

Caracterización experimental del comportamiento mecánico pasivo elástico y viscoelástico en ventrículo izquierdo de corazón de cerdo

Nicolás Laita¹, Miguel Ángel Martínez^{1,2}, Manuel Doblaré^{1,2}, Estefanía Peña^{1,2}

¹ Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, España. Tel. +34-976762707, e-mail: nlaita@unizar.es

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

Resumen

Con el objetivo de caracterizar mecánicamente el tejido cardíaco porcino, se han llevado a cabo diferentes ensayos mecánicos sobre siete animales. Se han realizado ensayos biaxiales y tangenciales, elásticos y viscoelásticos. El procedimiento utilizado permite caracterizar el comportamiento del tejido con cualquier modelo de material existente en literatura.

Introducción

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte a nivel mundial. En el caso del corazón, aspectos mecánicos como pueden ser la rigidez del miocardio o la capacidad de contracción de los ventrículos son parámetros fundamentales, y tienen un gran impacto sobre el comportamiento de éste [1]. Además, el modelado computacional mediante elementos finitos se ha establecido como una de las principales herramientas para comprender la respuesta fisiológica del corazón [2]. Sin embargo, el desarrollo de modelos computacionales realistas requiere una correcta formulación de leyes constitutivas y una adecuada obtención de los parámetros que caracterizan mecánicamente el tejido estudiado. Por todo esto, el desarrollo de estudios experimentales que brinden información sobre las características mecánicas del tejido cardíaco es esencial en este campo. En los últimos años, se han realizado numerosos estudios mecánicos pasivos en tejido cardíaco de diferentes especies con el objetivo de caracterizar el comportamiento mecánico de éste [3-5], pero siempre en régimen elástico. Se ha demostrado que el tejido miocárdico tiene un comportamiento ortótropo y que está sometido a complejos esfuerzos de tracción, compresión y tangenciales durante el ciclo cardíaco [2,4]. Por lo tanto, para ser capaces de caracterizar esta respuesta ortótropa es necesario realizar ensayos de extensión biaxial a diferentes ratios de carga y ensayos tangenciales en las diferentes direcciones del tejido [4]. Siguiendo esta línea, en este estudio se han realizado ensayos mecánicos sobre tejido cardíaco porcino con el objetivo de ser capaces de caracterizarlo completamente, tanto desde el punto de vista de la elasticidad como de la viscoelasticidad.

Métodos

En total, se obtuvieron muestras de ventrículo izquierdo porcino de 7 animales distintos. Durante el sacrificio se procedió a perfundir el corazón con líquido de cardioplejia y, tras la extracción, tanto el corazón como las muestras posteriormente obtenidas, se mantuvieron en dicho líquido a 4°C. Todas las muestras fueron obtenidas en las primeras 12 horas después de la extracción. Con el objetivo de obtener una caracterización tridimensional completa, se han realizado siguiendo las metodologías encontradas en la literatura [4,5] ensayos biaxiales y ensayos tangenciales, considerando en estos últimos las tres direcciones determinadas por la orientación de las fibras musculares. Todos los ensayos se realizaron tanto para la caracterización elástica como viscoelástica. Para los ensayos biaxiales, se obtuvieron muestras de 25x25x1 mm alineadas con la dirección de las fibras musculares (MFD) y la dirección transversal (CFD). A estas muestras se aplicaron diferentes niveles de deformación (5-20% con incrementos de 5%) en un régimen cuasi estático (3 mm/min). Se estudiaron 5 ratios de carga diferentes (1(MFD)-1(CFD), 1-0.75, 1-0.5, 0.75-1, 0.5-1). También se llevaron a cabo ensayos de relajación viscoelástica. En ellos, se aplicó una carga cíclica a alta velocidad (30 mm/min) para los niveles de deformación comentados anteriormente, seguida de una fase de relajación de 15 minutos. Entre todas las muestras, se realizaron un total de 16 ensayos elásticos y 6 viscoelásticos. Para los ensayos tangenciales, se obtuvieron muestras cúbicas de miocardio de 4 mm de lado, alineados con las tres direcciones principales relativas a las fibras: la dirección determinada por las fibras musculares (F), la dirección transversal a las fibras dentro del plano que éstas forman (S) y la dirección perpendicular al plano FS (N). A estas muestras se les aplicó un esfuerzo tangencial a 5 niveles de deformación (10-50% con incrementos de 10%) en un régimen cuasi estático (2 mm/min). También se realizaron ensayos tangenciales viscoelásticos siguiendo la misma metodología que en los ensayos biaxiales. Entre todas las muestras, se realizaron un total de 51 ensayos elásticos y 10 viscoelásticos.

