

Desarrollo de una prensa para ensayos de tensión en polímeros¹

Development of a polymer tensile testing machine

Stephan Obando²
Cristian Sepúlveda³
Tito Piambac⁴
Richard Moran⁵

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7435>

RESUMEN

Se presenta el desarrollo de una prensa de tensión para polímeros. La máquina fue diseñada y construida por estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, en Colombia. Para diseñar la máquina se siguió la metodología clásica de diseño mecánico propuesta por Shigley. El diseño se centró en el uso de componentes locales y procesos de mecanizado comunes. Según las evaluaciones preliminares, el prototipo se desempeña satisfactoriamente de acuerdo con sus parámetros de diseño, es decir, una capacidad de carga de 18.261 N y una velocidad máxima de 510 mm/min. Este proyecto demuestra cómo componentes especializados se pueden desarrollar con tecnología asequible en el propósito de satisfacer las necesidades experimentales en los programas educativos de los países en vías de desarrollo.

Palabras clave: Ensayo de tensión; Diseño mecánico; Materiales; Plásticos; Prensa universal.

ABSTRACT

The development of a tension press for polymers is presented. The machine was designed and constructed by undergraduate students from Corporación Universitaria Autónoma de Nariño in Colombia. Classical methodology of mechanical design proposed by Shigley was followed to design the machine. Design was focused on using local components and common workshop processes. According to preliminary evaluations, the prototype performs satisfactorily according to its design parameters, e.g. a load capacity of 18.261 N and a maximum speed of 510 mm/min. This project demonstrates that specialized components can be developed with affordable technology in order to support the experimental needs in education programs from developing countries.

Keywords: Tension test; Mechanical design; Materials; Plastic; Universal press.



Como citar este artículo: S. Obado, C. Sepúlveda, T. Piambac y R. Moran, Desarrollo de una prensa para ensayos de tensión en polímeros, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. Proyecto Diseño y construcción de un equipo de ensayos de resistencia a la tensión de materiales (polímeros), en la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Grupos de Investigación Inmecnar y GRIM. Línea de investigación en diseño mecánico.
2. Ingeniero Mecánico, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño, Colombia. Correo: stephanobando@gmail.com
3. Ingeniero Mecánico, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño, Colombia.
3. Magíster en Industria 4.0, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño. Colombia Correo: tito.piamba@aunar.edu.co
4. Doctor en Ingeniería, Universidad Mariana, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecatrónica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño, Colombia. Correo: rmoran@umariana.edu.co

Fecha de recepción: 16 de abril de 2020 • Fecha de aceptación: 20 de julio de 2020

INGENIARE, Universidad Libre-Barranquilla, Año 16, No. 29, pp. 57-71 • ISSN: 1909-2458

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas permiten describir la respuesta de un material cuando se somete a diferentes condiciones de carga. Las propiedades más comunes, tales como la rigidez, la resistencia y la ductilidad se determinan con ensayos estandarizados de tensión [1].

Un ensayo de tensión consiste en la aplicación de carga unidireccional a una probeta elaborada con el material de interés, la cual tiene una geometría y unas dimensiones específicas con base en la norma apropiada y de acuerdo con el tipo de material y su aplicación [2,3]. La carga se debe aplicar progresivamente, mientras se registra su magnitud por algún método mecánico o electrónico (Figura 1). Asimismo, se necesita registrar el desplazamiento o la deformación de la probeta como resultado de la carga aplicada [3].

Para llevar a cabo estos ensayos se requieren equipos especiales, los cuales se conocen como “prensas universales” o “máquinas de tensión”. Estos aparatos están provistos de cuatro elementos básicos [4]. En primer lugar, un sistema mecánico de accionamiento que debe ser capaz de aplicar la fuerza y la velocidad necesaria que satisfaga las condiciones de la prueba. En segundo lugar, un sistema de adquisición de datos para registrar la carga, el desplazamiento o la deformación del espécimen de prueba [5]. En tercer lugar, una estructura de reacción capaz de soportar las fuerzas impuestas y que sea lo suficientemente rígida para no alterar las condiciones del ensayo [6]. Finalmente, un sistema de fijaciones o mordazas que permitan sujetar el espécimen de ensayo y evitar cualquier deslizamiento relativo mientras se ejecuta la prueba.

