



Diseño de una máquina para pruebas biaxiales en tejido blando

Design of a biaxial soft tissue testing machine

 Jesús Ariel Gómez Martínez*

 Christopher René Torres San Miguel

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México,
México

* jgomezm1403@alumno.ipn.mx

05

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

J. A. Gómez Martínez y C. R. Torres San Miguel,
“Diseño de una máquina para pruebas biaxiales
en tejido blando,” *Perspectivas de la Ciencia y la
Tecnología*, vol. 8, no. 15, pp.73-81, 2025.



Resumen

En el estudio tiene lugar el diseño de una máquina de ensayos biaxiales para evaluar la respuesta mecánica de tejidos biológicos bajo tensión controlada en dos direcciones perpendiculares. Tales pruebas son angulares para determinar las constantes elásticas de los materiales y analizar sus características anisotrópicas y ortotrópicas. No obstante, los equipos comerciales suelen ser costosos, lo que limita su accesibilidad para laboratorios con presupuestos ajustados. El diseño utiliza componentes asequibles y disponibles, como servomotores bifásicos NEMA 23 y celdas de carga DYMH-103, montados sobre placas de acrílico perforadas. Respecto a la configuración de los motores, se permite la aplicación de fuerzas de manera perpendicular sobre la muestra, mientras que el sistema de sujeción a través de rastrillos distribuye las cargas para evitar daños

en los tejidos frágiles. Para ello, se integró una placa Arduino Mega 2560 con controladores TB6600 y amplificadores HX711 para manipular de manera independiente cada eje. El diseño se validó mediante simulaciones en SolidWorks Premium 2022, utilizando análisis de elementos finitos (FEA) para identificar zonas críticas de esfuerzo y optimizar la estructura. Los resultados arrojaron una distribución de las cargas sin superar los límites elásticos del material, garantizando la seguridad y funcionalidad del dispositivo durante su operación. En últimas, el presente diseño actúa como una alternativa compacta, económica y versátil para estudios biomecánicos, ya que permite la caracterización de tejidos biológicos con precisión y replicabilidad, sin comprometer la integridad estructural del sistema ni generar costos elevados de fabricación y mantenimiento.

Palabras clave: Arduino Mega 2560, elementos finitos, estado plano de esfuerzos, pruebas biaxiales, tejido biológico, SolidWorks.

Abstract

The design of a biaxial testing machine to evaluate the mechanical response of biological tissues under controlled tension in two perpendicular directions is presented. This type of testing is essential for determining the elastic constants of materials and for evaluating their anisotropic and orthotropic characteristics. However, the expense of commercial equipment often restricts its accessibility for laboratories whose financial resources are limited. The proposed design relies on both affordable and widely available components, including two-phase NEMA 23 servo motors and DYMH-103 load cells, attached on a perforated acrylic plate. The configuration of the servo motors enables the application of forces perpendicular to the specimen, while the rake

clamping system distributes loads more effectively, thereby preventing damage to fragile tissues. The Arduino Mega 2560 board was complemented with TB6600 controllers and HX711 amplifiers to independently manipulate each axis. The design was later validated with the use of simulations in SolidWorks Premium 2022, employing finite element analysis (FEA) to identify critical stress zones and optimize the structure. The findings indicated that the load distribution was sufficient without surpassing the elastic limits of the material, thereby ensuring the safety and functionality of the device during operation. In summary, this design offers a compact, economical and versatile alternative for biomechanical studies.

Keywords: Arduino Mega 2560, finite elements, plane state of stress, biaxial testing, biological tissue, SolidWorks.



Introducción

Un ensayo biaxial es una prueba para estipular las constantes elásticas de un material; al someterlo a fuerzas en dos direcciones perpendiculares y examinar sus respuestas en cuanto a linealidad y desviaciones, se adquiere información sobre los comportamientos anisotrópicos y ortotrópicos [1]. El equipo para realizar estas pruebas debe ser capaz de sujetar el material de prueba de manera distribuida y aplicar fuerzas controladas en múltiples direcciones, logrando un estado plano y uniforme de esfuerzos en el centro de la muestra [2]. Se denomina *estado plano de esfuerzos* a la condición en que las componentes del esfuerzo sobre los planos normales al eje z , zx y zy , son nulas, están siempre contenidas en el plano xy ; es decir, es un estado completamente definido por las componentes x , y , xy [3].

