

# MECANISMO DA CONTRAÇÃO MUSCULAR

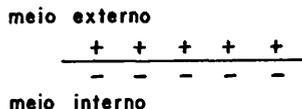
JOSÉ ANTONIO LEVY \*

ARON J. DIAMENT \*\*

SYLVIO SARAIVA \*\*

A fibra muscular estriada é constituída por uma membrana (sarcolema), pelo citoplasma indiferenciado (sarcoplasma), pelas miofibrilas e pelos núcleos subsarcolêmicos. O sarcolema, de importância fundamental para a contração muscular, constitui a membrana que separa o meio interno, rico em íons potássio, e o meio externo, rico em íons sódio. Quando íntegra, esta membrana permite apenas a passagem de íons positivos, e só no sentido de dentro para fora; em vista disso, a disposição das cargas elétricas vizinhas a esta membrana adquire característica especial, isto é, as cargas positivas ficam para fora do sarcolema e as cargas negativas, para dentro (fig. 1).

*Fig. 1 — Representação esquemática da membrana celular em repouso, com a distribuição das cargas elétricas em relação aos meios interno e externo.*



Uma membrana com tal disposição das cargas elétricas ao seu redor, diz-se polarizada<sup>3</sup>; ela será despolarizada por qualquer causa química, física ou mecânica capaz de alterar esta disposição. O estímulo representado pelo influxo nervoso é responsável pela produção de acetilcolina ao nível da terminação dos nervos nos músculos; a acetilcolina despolariza a membrana sarcolêmica e, quando esta despolarização atinge um certo limiar, forma-se uma onda de despolarização, que se propaga pela fibra muscular, provocando a contração. É um processo semelhante ao que se passa num rastilho de pólvora, em que a energia utilizada para a propagação do fogo é a própria pólvora colocada adiante. Assim, a onda de negatividade ca-

---

Trabalho da Clínica Neurológica da Fac. Med. da Univ. de São Paulo (Prof. Adherbal Tolosa).

\* Assistente. \*\* Médicos auxiliares.

minha pela fibra à custa das cargas elétricas positivas situadas adiante, do lado de fora da membrana (fig. 2).

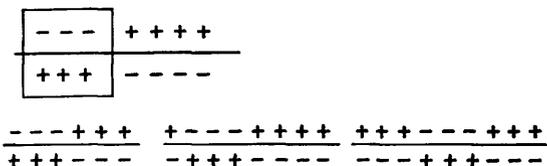


Fig. 2 — Esquema da propagação do estímulo nervoso ao longo da membrana muscular.

Para que se processe a contração muscular, além do estímulo representado pelo influxo nervoso, cujo modo de ação é ainda discutido, concorrem dois outros elementos: a substância contrátil e a energia para contração.

A substância contrátil do músculo é representada pela actomiosina e a energia para a contração é fornecida pelo ATP (ácido adenosintrifosfórico), substância dotada de radicais fosfóricos ricos em energia e que produzem, ao se libertarem, cerca de 10.000 cal. para cada radical fosfórico, sendo esta energia aproveitada sob a forma de energia química.

*Actomiosina* — A substância contrátil da miofibrila, ou actomiosina, não existe como tal na fibra muscular relaxada. Neste estado, encontramos filamentos de actina e de miosina, separados uns dos outros, dando a falsa impressão de estriação transversal vista nos exames histopatológicos dos músculos<sup>2,3</sup>. Os filamentos de actina e miosina são mantidos separados por meio de cargas elétricas, já que existe no músculo um verdadeiro equilíbrio iônico, os grupos carboxílicos destas proteínas sendo neutralizados pelos íons  $K^+$ <sup>1,4</sup>. A actina existe no músculo sob duas formas: a actina G (globular) e a actina F (fibrosa). Sômente a actina F é que se liga à miosina para formar a F-actomiosina<sup>1</sup>. A transformação da actina G em actina F depende da concentração de íons  $Na^+$ ,  $K^+$  e  $Mg^{++}$ . A miosina, por outro lado, só se une à actina F quando ligada ao íon  $Mg^{++}$ , formando o miosinato de  $Mg$ <sup>3</sup> (fig. 3). Isto demonstra a importância destes íons ( $Na^+$ ,  $K^+$  e  $Mg^{++}$ ) na formação da substância contrátil do músculo (F-actomiosina).

