

# RELACIÓN ENTRE CONTRACCIÓN MUSCULAR Y CONSUMO ENERGÉTICO

La contracción muscular depende directamente del consumo de energía en forma de ATP, que actúa como la fuente inmediata para el ciclo de los puentes cruzados entre actina y miosina y para el bombeo de calcio hacia el retículo sarcoplásmico durante la relajación. La energía liberada por el músculo puede manifestarse como calor, producto de las reacciones químicas internas, o como trabajo mecánico, cuando el músculo se acorta y genera movimiento. En este sentido, la cantidad de energía utilizada refleja la intensidad y el tipo de contracción realizada. Las contracciones concéntricas, en las que el músculo se acorta, requieren un consumo rápido de ATP y suelen depender del sistema de fosfágenos, especialmente en esfuerzos explosivos de corta duración como un sprint o un levantamiento de pesas.

Las contracciones excéntricas, en las que el músculo se alarga mientras mantiene tensión, resultan más eficientes energéticamente porque aprovechan la resistencia externa, mientras que las contracciones isométricas, que generan tensión sin modificar la longitud del músculo, implican un consumo sostenido de energía y recurren con frecuencia a la glucólisis anaeróbica. En esfuerzos prolongados y de baja intensidad, el metabolismo aeróbico se convierte en la vía predominante, utilizando oxígeno y diferentes sustratos como glucosa, ácidos grasos y aminoácidos para producir grandes cantidades de ATP de manera más lenta pero altamente eficiente.

La fatiga muscular aparece cuando las reservas de ATP disminuyen o se acumulan subproductos como el lactato, lo que limita la capacidad del músculo para mantener la contracción. Así, la relación entre contracción muscular y consumo energético se entiende como un equilibrio dinámico entre el tipo de contracción, la vía metabólica predominante y la disponibilidad de oxígeno y nutrientes, factores que determinan tanto el rendimiento como la resistencia del músculo en diferentes condiciones fisiológicas y de ejercicio. En los últimos cincuenta años, uno de los avances más importantes en el estudio de la energética muscular ha sido la identificación y orden de las reacciones bioquímicas que ocurren durante la contracción. Investigadores como Roger Woledge y Nancy Curtin en el Reino Unido, y Earl Homsher, Jack Rall y Martin Kushmerick en Estados Unidos, demostraron que la primera reacción clave es la hidrólisis del ATP, que constituye la fuente directa de energía para la contracción.

Se comprobó que la ruptura de la fosfocreatina (PCr), aunque frecuente, no aporta energía directamente para el movimiento, sino que funciona como un sistema de amortiguación para mantener estable el nivel de ATP. La energía que permite la generación de fuerza en los puentes cruzados de actina y miosina, así como el bombeo de iones contra gradientes electroquímicos, proviene de la energía libre liberada al hidrolizarse el ATP. El ADP resultante de esta reacción se refosforila rápidamente gracias a la acción de la creatina quinasa, utilizando la PCr como fuente inmediata. En contracciones breves, como las que ocurren en músculos de rana o ratón en condiciones experimentales, la reacción más significativa es precisamente la ruptura de PCr, debido a la rapidez con la que se regenera el ATP. Por esta razón, se suele considerar la hidrólisis de ATP y la reacción de la creatina quinasa como una sola reacción “inicial”, que ocurre independientemente de la presencia de oxígeno.

Posteriormente, entran en juego las llamadas reacciones “de recuperación”, encargadas de regenerar la PCr. En presencia de oxígeno, el ATP producido en las mitocondrias se utiliza para fosforilar la creatina, mientras que el ADP se refosforila mediante fosforilación oxidativa. Además, el ATP puede producirse por glucólisis, incluso sin oxígeno. En conjunto, la energía bioquímica de un músculo en contracción se basa en la hidrólisis del ATP seguida de una serie de reacciones que lo regeneran, tanto en tiempos cortos como en procesos más prolongados, asegurando así la continuidad del trabajo muscular.



En el estudio de la contracción muscular se distingue entre los costos energéticos asociados a la generación de fuerza y aquellos vinculados con la activación. La activación comprende la liberación de calcio desde el retículo sarcoplásmico, su unión a los filamentos contráctiles para permitir el ciclo de los puentes cruzados y, finalmente, su retorno al retículo. Estos procesos producen lo que se denomina calor de activación (hA). La unión del calcio a proteínas como la troponina C (TnC) o la parvalbúmina (Pv), presentes en músculos de

contracción rápida, genera calor, pero esa misma cantidad se absorbe durante la disociación, de modo que en un ciclo completo no hay producción neta de calor por este mecanismo.

En consecuencia, el calor de activación está directamente relacionado con la cantidad de ATP que consume la bomba de calcio del retículo sarcoplásmico para devolver el ion a su lugar de almacenamiento.

La forma de cuantificar los costos energéticos de la activación y del ciclo de los puentes cruzados se logró aprovechando la estructura del filamento deslizante. Si un músculo se estira lo suficiente como para que no exista superposición entre los filamentos gruesos y delgados, se puede medir el calor producido o el recambio de ATP sin que intervenga la generación de fuerza. En el músculo de rana, la máxima superposición ocurre con sarcómeros de aproximadamente 2,2  $\mu\text{m}$ , y desaparece a 3,65  $\mu\text{m}$ ; en mamíferos, los filamentos delgados son más largos y la superposición se elimina alrededor de 4  $\mu\text{m}$ . Para evitar daños en músculos como el sartorio de rana, se utilizó el semitendinoso, más resistente al estiramiento, en las mediciones de activación.

Los experimentos mostraron que, al aumentar la longitud del músculo más allá de la longitud óptima ( $l_0$ ), la fuerza máxima disminuye y también lo hace la producción de calor, aunque en menor proporción. La relación entre calor y fuerza es lineal y presenta una intersección positiva en el eje de calor, lo que indica la existencia de un componente independiente de la fuerza: el calor de activación. Estudios posteriores confirmaron que la cantidad de calcio liberado durante la contracción es independiente de la longitud del sarcómero, y que incluso cuando se bloquea la generación de fuerza, el calor de activación permanece prácticamente constante. Estos hallazgos refuerzan la conclusión de que el calor independiente de la fuerza corresponde al costo energético de la activación, es decir, al gasto necesario para movilizar y reciclar el calcio durante la contracción muscular.

**Referencia:**

*Barclay, C. J., & Curtin, N. A. (2023). Advances in understanding the energetics of muscle contraction. In Journal of Biomechanics (Vol. 156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111669>*