En el mercado hay equipos que ofrecen entornos controlados y software especializado de adquisición de datos para realizar pruebas biaxiales; dichas pruebas son necesarias en una variedad de aplicaciones, como la caracterización de materiales compuestos, polímeros, metales y tejidos biológicos. Sin embargo, la principal desventaja de estos equipos es su elevado precio (además del costo del software especializado, mantenimiento y accesorios como sensores o sistemas de sujeción adicionales), lo que limita accesibilidad para laboratorios o centros de investigación con presupuestos restringidos.

Jiang *et al.* [4] desarrollaron una máquina automatizada capaz de realizar ensayos uniaxiales, biaxiales y de cizallamiento, y generaron su respectivo protocolo de prueba. Desde su perspectiva, Corti *et al.* [5] proponen el diseño de un sistema biaxial de pruebas de materiales (BiMaTS, por su acrónimo en inglés) apto para un extenso rango de dimensiones de muestra; dado que el BiMaTS emplea componentes comerciales estandarizados, su fabricación y mantenimiento son asequibles y prácticos. En esa misma línea de desarrollo, la presente investigación tiene como objetivo el diseño de un dispositivo de ensayos biaxiales compacto, económico y versátil para realizar pruebas a tensión en tejido biológico.

Materiales y métodos

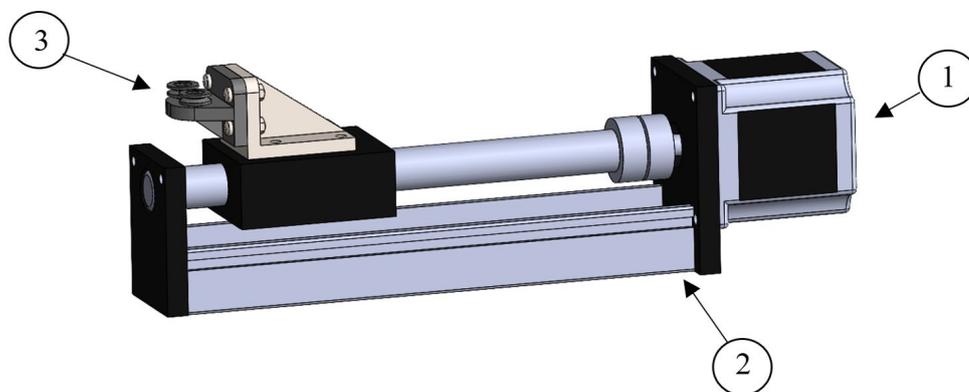
El dispositivo biaxial propuesto se basa en el sistema utilizado para muestras planas en forma de cruceta y muestras cuadradas sujetadas a través de un BioRake [6]. El archivo CAD coherente se construyó en el software SolidWorks Premium 2022 [7] porque sus herramientas de simulación dinámica y estática facilitan la validación del diseño previa a la fabricación para asegurar que el equipo soporte las fuerzas biaxiales previstas sin comprometer su integridad o funcionamiento. El



proceso de diseño comienza con el modelado de cada componente individual, replicando las piezas existentes en el mercado y añadiendo las que deben fabricarse en función de su ensamblaje. En ese sentido, se empleó el complemento de análisis de elementos finitos (FEA) sobre el modelo CAD de SolidWorks para simular las cargas y esfuerzos que experimentarán las piezas del dispositivo, como los sistemas de sujeción de la muestra y los puntos de unión de los motores. Asimismo, identificaron las probables zonas de fallo a partir del análisis estructural para optimizar el diseño a fin de reducir las concentraciones de esfuerzo y reforzar las áreas más sensibles.

