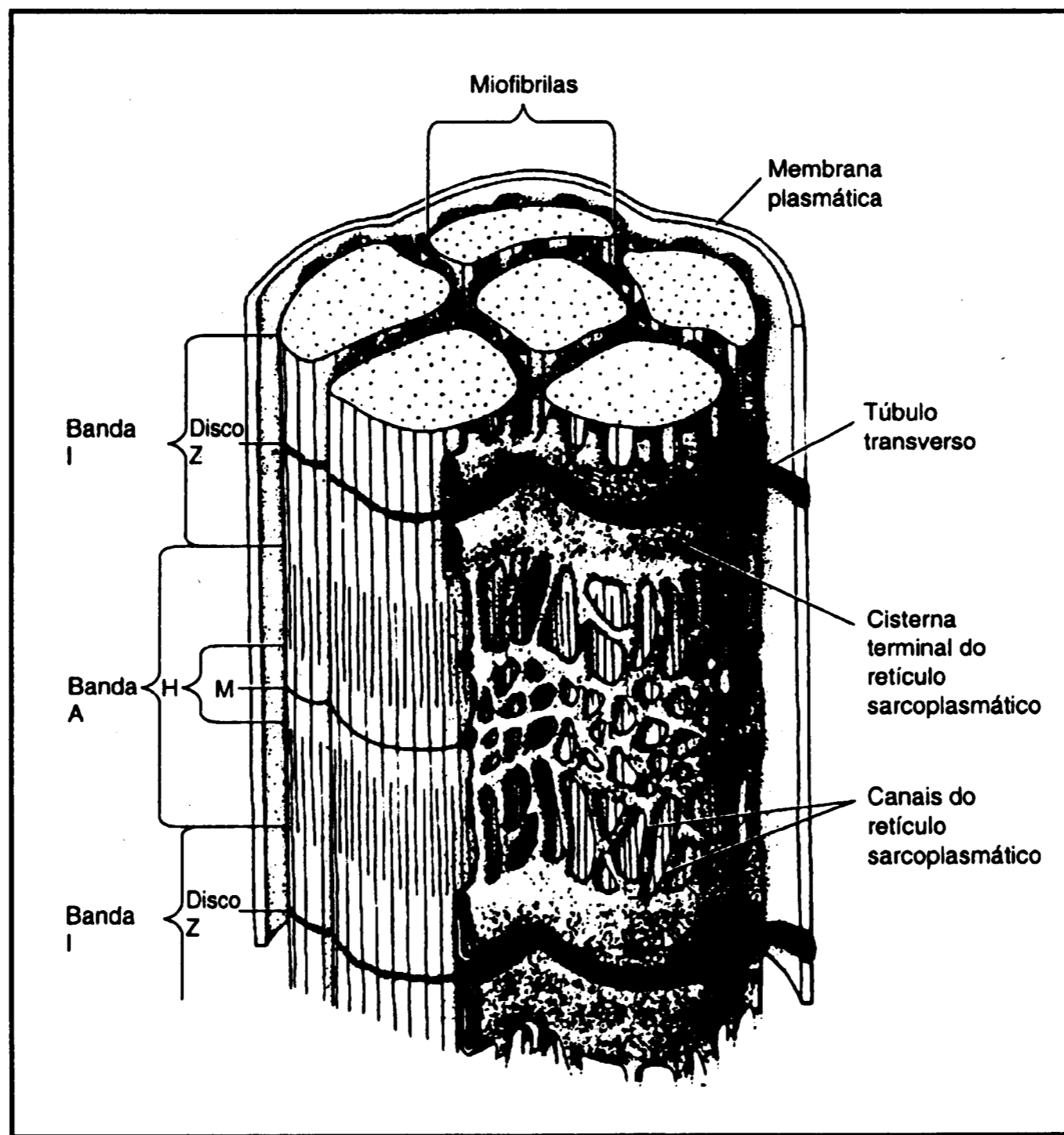


Figura 1: organização estrutural dos miofilamentos (adaptado de Devlin, 1998).