Todos estos sistemas se diseñan y calculan con alta precisión para garantizar las condiciones de exactitud y confiabilidad requerida en estas pruebas estandarizadas. Por ejemplo, las normas ASTM E8 [2] y D638 [7] brindan las condiciones mínimas que deben cumplir los equipos para ensayos de tensión de materiales metálicos y poliméricos, respectivamente. Estas máquinas son fabricadas por grandes compañías tales como Instron, MTS, Matest y Humboldt, entre otras.

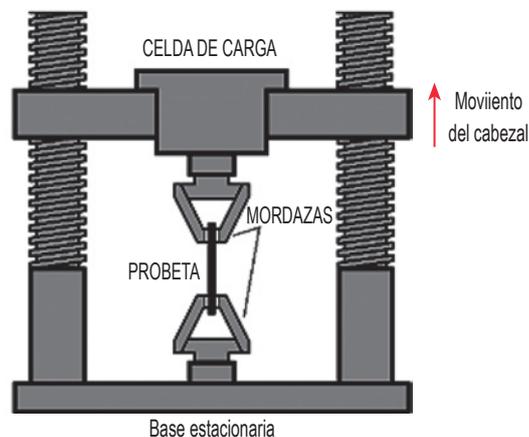


Figura 1. Configuración básica de una máquina de ensayos de tensión

Fuente: adaptado de Engineering Archives [8]

En países en vía de desarrollo como Colombia, el diseño y la construcción de esta clase de equipos es relativamente bajo; son pocas las investigaciones que presentan el diseño y la construcción de estos equipos [9-11]. Además, para adquirir uno de ellos los centros de investigación, laboratorios e instituciones educativas tienen que importarlos a un costo relativamente alto. Por ejemplo, una prensa para ensayos estáticos con una capacidad de entre 10 000 y 20 000 N tiene un valor comercial promedio de USD 43 042 [12]. Por otra parte, la puesta en operación, la capacitación para el manejo, el mantenimiento, la actualización y el suministro de repuestos queda condicionado al fabricante. Esto genera una alta dependencia tecnológica y en un tiempo relativamente corto de uso, pues estos equipos quedan obsoletos y es más fácil adquirir otro que actualizarlo. En consecuencia, parece necesario desarrollar un equipo de ensayos con tecnología disponible localmente y a un costo asequible.

En un esfuerzo por dotar de un equipo para ensayos de tensión al laboratorio de materiales de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, se propuso desarrollar un prototipo de máquina de tensión para ensayos en polímeros, la cual tiene como propósito usos didácticos y de apoyo en la investigación de los programas de ingeniería de la universidad.

2. MÉTODOS

Para resolver este problema se utilizó la metodología clásica del diseño mecánico presentada por Shigley [13], la cual se puede dividir en cinco fases:

1. Identificación de la necesidad y definición de problema.
2. Planteamiento de alternativas de solución y selección.
3. Diseño detallado.
4. Construcción.
5. Ejecución de pruebas de funcionamiento.

En la primera fase se identificó la necesidad del equipo y cuáles son los requerimientos funcionales para satisfacer las necesidades de los usuarios y cumplir la normatividad.

En la segunda fase se identificaron configuraciones típicas de máquinas de ensayos para polímeros (Figura 2) y se eligió la más apropiada de acuerdo con el presupuesto y el alcance del proyecto.



Figura 2. Dos configuraciones típicas de máquinas de ensayo: a) diseño a una sola columna, b) diseño de doble columna

Fuente: [14]

Con el uso de una matriz morfológica [15] se eligieron los elementos comerciales que componen el diseño, considerando como criterios de selección el menor costo y la disponibilidad en el mercado local.