El sistema de transmisión de fuerza del dispositivo (Figura 1) consta de cuatro servomotores bifásicos NEMA 23, capaces de suministrar una fuerza de 294.3 N con una velocidad máxima de 50 mm/s; este modelo de motor permite realizar ensayos cíclicos acoplados a las necesidades del usuario. Cada uno se acopla a una cama de tuerca deslizante M4 con un recorrido de 150 mm a una resolución de 0.109 $\mu\text{m}/\text{paso}$. Sobre la cama se fija el sistema de sujeción para la muestra y una celda de carga DYMH-103, con un rango de capacidad de 0-490.5 N, una sensibilidad de 1.0-1.5 mV/V y una frecuencia de respuesta de 10 kHz. El eje de aluminio 6061-T6 que conecta al motor con la cama deslizante cuenta con un límite elástico de 275 MPa y un esfuerzo máximo de 310 MPa.

FIGURA 1.
Diseño del sistema de transmisión de fuerza:
1) motor NEMA 17.
2) cama deslizante.
3) sistema de sujeción.
Fuente: elaboración propia.



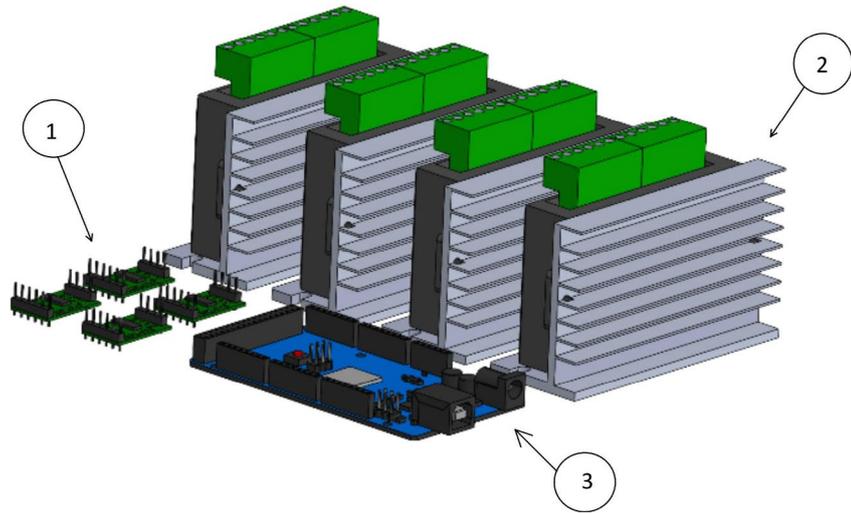
A su vez, el sistema de control para el dispositivo (Figura 2) se basa en una placa Arduino Mega 2560, controladores TB6600 y amplificadores de señal HX711 a 24 bits de doble canal conectados a cada motor con el propósito de manipular de forma independiente cada eje.


FIGURA 2.

Representación CAD del sistema de control:

- 1) amplificador HX711.
- 2) controlador TB6600.
- 3) Arduino Mega 2560.

Fuente: elaboración propia.



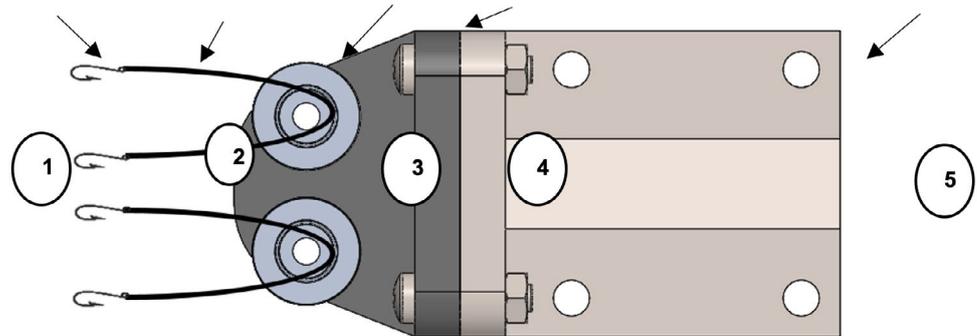
El diseño del sistema de sujeción para las muestras (Figura 3) se basó en las mordazas utilizadas en los equipos comerciales; no obstante, debido a la fragilidad del material para el que está destinado este dispositivo, se optó por una sujeción mediante rastrillos de tipo anzuelo fijados a cada lado de la muestra. Los ganchos están conectados por un hilo de acero inoxidable recubierto de nilón que pasa por una polea de aluminio M4. Las mordazas tradicionales pueden generar puntos de presión que dañan los tejidos delicados, mientras que los rastrillos distribuyen mejor las fuerzas aplicadas, minimizando el riesgo de roturas o deformaciones indeseadas. El diseño de la base permite que la pieza sea impresa en 3D para facilitar su instalación y remplazo.