Circundando as miofibrilas, existe um sistema reticular de túbulos e vesículas chamado de retículo sarcoplasmático. Nas células do músculo esquelético, cuja contração é estimulada pelo íon cálcio, o retículo endoplasmático participa do processo de relaxamento, reabsorvendo íons cálcio.

Os túbulos longitudinais correm longitudinalmente às fibrilas. Estes tubos terminam, em ambas as extremidades, em vesículas ou cisternas chamadas vesículas externas. Este modelo reticular é regular ao longo de todo o comprimento das miofibrilas (Figura 2). As vesículas externas estão separadas por um grupo de túbulos chamados túbulos transversos (túbulos-T). Apesar de os túbulos-T estarem funcionalmente associados ao retículo sarcoplasmático, são anatomicamente separados deles. São extensões ou invaginações da membrana da célula muscular (sarcolema). Acredita-se que os túbulos-T sejam responsáveis pela propagação dos impulsos nervosos vindos do sarcolema em direção ao interior da célula. As vesículas contêm uma grande quantidade de cálcio. Conforme o impulso viaja pelos túbulos-T e entre as vesículas externas, o cálcio é liberado (Maughan *et al.*, 2000).

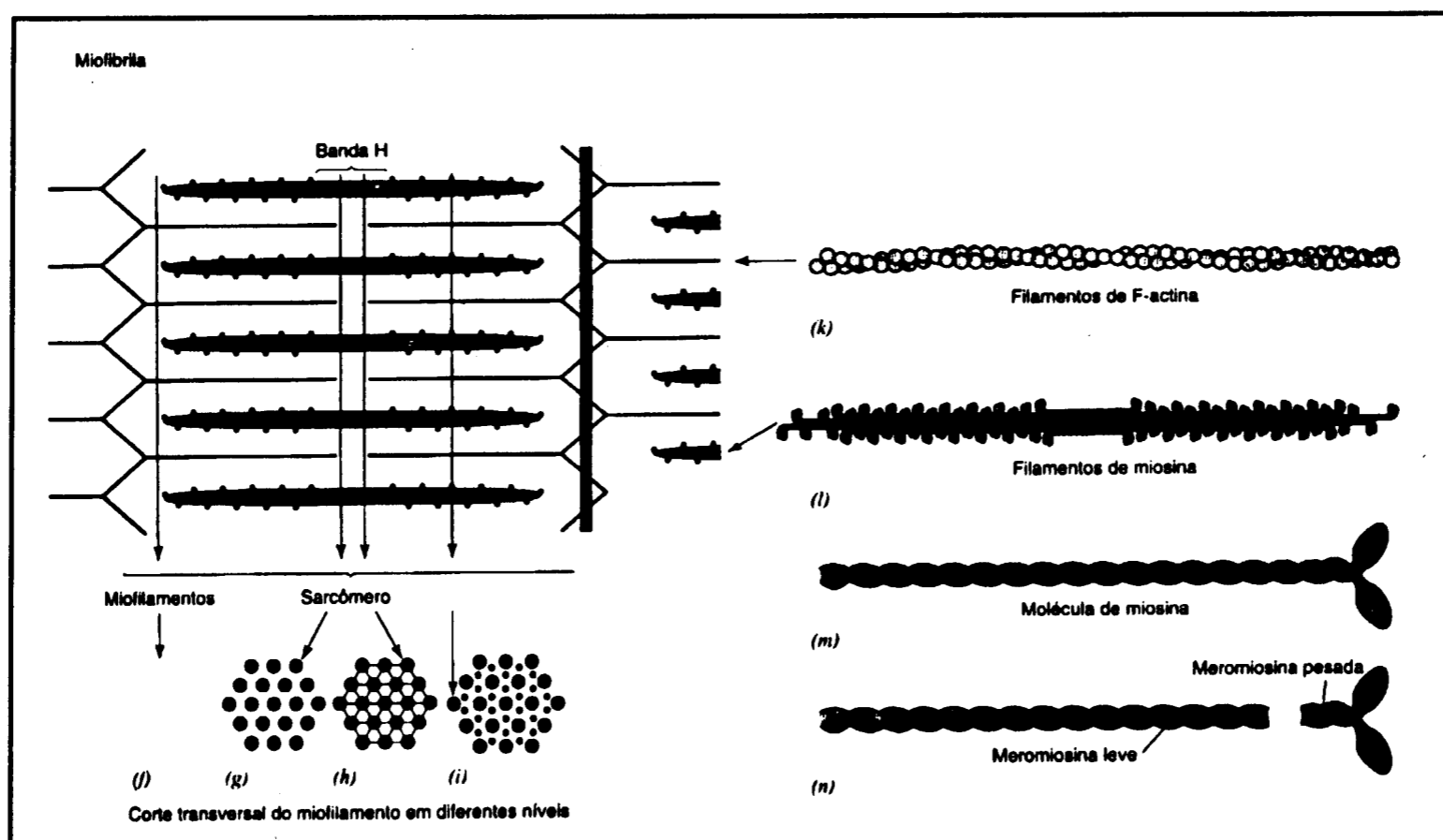