En la tercera fase se realizaron los cálculos de los principales elementos de la máquina. Se utilizaron las fórmulas básicas de diseño de máquinas para calcular tornillos, engranajes y elementos del bastidor. Además, con base en consideraciones dinámicas se calculó la potencia del motor. Finalmente, se usaron las herramientas de simulación con elementos finitos proporcionados por el *software* Inventor Profesional 2019 (Autodesk Inc., San Rafael, Estados Unidos), con lo cual se verificó que el diseño cumple con las condiciones de resistencia y rigidez requeridas durante los ensayos.

En la fase de construcción se utilizaron procesos de maquinado convencionales como, por ejemplo, el torneado, el esmerilado, el fresado, el corte y la soldadura, los cuales permitieron ejecutar este proceso de una manera eficiente y económica. Adicionalmente, la participación de estudiantes de pregrado en esta actividad mejoró su comprensión y dominio de estos procesos de manufactura. Por último, se realizaron pruebas al prototipo para verificar su correcto funcionamiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Identificación de la necesidad y definición del problema

Con base en la norma ASTM D638 [7] se determinaron las dimensiones máximas que puede tener la probeta para ensayos en plásticos, la cual tiene un diámetro en su sección calibrada de 11,2 mm. Por otra parte, con esta misma norma se determinó la velocidad máxima de prueba durante un ensayo que es de 510 mm/min. La fuerza máxima de prueba se estimó considerando el área máxima de una probeta típica que es de 98,1 mm² (con base en la norma ASTM D638) y la resistencia de la poliamida PAI (uno de los termoplásticos más resistentes) [1], cuya resistencia a la tracción es de 186 MPa. Con base en estas consideraciones se determinaron las especificaciones de la máquina de ensayo, las cuales se resumen en la Tabla 1.

La rigidez presentada en la Tabla 1 se estimó considerando la longitud calibrada de 57 mm correspondientes a probetas tipo I, II y III descritas en la norma ASTM D638, con un área transversal de 98,1 mm² y un módulo de rigidez de 5000 MPa, valor representativo de un plástico rígido como la poliamida [16]. Esta rigidez es la máxima esperada en una probeta plástica de las características descritas y, por tanto, la mínima que debe tener la máquina de ensayos para no presentar una distorsión excesiva de sus elementos durante un ensayo.

Tabla 1. Especificaciones de la máquina de ensayo

Fuerza máxima (N)	Velocidad máxima (mm/min)	Rigidez mínima (N/mm)
18 261	510	8605

Fuente: elaboración propia.

3.2 Planteamiento de alternativas de solución y selección

La matriz morfológica presentada en la Figura 3 permitió considerar varias configuraciones de componentes y sistemas para la prensa. Se eligieron componentes fáciles de adquirir localmente y que cumplieran las demandas mecánicas, electrónicas y de programación para el desarrollo del prototipo.

En la configuración escogida la probeta es tensionada por un mecanismo de dos tornillos de potencia que mueven un travesaño, al cual se une una celda de carga que contiene una mordaza, mientras la otra mordaza se fija a una placa que hace parte del bastidor del equipo (Figura 4).

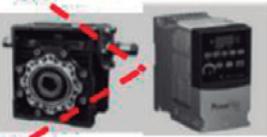
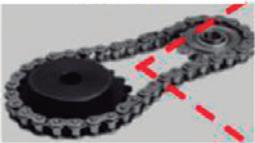
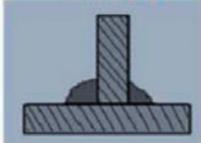
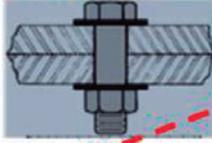
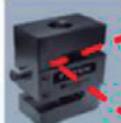
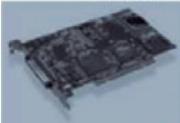
Componente / Sistema	Opción A	Opción B	Opción C
Accionamiento	Neumático 	Mecánico 	Hidráulico 
Control de velocidad	Reductor 	Variador de velocidad 	Mixto 
Transmisión de movimiento	Bandas 	Cadenas 	Ejes 
Uniones estructurales	Soldadas 	Atornilladas 	Mixta 
Registro de carga	Celda de carga 	Dinamómetro 	Sensor de presión 
Adquisición de datos	Tarjeta de adquisición de datos 	Artheta Arduino 	PLC 
Software	Personalizado	Comercial	Libre