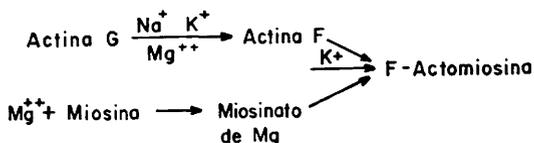
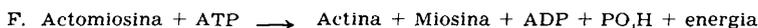


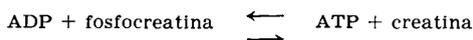
Fig. 3 — Esquema das reações químicas que se verificaram na formação da substância contrátil do músculo (actomiosina).

Uma vez chegado o influxo nervoso, a fibra muscular se despolariza e rompe-se o equilíbrio iônico existente em seu interior, formando-se, então, a F-actomiosina. Esta possui uma função chamada atepásica<sup>3</sup>, capaz de libertar radicais fosfóricos ligados ao ATP, radicais cuja energia será utilizada para que a contração se processe<sup>1</sup>. Nessas condições o ácido adenosintrifosfórico (ATP) é transformado no ácido adenosindifosfórico ou ADP:



Entretanto, o músculo seria uma “máquina” de péssimo rendimento se não reaproveitasse as radicais fosfóricos e o ADP libertados, para a ressíntese do ATP. O ATP é formado, no músculo, por dois mecanismos (fig. 4)<sup>2</sup>:

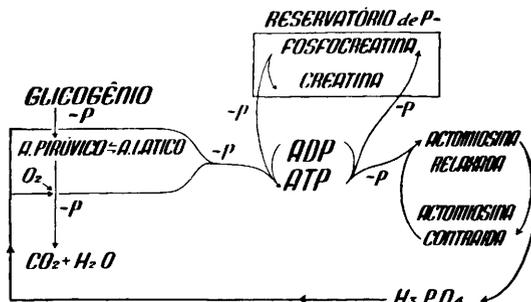
a) Combinação da fosfocreatina com o ADP, resultando a formação de ATP e creatina, segundo a reação:



Esta reação, que é reversível, constitui um meio de poupança de ATP pelo músculo, o qual pode, nos momentos de grande necessidade, aproveitá-lo novamente.

b) Normalmente, entretanto, o ATP muscular é formado a partir do ADP e do fósforo rico em energia no decorrer do mecanismo da glicólise<sup>2</sup>. A glicólise é realizada em duas fases a partir do glicogênio muscular. Numa primeira fase, anaeróbica, há degradação da glicose até ácido pirúvico, o qual, quando persiste a falta de oxigênio, é transformado em ácido láctico. A segunda fase, aeróbica, consiste nas reações do ciclo do ácido cítrico ou ciclo de Krebs que, partindo do ácido pirúvico, vai até a formação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (figs. 4 e 5).

Fig. 4 — Representação esquemática dos dois mecanismos de ressíntese do ATP a partir da fosfocreatina e pela glicólise.



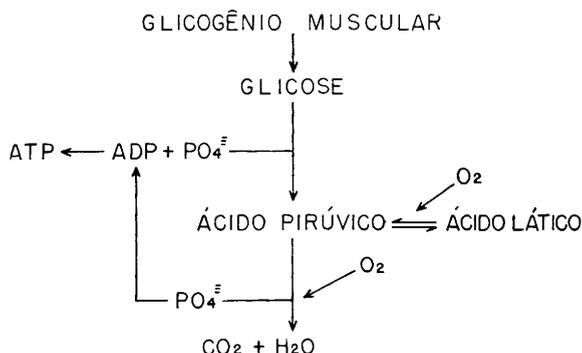


Fig. 5 — Representação esquemática da glicólise e sua relação com o mecanismo de produção do ATP.

*Glicólise anaeróbia* — Consiste em uma série de reações químicas por meio das quais o glicogênio muscular é transformado em ácido pirúvico. Nesta cadeia de reações há liberação de energia sob a forma de fosfatos que entram na síntese do ATP à custa do ADP. Como resultado dessa fase anaeróbia, para cada 6 átomos de carbônio, ou para cada molécula de glicose que reage, há formação de 3 moléculas de ATP, as quais fornecerão energia para a contração muscular.

O músculo pode, assim, funcionar durante algum tempo em anaerobiose; esta persistindo, haverá produção de ácido lático que se acumula no músculo, causando dor; entretanto, a reação é reversível, em condições de oxigenação favoráveis, formando-se novamente ácido pirúvico a partir do ácido lático.