FIGURA 3.

Vista de planta, diseño del soporte de los rastrillos:

- 1) anzuelo.
- 2) hilo de acero recubierto de nilón.
- 3) polea de aluminio M4.
- 4) soporte.
- 5) base del soporte.

Fuente: elaboración propia.



Los componentes se montan sobre dos placas de acrílico perforadas, colocando cada par de motores encontrados entre sí en un arreglo perpendicular horizontal dispuesto para ejercer fuerzas biaxiales (Figura 4); la distancia entre cada par puede variar para ampliar o disminuir el área destinada de operación según los requerimientos de la prueba. El desplazamiento y tiempo de ejecución de los motores están controlados por la unidad HX711 a través de la interfaz Arduino. En el transcurso del ensayo, el sistema de control de los motores de cada eje consigna el desplazamiento desde un punto inicial para calcular la deformación sufrida por la muestra. Los



datos reconocidos por las celdas de carga vinculados a la fuerza ejercida en cada eje posibilitan la generación de dos gráficas: carga-tiempo (asignada al eje x) y desplazamiento-tiempo (eje y). Para unificar estas gráficas se recurrió al método de interpolación de Lagrange, utilizado para aproximar una función desconocida a partir de un conjunto de puntos conocidos mediante el denominado *polinomio de Lagrange* [8].

FIGURA 4.
Vista explosionada del ensamblaje.
Fuente:
elaboración propia.

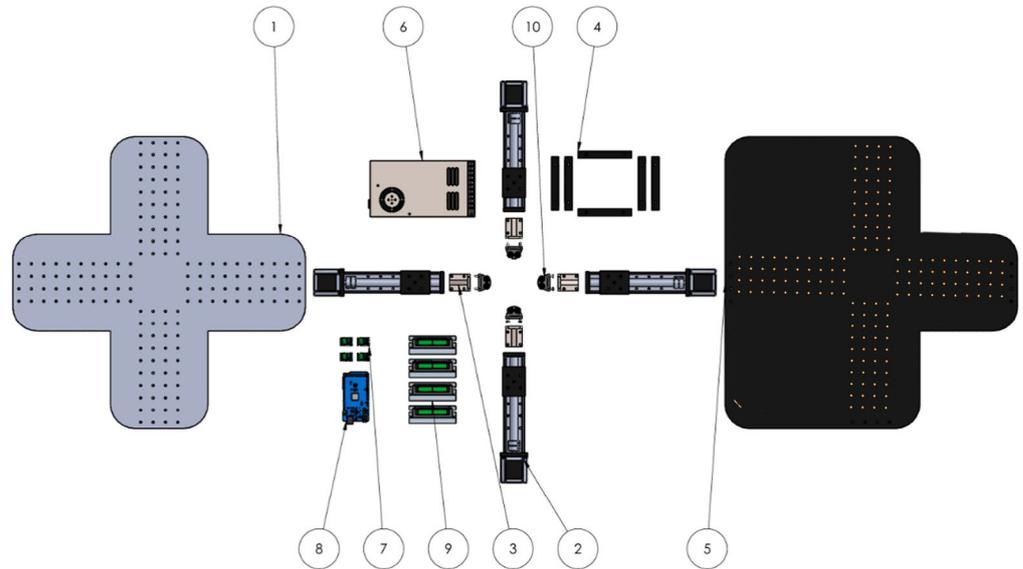


TABLA 1.