Figura 3. Matriz morfológica que muestra las diversas alternativas en los componentes y sistemas que integran la prensa (la línea punteada de color rojo muestra los componentes elegidos)

Fuente: [12]

Con base en un análisis de configuraciones de máquinas existentes (Figura 2), se eligió la configuración de doble columna que ofrece alta rigidez, capacidad de carga y un amplio espacio de trabajo que permita ensayos de compresión o flexión con el uso de accesorios que pueden desarrollarse en el futuro (Figura 4). El mecanismo de tornillos tiene una alta ventaja mecánica, por lo que el sistema de accionamiento resulta compact

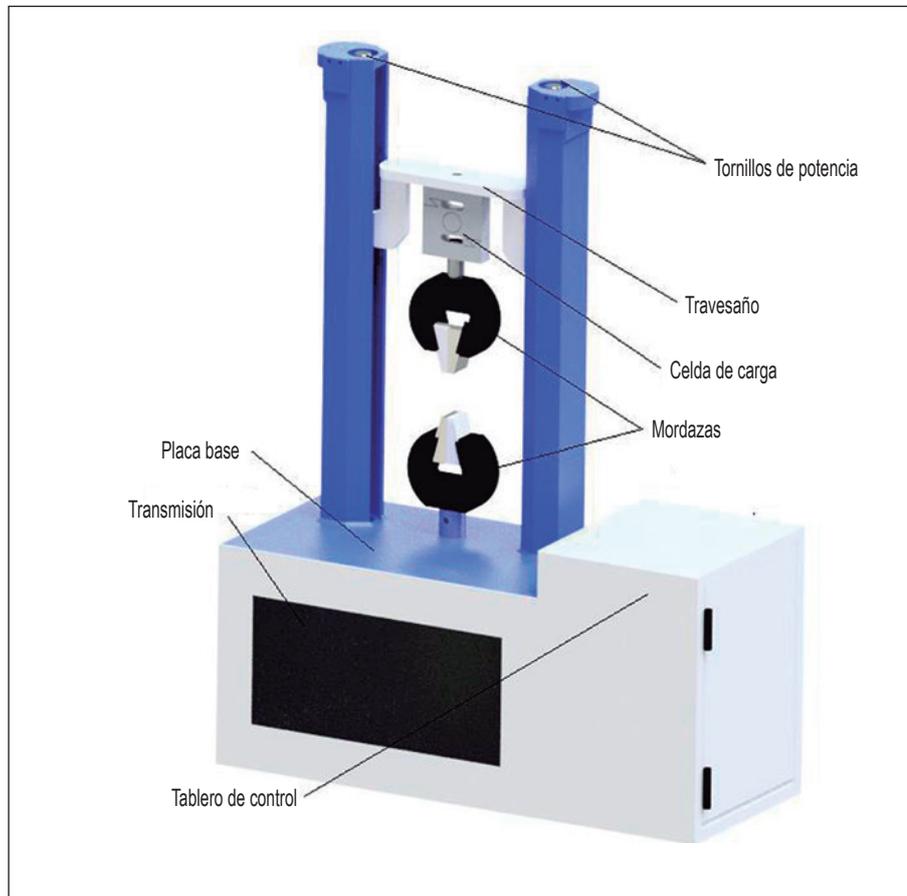


Figura 4. Configuración de la máquina de ensayo

Fuente: elaboración propia.