O tecido muscular é, no entanto, um tecido fundamentalmente aeróbio<sup>2</sup>. É na fase aeróbia da glicólise, na cadeia de reações conhecida como ciclo de Krebs, que se produz a maior quantidade do combustível necessário para a contração muscular.

*Ciclo aeróbio* — No decorrer das reações do ciclo do ácido cítrico, a energia é liberada sob a forma de radicais fosfóricos que são aproveitados novamente para a síntese do ATP muscular. Para cada 6 carbônios ou 2 moléculas de ácido pirúvico formam-se 30 moléculas de ATP; cada uma destas fornece 10.000 cal.; portanto, cada 2 moléculas de ácido pirúvico propicia ao músculo a produção de 300.000 cal. Entretanto, esta energia não é liberada de uma vez e sim gradativamente, pois tal quantidade de energia “queimaria” as proteínas celulares.

O músculo é, portanto, um tecido essencialmente aeróbio. Quando o trabalho muscular é muito intenso, a quantidade de oxigênio utilizada pelo músculo é maior do que a quantidade que este músculo pode receber por

via sangüínea. Para que tal fato não ocasione imediatamente a anaerobiose, com conseqüente produção de ácido láctico, o músculo possui uma reserva de oxigênio representada pela mioglobina.

A mioglobina, constituída por uma protoporfirina férrica, molécula semelhante à hemoglobina, tem muito maior capacidade do que esta para acumular oxigênio, o qual é liberado quando o músculo assim o necessita<sup>1</sup>. Se as condições de anaerobiose persistirem há interrupção da glicólise na fase de ácido pirúvico e ácido láctico, reação reversível, como já vimos. Com a chegada de oxigênio, dentro de um certo tempo, antes que haja destruição do músculo, há novamente a formação de ácido pirúvico, iniciando-se, então, a fase aeróbia da glicólise, fase na qual grande contingente de energia sob a forma de fosfatos é fornecida para a ressíntese do ATP.

Em síntese, pois, teremos: 1) estímulo nervoso e conseqüente despolarização da membrana; 2) rotura do equilíbrio iônico no interior da fibra muscular e conseqüente formação da actomiosina; 3) reação do ATP com a actomiosina, com produção de energia para a contração do músculo; 4) ressíntese do ATP à custa do ADP e dos radicais fosfóricos ricos em energia, por dois mecanismos, isto é, reação do ADP com a fosfocreatina e aproveitamento dos radicais fosfóricos liberados nas fases aeróbia e anaeróbia da glicólise.

#### RESUMO

Os autores apresentam uma síntese dos conceitos atuais sôbre o mecanismo da contração muscular. Inicialmente estabelecem o conceito de membrana polarizada e despolarizada. Salientam a importância da substância contrátil (actomiosina) e da energia fornecida pelo ácido adenosintrifosfórico. São discutidas também as reações químicas que se processam para a formação dessas substâncias, bem como o papel da mioglobina na contração muscular.

#### SUMMARY

##### *Mechanism of muscular contraction.*

The authors present a synthesis on the mechanism of muscle contraction. Firstly they establish the concept of polarized and depolarized membrane. They emphasize the importance of the contractile substance (actomyosin) and of the energy furnished by the adenosinetriphosphate. They also discuss on the chemical reactions which take place to form these substances, as well as on the part played by the myohaemoglobin in the muscular contraction.

## REFERÊNCIAS

1. ADAMS, R.; DENNY-BROWN, D.; PEARSON, C. — Enfermedades del Músculo. Tradução castelhana. Editora La Fragua, Buenos Aires, 1957.
2. BELL, G. H.; DAVIDSON, J. N.; SCARBOROUGH, H. — Textbook of Physiology and Biochemistry. Livingstone, Londres, 1959.
3. BUSCAINO, G. A. — Panorama patogenetico-biochimico delle distrophie muscolari e della miotonia. Acta Neurol. (Nápoles), 14:101-246 (março-abril) 1959.
4. SZENT-GYÖRGYI, A. — What we need know about muscle. Neurology, 8:65-79 (janeiro) 1958.

*Clinica Neurológica — Hospital das Clínicas da Fac. Med. da Univ. de São Paulo  
— Caixa Postal 3461 — São Paulo, Brasil.*