

Simulación computacional de la contracción de fibras musculares: desvelando la función estructural del endomisio

Miriam Corral¹, Begoña Calvo^{1,2}, Jorge Grasa^{1,2}

¹Grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería (AMB)
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.
Tel. +34-976762707, e-mail:jgrasa@unizar.es

²Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), España

Resumen

El tejido conjuntivo es un elemento de soporte estructural de los músculos. El endomisio es la capa que envuelve las membranas basal y plasmática de las fibras musculares. Este estudio analiza cómo los cambios en la longitud de dos fibras conectadas por dicho tejido afectan la fuerza activa durante la contracción, considerando su comportamiento anisotrópico.

Introducción

El tejido conjuntivo asociado al músculo esquelético puede dividirse en tres capas: el epimisio, que rodea todo el músculo, el perimisio, que rodea los haces de fibras musculares, y el endomisio, que es una capa muy fina que envuelve las fibras musculares individuales dentro de un músculo [1].

El endomisio transmite la fuerza generada por la contracción de las fibras a los tejidos conjuntivos circundantes, que a su vez la conducen a tendones y huesos para producir el movimiento. Un músculo en contracción puede ejercer presión sobre músculos adyacentes ortogonales a su línea de tracción. Además, se ha demostrado que las cargas miofasciales resultantes de cambiar la posición relativa de un músculo con respecto a sus estructuras circundantes influyen en las capacidades de producción de fuerza muscular [2].

En este trabajo, pretendemos analizar el papel del endomisio en la producción de fuerza activa mediante un modelo numérico, para comprender la cantidad de fuerza activa en función de distintos alargamientos que se les impone a las fibras musculares.

Materiales y métodos

Siguiendo a Danesini et al., 2024 [2], se modelaron dos fibras musculares individuales, cada una de 1,3 mm de longitud y con un área transversal

circunferencial total de 0,009 mm². Ambas fibras están recubiertas y conectadas por una capa de 5µm de colágeno. La malla de elementos finitos se muestra en la Figura 1.a. El modelo está definido por 8360 elementos con aproximación cuadrática y 9480 nodos.

El comportamiento del material del endomisio se consideró hiperelástico y transversalmente isótropo, caracterizado por una orientación preferente alineada a 55° a lo largo de su longitud [1]. Para la simulación de la contracción activa de las fibras musculares, se derivó una relación constitutiva hiperelástica isótropa a partir de la siguiente función de densidad de energía de deformación:

$$\Psi_{fiber} = \frac{1}{2} P_0 (J_4 - 1)^2 f_{train}(t) f_\lambda(\lambda) \quad (1)$$

donde P_0 es la tensión isométrica máxima, J_4 es un pseudo invariante que representa la contracción elástica de las fibras y es derivada de la velocidad de contracción, $f_{train}(t)$ es la función de activación y $f_\lambda(\lambda)$ es la relación fuerza-longitud [3]. La Figura 1.b representa la alineación de las fibras de colágeno y una de las principales direcciones utilizadas para la contracción de las células musculares.

Resultados

La Figura 2.a representa la tensión (KPa) generada por la fibra muscular ante los distintos acortamientos ($\lambda < 1$) y alargamientos ($\lambda > 1$) impuestos a la fibra previamente a la activación. Se puede observar que, la tensión activa es máxima (110 kPa) para un alargamiento ($\lambda = 1.07$), que se puede considerar como el alargamiento óptimo. La respuesta activa del músculo disminuye cuando el alargamiento se aleja de dicho valor. En la Figura 2.b se muestra la evolución de la tensión activa generada por la fibra muscular durante la activación.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran cómo la presencia de las fibras de colágeno en el endomisio influye significativamente en la transmisión de fuerza. Aunque la formulación utilizada para la activación de las fibras musculares (Eq. (1)) contempla el efecto del solapamiento de los filamentos de actina y miosina [3], el análisis de la tensión total generada (Figura 2.b) revela que esta alcanza su valor máximo cuando las fibras de colágeno del endomisio se encuentran alineadas y sometidas a estiramiento.

Agradecimientos

Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (Subvención PRE2023-UZ-13 y PID2023-147987OB-C31 y el Departamento de Industria e Innovación (Gobierno de Aragón) a través del grupo

de investigación Subvención T24-20R (cofinanciada por Feder).