3.3. Diseño detallado

La configuración del mecanismo de transmisión se muestra en la Figura 5. Se eligieron tornillos de potencia, como, por ejemplo, el sistema para convertir el movimiento rotatorio del motor en movimiento de lineal transmitido a la probeta. Se eligieron tornillos de rosca ACME de 1" 3/8" de diámetro nominal, cuatro hilos por pulgada y una sola entrada, los cuales son fácilmente maquinados y adquiridos por metros en el mercado local. A estos tornillos se le realizaron los cálculos de torque de elevación, eficiencia

y carga crítica de pandeo, descritos en detalle por Shigley [13] y cuyo resumen se presenta en la Tabla 2. La carga crítica de pandeo fue 1727 % mayor que la fuerza máxima esperada en cada tornillo, la cual sería la mitad de presentada en la Tabla 2, por lo cual los tornillos tienen la rigidez suficiente para la aplicación elegida.

Tabla 2. Resumen cálculos tornillos de potencia

Torque (N.m)	Carga crítica de pandeo (N)	Eficiencia
50,5	157 746	0,27

Fuente: elaboración propia.

La rosca cuadrada es más eficiente que la ACME, sin embargo, esta última es más fácil de maquinar y, por esta razón, se eligió en el diseño.

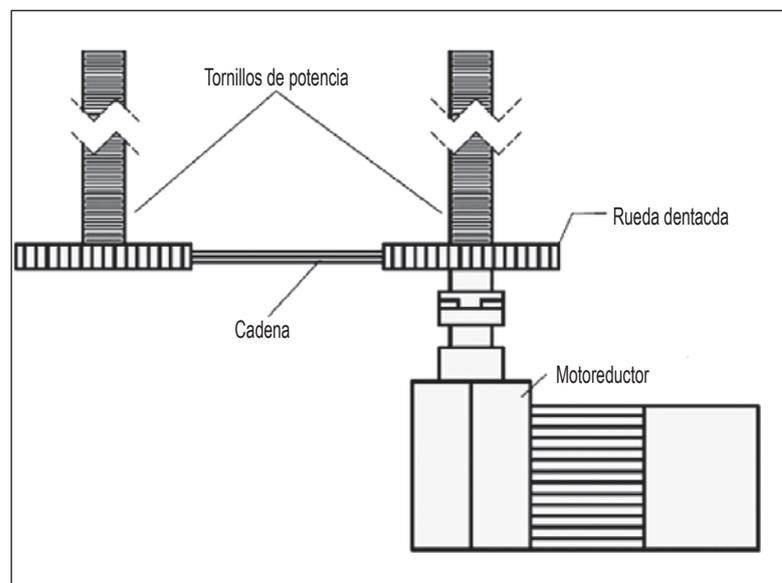


Figura 5. Mecanismo transmisión de potencia.

Fuente: elaboración propia.

La potencia mecánica teórica se calculó como el producto de la fuerza y la velocidad máxima esperadas durante los ensayos (véase la Tabla 1) y resultó ser de 155,2 W. Esta potencia se amplificó por un factor de 1,3, considerando una posible sobrecarga del 30 % de la fuerza máxima especificada. Con esta potencia nominal y con la eficiencia de los tornillos (véase la Tabla 2) se determinó que la

potencia real del motor necesaria para mover el sistema a plena carga es de 733W. Por tanto, se eligió un motor Siemens referencia 1LE0142 de una potencia nominal de 746 W (1 Hp) girando a 1720 rpm. El motor está acoplado a un reductor (referencia HU50615) de la misma potencia y una relación de 20:1, lo cual garantiza una velocidad nominal del travesaño de 546 mm/min, calculada como la velocidad de rotación en la salida del reductor (86 rpm) multiplicada por el avance del tornillo (6.35 mm). Esta velocidad es mayor que la velocidad máxima requerida en ensayos de plásticos, por lo cual se usó un variador de velocidad marca Allen Bradley (modelo A4P5N104), de la misma potencia del motor y reductor, que permite configurar la velocidad requerida durante las pruebas. Para el movimiento de los tornillos se eligió una transmisión comercial por cadena con dos ruedas dentadas ANSI N.º 35 de paso 3/8".