Figura 2: representação esquemática de um feixe de miofibrilas (adaptado de Devlin, 1998).

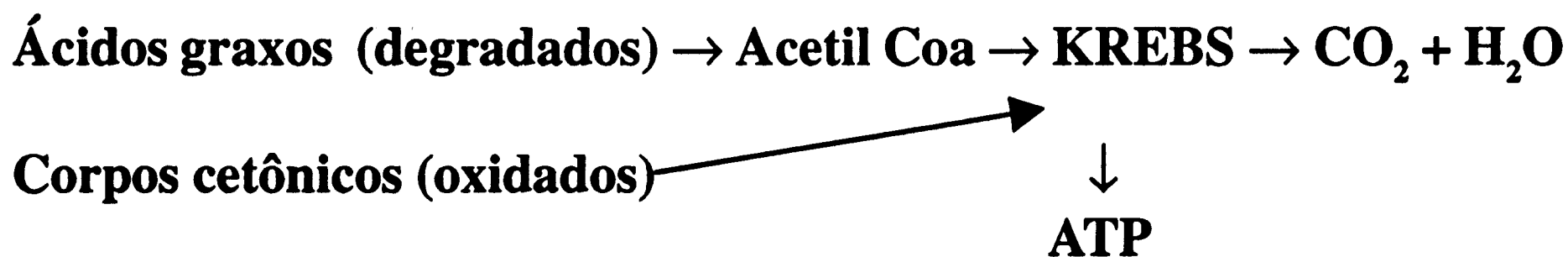
A contração e o relaxamento dos músculos esqueléticos são controlados pela concentração de cálcio no citosol. Normalmente, a concentração de cálcio no músculo é muito pequena; quando o nervo motor estimula a fibra muscular, túbulos membranosos que correm através da célula muscular liberam cálcio. Esses íons cálcio ligam-se, então, a uma proteína reguladora chamada troponina, localizada a intervalos ao longo dos filamentos delgados. A molécula de troponina funciona como um gatilho. Ela sofre mudança conformacional que ativa a função da ATPase das cabeças das moléculas de miosina, iniciando a contração. Enquanto íons cálcio livres estiverem presentes no citosol muscular, a troponina permanecerá ativa. O relaxamento muscular acontecerá quando cessar o impulso nervoso e o cálcio for transportado do sarcoplasma para as cisternas do retículo sarcoplasmático através da bomba de cálcio existente na membrana e que tem atividade ATPásica. Portanto, o ATP não somente é necessário para a contração, mas também para o relaxamento muscular.