Resultados de la prueba de tensión realizada a las fibras poliméricas.

Fuente:
elaboración propia.

ID	PIEZA	CANTIDAD
A	Placa base A	1
B	Motor pasos NEMA	4
C	Soporte del sistema de sujeción	4
D	Separador para placa	6
E	Placa base B	1
F	Fuente de alimentación	1
G	HX711	4
H	Arduino Mega_STEP_AP203	1
I	TB6600	4
J	Sistema de sujeción	4



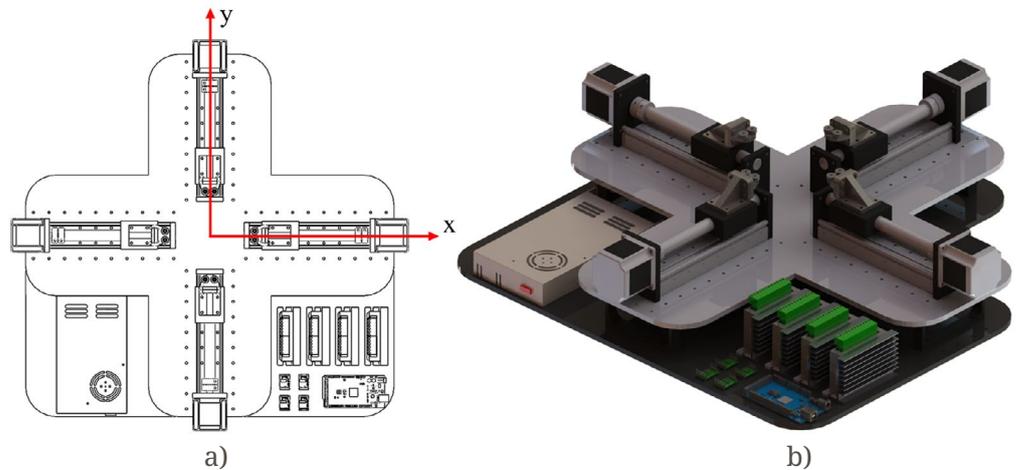
Diseño conceptual

El ensamblaje realizado en SolidWorks despliega la distribución de los componentes montados en las placas de acrílico. La Figura 5A ilustra una vista de planta de la distribución de los componentes, mientras que la Figura 5B muestra una representación renderizada del dispositivo completo. La distribución simétrica de los motores permite desplegar fuerzas en direcciones perpendiculares a la muestra de tejido. Las placas de acrílico perforadas hacen viable modificar la configuración de los componentes según los requerimientos de cada prueba, con un área mínima destinada a la muestra de 10×10 mm y una máxima de 120×120 mm.

FIGURA 5.

- a) Distribución de los componentes.
b) Representación renderizada.

Fuente: elaboración propia.



Condiciones de frontera

En el diseño de la máquina se han definido dos tipos principales de condiciones de frontera para replicar las cargas y restricciones a las que se someterá el dispositivo durante su operación. Las fijaciones aplicadas aseguran que las mordazas permanezcan estables y sujetas; a su vez, las fuerzas simulan el esfuerzo máximo que cada motor puede ejercer sobre el tejido. El análisis estático proporciona información sobre la deformación, esfuerzos mínimos y máximos en el ensamblaje para verificar que el diseño sea estructuralmente adecuado para soportar las cargas durante el proceso de las pruebas.

- Sujeción para la simulación estática realizada en SolidWorks: el sistema se ancla en los puntos céntricos de las poleas que sujetan los anzuelos (Figura 6A); en cada sistema de motor se restringe el movimiento a su propio eje horizontal. Se asume que las mordazas no experimentan ningún tipo de rotación.