Con el análisis mecánico de elementos finitos a los principales componentes de la máquina tales como el tornillo, la placa base, el cabezal y las mordazas se determinaron los esfuerzos y desplazamientos máximos (véanse las figura 6 y 7), cuyo resumen se presenta en la Tabla 3. Los factores de seguridad se calcularon con base en la resistencia última del acero A-36 que es de 400 MPa [17]. Los tamaños de malla usados en los análisis con los modelos se definieron con base en un análisis de convergencia automático usado por el programa con diferencias en desplazamientos inferiores al 5 % entre mallas sucesivas.

Tabla 3. Resumen del análisis con elementos finitos basados en una fuerza máxima 18261 N

Componente	Esfuerzo Von Mises máximo (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	Factor de seguridad
Tornillo	184	1,0	2,2
Travesaño	50	0,2	8
Placa base	176	0,3	2,3
Mordaza	268	0,3	1,5

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con estos análisis se estimó la rigidez de cada elemento. La rigidez global entre mordazas se calculó como la rigidez equivalente de resortes en serie y paralelo, y fue de 14181 N/mm; este valor es 64 % mayor que la rigidez mínima determinada en las especificaciones (Tabla 1).

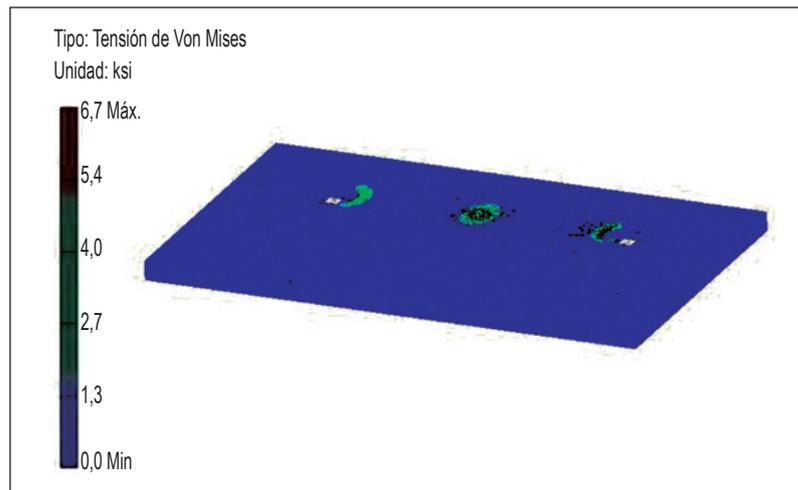


Figura 6. Esfuerzos de Von Mises en la placa base bajo una carga de 4448 N actuando en el agujero central

Fuente: elaboración propia.

3.4. Construcción

La construcción se realizó en el taller de máquinas y herramientas de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño y fue realizada por los dos primeros autores, con la asistencia de un técnico. En este proceso se maquinaron componentes simples como placas y perfiles, las cuales luego se juntaron con procesos de soldadura (Figura 8).

Para el registro de datos se usaron componentes comerciales tales como una tarjeta Arduino Uno y una celda de Carga tipo S de 50000 N (Figura 9). Estos componentes fueron configurados y programados para brindar una alta flexibilidad y exactitud al proceso de control y registro. El sistema de adquisición de datos se diseñó con una interfaz electrónica a fin de conectarse con un computador en el que es posible adquirir y registrar los datos de los ensayos. Se utilizó la herramienta de código abierto NetBeans de Java para desarrollar esta interfaz.