Um composto fosfatado de alta energia desempenha um papel único na energética do músculo, e também de outros tecidos excitáveis, como cérebro e nervos. Esse composto é a *fosfocreatina* (creatina fosfato), que atua como forma de armazenamento temporário de grupos de alta energia. A creatina é sintetizada a partir de três aminoácidos diferentes: glicina, arginina e metionina. A fosfocreatina tem um ΔG^0 de hidrólise igual a $-10,3$ Kcal/mol, um valor um pouco maior que o da hidrólise do ATP ($-7,3$ Kcal/mol). Dessa forma, a fosfocreatina pode transferir seu grupo fosfato para o ADP em uma reação catalisada pela creatina quinase.

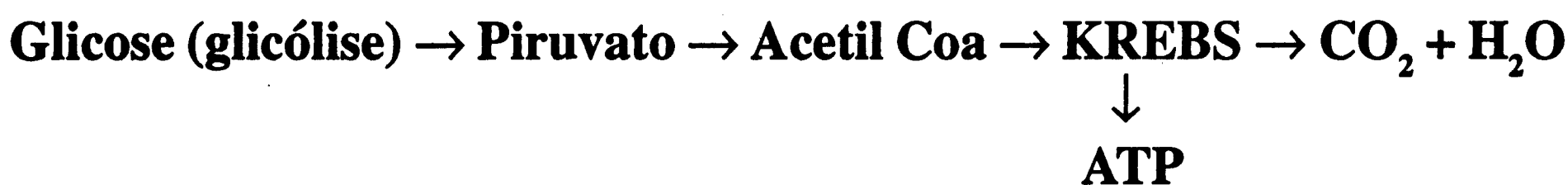


A fosfocreatina serve para manter a concentração de ATP constante e em altos níveis nos músculos esqueléticos, os quais devem executar trabalho em alta velocidade de forma intermitente e, às vezes, muito intensa. Sempre que o ATP da célula muscular é utilizado, forma-se ADP. Através da ação da creatina quinase, a fosfocreatina doa rapidamente seu grupo fosfato ao ADP, restaurando o nível normal de ATP. Como a concentração de fosfocreatina no músculo é de 3 a 4 vezes maior que a de ATP, ela pode armazenar grupos fosfato suficientes para manter o nível de ATP durante curtos períodos de atividade intensa.

Durante o período de recuperação, a creatina acumulada é refosforilada à fosfocreatina pelo ATP. Esta é a única via de formação e distribuição da fosfocreatina. Os músculos esqueléticos podem usar glicose, ácidos graxos livres ou corpos cetônicos como combustível, dependendo do seu grau de atividade. Quando o músculo está em repouso, os combustíveis básicos são ácidos graxos e corpos cetônicos (trazidos do fígado através do sangue).



Para os músculos moderadamente ativos, os combustíveis são glicose sanguínea, ácidos graxos e corpos cetônicos.



Em músculos altamente ativos, a demanda de ATP é tão grande que o fluxo sanguíneo não consegue fornecer oxigênio e combustível suficientes. Nessas condições, o glicogênio muscular armazenado é solicitado.

Glicogênio (glicogênio fosforilase) → Glicose (glicólise anaeróbica) → 2 Lactato + 2 ATP

A glicólise anaeróbica fornece uma energia extra de ATP, suplementando a produção basal de ATP resultante da oxidação aeróbica de outros combustíveis via ciclo do ácido cítrico (Krebs). A adrenalina estimula a formação da glicose sangüínea a partir do glicogênio no fígado e a quebra do glicogênio em lactato no músculo. Pelo fato do músculo esquelético não conter a glicose-6-fosfato, o glicogênio é completamente destinado a fornecer energia pela quebra glicolítica.

Há um limite superior para a quantidade de energia glicolítica disponível durante uma corrida de velocidade, porque o músculo não possui um grande armazenamento de glicogênio. Além disso, o acúmulo de ácido láctico, a diminuição do pH e a elevação da temperatura são fatores que tornam menos eficientes os músculos altamente ativos.