Resultados

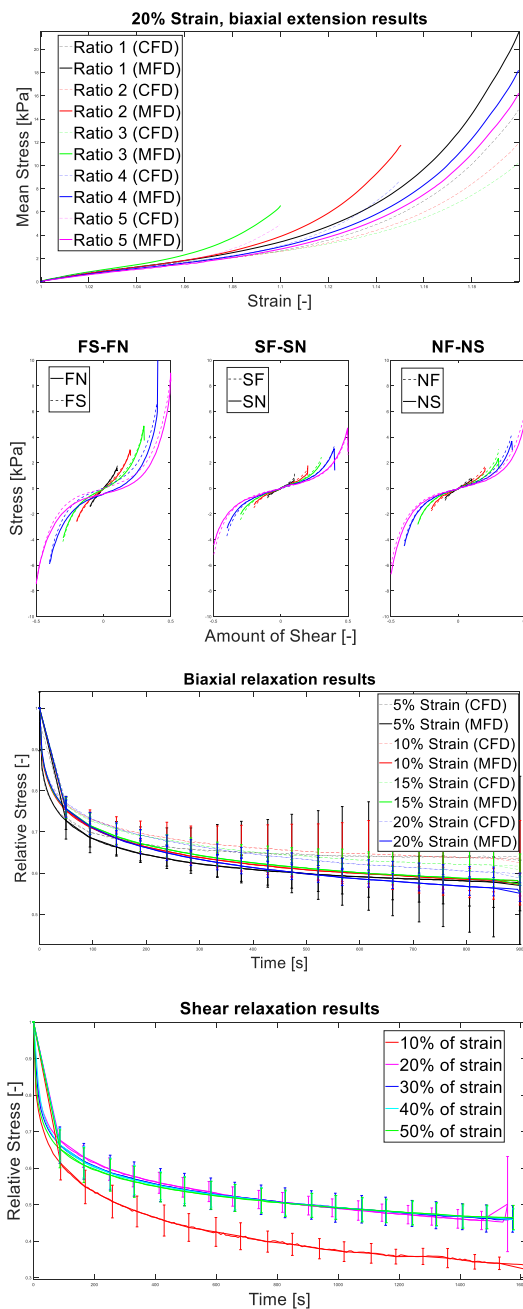


Figura 1. Resultados medios de los ensayos: Ensayos elásticos biaxiales (i) y tangenciales (ii), ensayos viscoelásticos biaxiales (iii) y tangenciales (iv)

En las dos primeras imágenes de la Figura 1, se muestran los resultados de los ensayos elásticos. Los ensayos biaxiales muestran una respuesta anisótropa, demostrando un comportamiento más rígido en el eje que contiene las fibras musculares (MFD). Este comportamiento es el esperado para este tipo de tejido. Con respecto a los ensayos tangenciales, se observa una mayor rigidez para las muestras orientadas en la dirección F que en las direcciones S y N. Esto es debido a que en los ensayos en la dirección F las fibras musculares soportan un esfuerzo tangencial más alto, mientras

que, en las otras configuraciones, la deformación es menor o nula. En las dos últimas imágenes, se muestran los resultados de los ensayos viscoelásticos. En todos ellos se puede observar una viscoelasticidad lineal, obteniendo una relajación muy similar para todos los niveles de extensión previa, tanto en régimen biaxial como en tangencial. En los resultados biaxiales, se puede observar una relajación relativamente isotrópica, obteniendo unos valores similares para los dos ejes, con tensiones un poco más altas para el eje transversal (CFD). Todos los resultados mostrados son coherentes con las tendencias observadas en la literatura y permiten obtener un modelo de material que caracterice correctamente la naturaleza ortótropa del tejido.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en todos los ensayos son coherentes con los estudios existentes. El procedimiento aquí expuesto brinda la suficiente información para realizar una caracterización tridimensional completa, y permite caracterizar el comportamiento ortótropo del tejido con cualquier modelo de material de los existentes en literatura.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la investigación de la Comunidad Económica Europea a través del Proyecto BRAV3, C1-BHC-07-2019, H2020 y al Ministerio de Economía a través del proyecto DPI2016-76630-C2-1-R.

Referencias

- [1]. HOLMES, Jeffrey W.; BORG, Thomas K.; COVELL, James W. Structure and mechanics of healing myocardial infarcts. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 2005, vol. 7, p. 223-253.
- [2]. HOLZAPFEL, Gerhard A.; OGDEN, Ray W. Constitutive modelling of passive myocardium: a structurally based framework for material characterization. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, vol. 367, no 1902, p. 3445-3475.
- [3]. DOKOS, Socrates, et al. Shear properties of passive ventricular myocardium. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 2002, vol. 283, no 6, p. H2650-H2659.
- [4]. YIN, Frank CP, et al. Quantification of the mechanical properties of noncontracting canine myocardium under simultaneous biaxial loading. *Journal of biomechanics*, 1987, vol. 20, no 6, p. 577-589.
- [5]. SOMMER, Gerhard, et al. Biomechanical properties and microstructure of human ventricular myocardium. *Acta biomaterialia*, 2015, vol. 24, p. 172-192