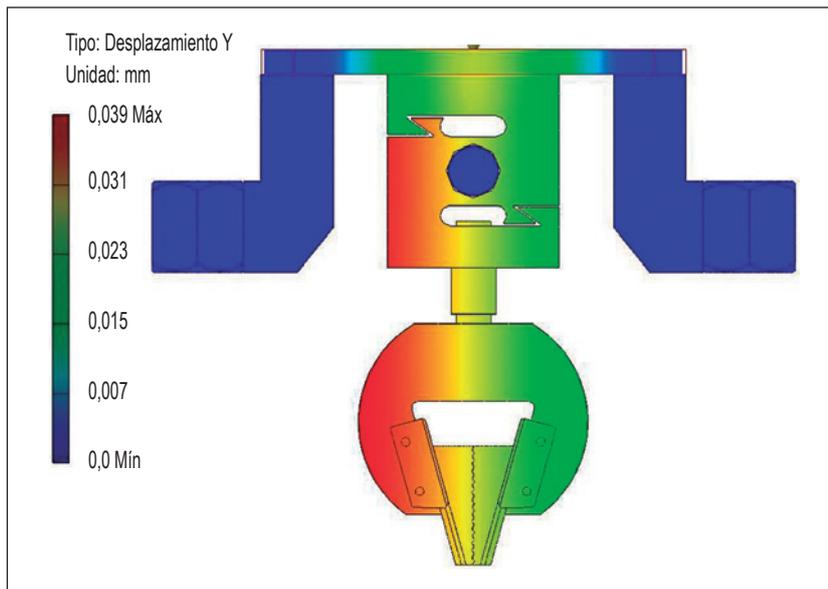


Figura 7. Contornos de desplazamiento de la mordaza bajo una carga axial de 4448 N

Fuente: elaboración propia.



Figura 8. Construcción del prototipo

Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Elementos de mando, control y registro electrónico de carga

Fuente: elaboración propia.

El prototipo terminado se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Prototipo terminado

Fuente: elaboración propia.

3.5. Pruebas de funcionamiento

Para verificar el funcionamiento del prototipo se llevaron a cabo dos ensayos con probetas plásticas. Los resultados de un ensayo en una probeta de nylon se muestran en la Figura 11. La probeta tuvo una longitud y área inicial de 68,5 mm y 145,7 mm² en la zona calibrada, respectivamente. Los ensayos se llevaron a cabo con control de desplazamiento a una velocidad de 0,5 mm/s. Se determinó una resistencia última nominal de 117 MPa.

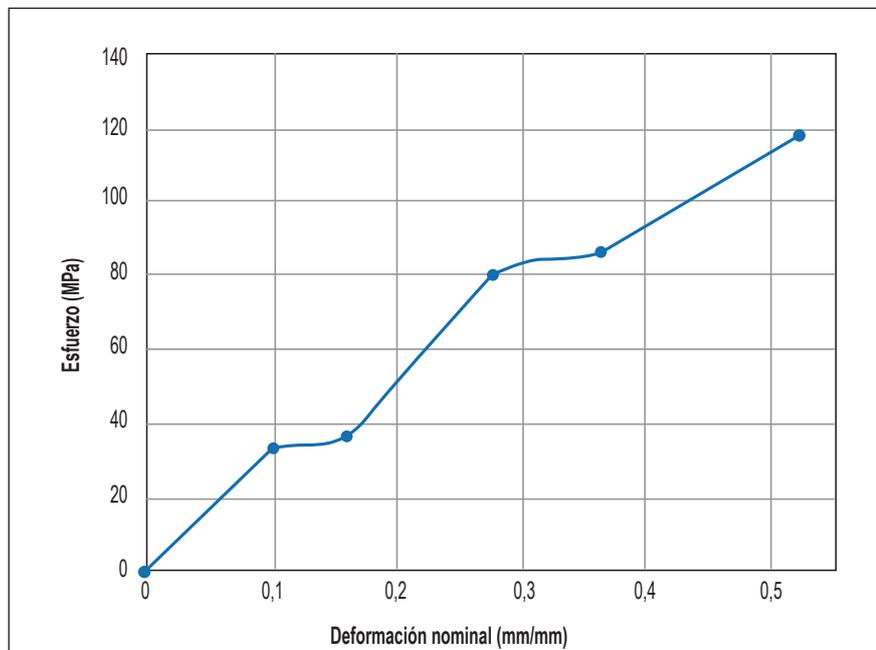


Figura 11. Curva de esfuerzo vs. deformación para la prueba con una probeta de nylon

Fuente: elaboración propia.