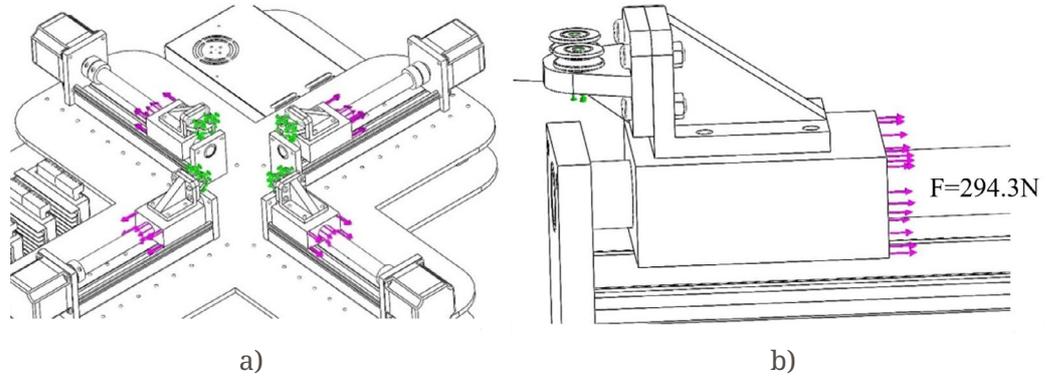


- Aplicación de fuerzas: se ejercen fuerzas de 294.3 N en cada eje (la máxima por motor). Como se observa en la Figura 6B, las fuerzas fueron aplicadas en la cama deslizante a lo largo del eje de movimiento del sistema de transmisión de fuerza.

FIGURA 6.

- a) Representación de condiciones de frontera.
b) Vista detallada del sistema de sujeción.

Fuente: elaboración propia.



Resultados

El análisis estático del ensamblaje muestra que los esfuerzos se distribuyen con exactitud en las piezas sometidas a la fuerza aplicada (Figuras 7 y 8). Como se observa en los campos de esfuerzos, se alcanza un valor máximo de 101.2 MPa en el eje de aluminio. Los esfuerzos sufridos durante el estudio estático están por debajo del límite elástico del material, lo que garantiza que el diseño es estructuralmente seguro para soportar las fuerzas aplicadas durante las pruebas.

FIGURA 7.

Estudio estático y deformación unitaria.

Fuente: elaboración propia.

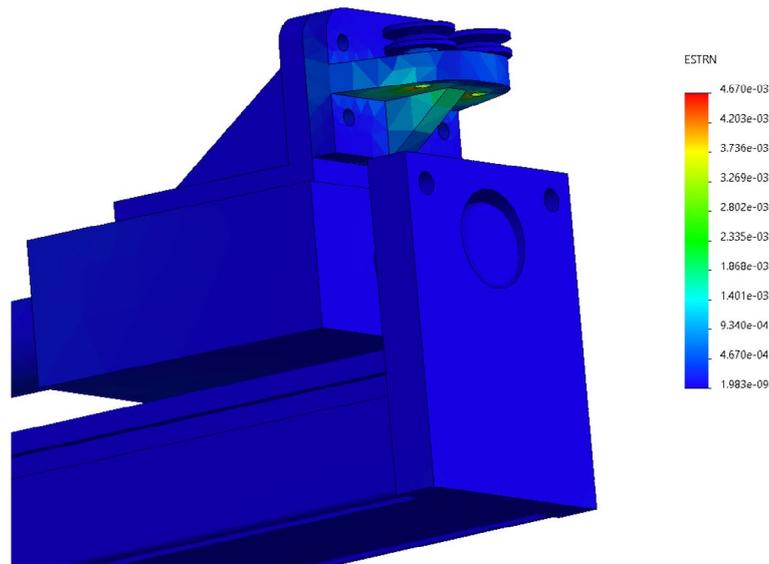
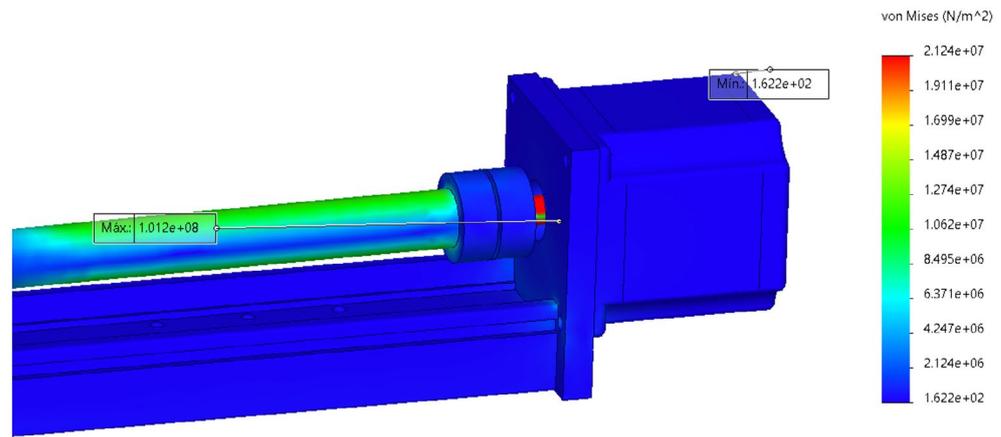