Referencias

- [1] PURSLOW P.P., Strain-included reorientation of an intramuscular connective tissue network: implications for passive muscle elasticity. *J. Biomech.* 22:21-31, 1989
- [2] DANESINI, P. C., HEIM, M., TOMALKA, A., SIEBERT and T., ATES, F. Endomysium determines active and passive force production in muscle fibers, *J. Biomech.* Doi: 168:112134, 2024.
- [3] GRASA, J., SIERRA, M., LAUZERAL, N., MUÑOZ, M.J., MIANA-MENA, F. J., CALVO, B., Active behavior of abdominal wall muscles : Experimental results and numerical model formulation, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 61, 2016

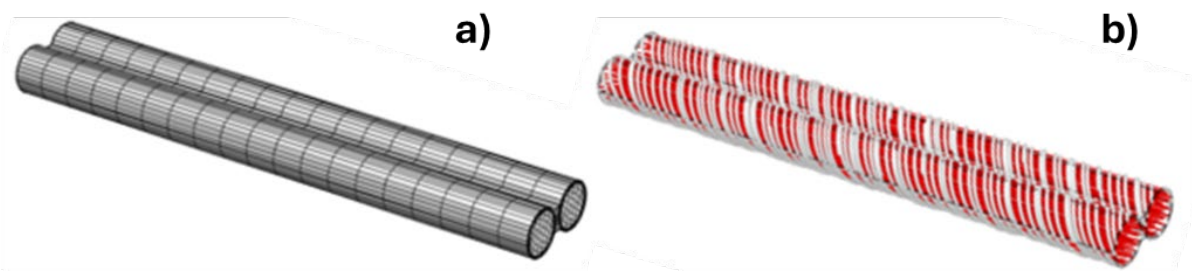


Figura 1: a) Malla de EF de las fibras musculares. b) Disposición del colágeno (gris) y fibras musculares (rojo).

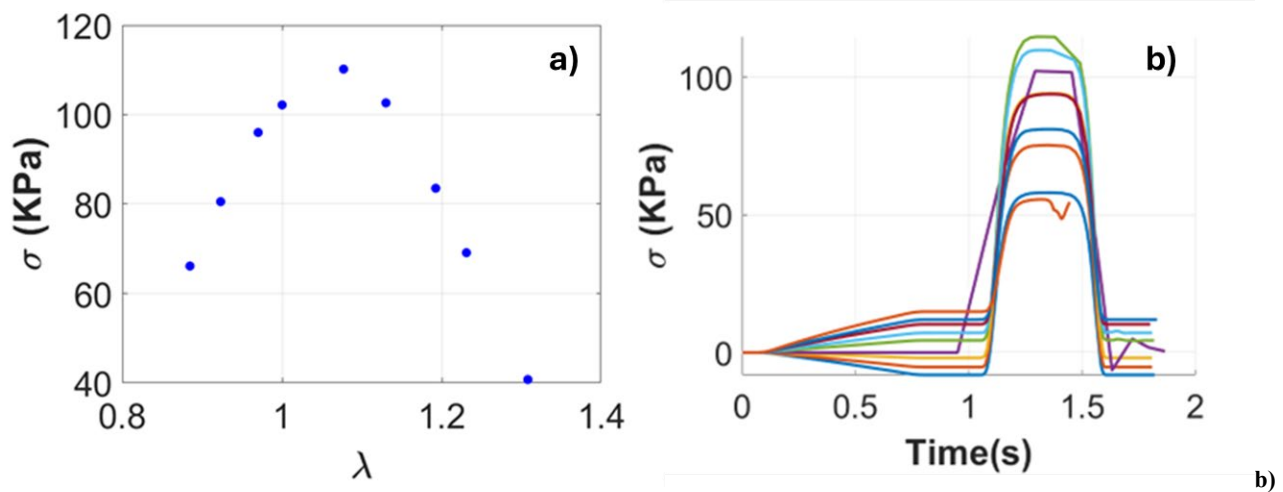


Figura 2: a) Evolución de la tensión en las fibras a lo largo del tiempo para distintos alargamientos. b) Evolución de la tensión en las fibras para los distintos alargamientos.