Dado que durante los ensayos no se dispuso de un registro electrónico de desplazamiento, se realizó este registro con un calibrador para cada nivel de carga. Por tanto, no se tuvo la suficiente resolución para medir la pendiente inicial de la curva, la cual representa el módulo de elasticidad [18]. La probeta fue llevada hasta la falla (Figura 12).



Figura 12. Ensayo de tensión sobre una probeta de nylon

Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo de máquina de tensión cumplió satisfactoriamente los requerimientos planteados en la fase de diseño. Sin embargo, se debe hacer un seguimiento de la duración del prototipo a largo plazo.

Se demuestra que con soluciones de bajo costo y usando tecnología local como la presentada en este trabajo se puede apoyar la dotación de laboratorios de universidades o centros de investigación.

Una limitación de este prototipo es que no se implementó un extensómetro que permitiera medir la deformación de la probeta y así calcular el módulo de rigidez del material. Sin embargo, con el sistema de adquisición de datos existente esta implementación resulta sencilla y será tema de futuros desarrollos.

REFERENCIAS

- [1] D. Askeland y P. Phule, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 4 ed. México: International Thomson Editores, 2004.
- [2] American Society For Testing And Materials, "ASTM E8: tension testing of metallic materials", West Conshohocken, 2016.
- [3] T. Beckwith, L. Buck y R. Maragoni, *Mechanical measurements*. Estados Unidos: Addison-Wesley, 1982.
- [4] R. Moran, "Desarrollo de una prensa de pruebas dinámicas para ensayos de biomecánica ortopédica", tesis de maestría, Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2009.
- [5] C. Carabali, *Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos de una máquina universal de ensayos del laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [6] American Standards for Testing and Materials, "F 1541-01 Specification and Test Methods for External Standards for Testing and Materials", "ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", ASTM, West Conshohocken, 2014.
- [8] E. Archives, "Engineering archives", 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html. [Último acceso: 12 07 2018].
- [9] A. Leyton, D. Ballén, R. Moran, F. Casanova y G. J. Pinedo, "Desarrollo de una prensa para pruebas estáticas y dinámicas de elementos ortopédicos y biológicos,", *Ing. Inv.*, vol. 28, n.º 3, pp. 132-137, 2008.
- [10] E. Huerta, J. Corona y A. Oliva, "Universal testing machine for mechanical properties of thin materials", *Rev. Mex. Fis.*, vol. 56, n.º 4, pp. 317-322, 2010.
- [11] D. Durango, E. Herrera y N. Otero, "Diseño, construcción y validación del prototipo de una máquina para ensayos de resistencia de materiales", *Ing. e Inn.*, vol. 3, n.º 2, pp. 16-27, 2015.
- [12] S. Obando y C. Sepúlveda, "Diseño y construcción de un equipo de ensayos de resistencia a la tensión de materiales (polímeros), en la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño 2017", tesis de pregrado, Ingeniería Mecánica. Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Pasto, Colombia, 2017.
- [13] R. Budynas y J. Nisbet, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill, 2012.
- [14] Instron, "Plastic testing solutions", Instron, Panezza, 2017.
- [15] M. Fagnoli, E. Rovida y R. Troisi, "The morphological matrix: tool for the development of innovative design solutions", *ICAD*, pp. 1-7, 2006.
- [16] Matweb, "Overview of materials for Polyamide-Imide, Molded". [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1ca9588da84640d199959da7c00a6083>. [consultado el 15 de enero de 2020].
- [17] Matweb, "ASTM A36 Steel, plate", A36 Steel, [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6>. [consultado el 15 de enero de 2020].
- [18] R. Avellaneda, S. Cabrera, P. Martínez, C. Donoso, "Apoyo tecnológico para la fidelización y captación de nuevos clientes por medio de una aplicación móvil", *Inv. Inn. Ing.*, vol. 5, n.º 1.