Na recuperação, existe consumo extra de oxigênio para oxidar o piruvato e o lactato, e regenerar o ATP e a fosfocreatina nos músculos. Simultaneamente, no fígado a glicose sangüínea é repostada a partir do lactato pela neoglicogênese e transferida aos músculos para reabastecer o seu glicogênio (Lehninger *et al.*, 1995).

Referências Bibliográficas

- AMADIO, A. C. *Fundamentos da biomecânica do esporte, considerações sobre análise cinética e aspectos neuro-musculares do movimento*. 1989. 119 fls. Tese (Livre Docência) – Escola de Educação Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- BASMAJIAN, J. V.; DE LUCA, C. J. *Muscle alive – Their functions revealed by Electromyography*. [S. l.]: Williams & Wilkins, 1985.
- DEVLIN, T. M. *Manual de Bioquímica com correlações clínicas*. São Paulo : E. Blucher, 1998.
- DONSKOI, D.; ZATSIORSKI, V. *Biomecânica de los ejercicios fisicos : manual*. Trad. Mabel T. Santos Amigo. Havana : Ed. Raduga, 1988.
- HALL, S. *Biomecânica básica*. Rio de Janeiro : Guanabara Koogan, 1993.
- HAMILL, J.; KNUTZEN, K. M. *Bases Biomecânicas do movimento humano*. São Paulo : Manole, 1999.
- HAY, J. G.; REID, J. G. *As bases anatômicas e mecânicas do movimento humano*. Rio de Janeiro : Prentice Hall do Brasil, 1985.
- LEHMKUHL, L. D.; SMITH, L. K. *Cinesiologia clinica de Brunstrom*. São Paulo : Manole, 1997.
- LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. *Princípios de Bioquímica*. São Paulo : Sarvier, 1995.
- MAUGHAN, R.; GLEESON, M.; GREENHAFF, P. *Bioquímica do exercício e do treinamento*. São Paulo : Manole, 2000.
- MURRAY, R. K.; GRANNER, D. K.; MAYES, P. A.; RODWELL, V. W. *Harper: Bioquímica*. São Paulo : Atheneu, 1994.
- MATHEWS, D. K.; FOX, E. L. *Bases fisiológicas da Educação Física e dos Desportos*. Rio de Janeiro : Interamericana. 1979.
- MIYASHITA, M. Biomechanics of sports from the viewpoint of methodological advances. In: KOMI, P.V. (Ed.) *Biomechanics V-B*. Baltimore : [s.n.], 1976. p. 151-157.

NIGG, B. M.; HERZOG, W. *Biomechanics of the musculo – skeletal system*. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1994.

RASCH, P. J. *Cinesiologia e Anatomia Aplicada*. Rio de Janeiro : Guanabara Koogan, 1991.

WINTER, D. A. *Biomechanics of human movement*. Waterloo, Canadá : A Wiley – Interscience Publication, 1979.

The mechanism of muscle contraction during human movement

Abstract

The sport physical activity differs from other activities for the gestures themselves, different among the several daily tasks, that should bring from an agreement of a perfect knowledge of the structure of the movement, objectifying its optimization. The basis of this structure is in the human neuromuscular system. The movement is a direct consequence of the muscular contractile function, that transforms chemical into mechanical energy, facilitating the movement in certain parts of the human body or of the body as a whole. The human organism possesses in its constitution an approached number of 430 skeletal muscles, distributed in all the areas of the body. The muscle is composed by fibers that are constituted by actin filaments and miosine. During the muscular contraction it happens the sliding of the actina filaments on the one of miosine and this way the necessary energy for the realization of the movement is liberated.

Key words: movement; muscle; contraction; energy; actin; miosine.

BRUNIERA, C. A. V.; BRUNIERA, L. B. The mechanism of muscle contraction during human movement. *UNOPAR Cient., Ciênc. Biol. Saúde*, Londrina, v. 2, n. 1, p. 135-141, out. 2000.