FIGURA 8.

 Estudio estático:
tensión nodal.

 Fuente:
elaboración propia.


Conclusiones

El diseño de la máquina de ensayos biaxiales exhibido en este artículo ofrece una opción accesible y eficiente para la caracterización de tejidos biológicos, ya que optimiza costos de fabricación, utiliza componentes asequibles de amplia disponibilidad y permite realizar pruebas con precisión y replicabilidad. Además, los resultados de la simulación estática indican que, a lo largo de su operación bajo condiciones de carga, no se observan zonas críticas de falla en la estructura. El esfuerzo máximo registrado en el estudio estático de la máquina se encuentra dentro de los límites aceptables, por lo que se garantiza el correcto funcionamiento del dispositivo sin comprometer su integridad estructural.

Referencias

- [1] D. Laurence, C. Ross, S. Jett, C. Johns, A. Echols, R. Baumwart, R. Towner, J. Liao, P. Bajona, Y. Wu y C.H. Lee, "An investigation of regional variations in the biaxial mechanical properties and stress relaxation behaviors of porcine atrioventricular heart valve leaflets", *Journal of Biomechanics*, vol. 83, pp. 16-27, 2019, doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.015
- [2] J. S. Welsh y D. F. Adams, "An experimental investigation of the biaxial strength of IM6/3501-6 carbon/epoxy cross-ply laminates using cruciform specimens", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, núm. 6, pp. 829-839, 2002. doi: 10.1016/S1359-835X(01)00142-7
- [3] M. Cervera y E. Blanco, *Resistencia de materiales*. España: CIMNE, 2015.
- [4] M. Jiang, R. L. Sridhar, A. B. Robbins, A. D. Freed y M. R. Moreno, "A versatile biaxial testing platform for soft tissues", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 114, art. 104144, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.104144
- [5] A. Corti, T. Shameen, S. Sharma, A. De Paolis, y L. Cardoso, "Biaxial testing system for characterization of mechanical and rupture properties of small samples", *HardwareX*, vol. 12, art. e00333, 2022, doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00333
- [6] CellScale Biomaterials Testing, "BioTester - Biaxial Test Machine. Fully equipped and optimized for biomaterials". Cellscale.com. <https://www.cellscale.com/products-cellscale%20biomaterials-testing/biotester/>
- [7] SolidWorks Corporation, "La solución CAD 3D para el diseño y desarrollo de productos". Solidworks.com <https://www.solidworks.com/es>
- [8] S. Iza, "Interpolación". RPubS.com. <https://rpubs.com/stanislaio53/1060172>



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

 perspectivasci@uaq.mx

REVISTA INCLUIDA EN:



VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

 **DESPACHO DE
PUBLICACIONES**

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
**FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO**
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA