

Máquina de fatiga para materiales poliméricos flexibles

Fatigue machine for flexible polymeric materials

José Emilio Corona Hernandez¹, Adrián Antonio Ley Curi¹, Edgar Mauricio Romero Lopez¹, Jorge Roberto Oliva Uc², Andrés Iván Oliva Arias¹

¹Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida,
Departamento de Física Aplicada. AP. 73-Cordemex, 97310 Mérida Yucatán, México.

²División de Materiales Avanzados, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.,
Camino a la Presa 2055, 78216 San Luis Potosí, SLP, México.

Resumen

La medición de las propiedades físicas de los materiales inicia desde la concepción del diseño, la construcción y el uso de equipos o máquinas construidas para la medición de cierta propiedad deseada. En este trabajo se discute el diseño y la fabricación de una máquina para estudios de fatiga cíclica para materiales poliméricos flexibles. La máquina con dimensiones de 25×40×10 cm³, es fabricada principalmente de acero inoxidable 304 con algunos componentes de latón. El mecanismo que proporciona el movimiento cíclico es promovido por un motor reductor de 24 VCD con velocidad controlable entre 0.1 y 100 rpm mediante un circuito electrónico diseñado. El motor se acopla mediante una junta tipo Oldham, a un volante que hace la función de una manivela de radio variable (entre 0 y 20 mm) para convertir el movimiento rotacional a un movimiento longitudinal y así desplazar cíclicamente una mordaza móvil que sujeta la probeta a medir. La mordaza opuesta fija, sujeta el otro extremo de la probeta y permite su ajuste para diferentes longitudes de probeta en el rango de 20 a 90 mm. Se realizaron pruebas de funcionamiento de la máquina fabricada usando tres materiales poliméricos flexibles de uso común: acetato, nylon y caucho (liga).

Abstract

The measurement of the physical properties of the materials comprises the design, construction and use of the equipment for measuring certain desirable property. In this work, the design and fabrication of a machine for fatigue cyclic tests in flexible polymeric materials is discussed. The fabricated machine of 25x40x10 cm³ of volume is mainly made of 304 stainless steel with some components of brass. The cycling movement mechanism is moved by a 24 VDC geared motor with variable velocity from 0.1 to 100 rpm by means of a designed electronic circuit. The motor is coupled by an Oldham junction to a steering wheel that converts the rotational movement to a longitudinal movement for cycling moving the variable radius gag that holds the specimen to be analyzed. The opposite and fixed gag, holds the other side of the specimen and allows mounting different lengths of specimens in a range from 20 to 90 mm. Three samples of acetate, nylon, and garter were submitted to fatigue cyclic tests by using the fabricated machine.

Palabras clave:

máquina de fatiga, máquina cíclica, diseño de máquina, materiales poliméricos

Keywords:

fatigue machine, cycling machine, machine design, polymeric materials

Introducción

Cuando se diseña una máquina con un propósito determinado, se requiere de un conjunto de mecanismos capaces de realizar una serie de acciones específicas para medir una propiedad o para generar un producto determinado, tal como una máquina para preparar tortillas, para fabricar clavos, o para extrusión de polímeros, entre otros. En el área de investigación, además de contar con equipos y máquinas comerciales existentes, en ocasiones se requiere desarrollar algún tipo de máquina que ayude a determinar una propiedad específica de un material en estudio o que nos ayude a caracterizar determinados materiales bajo condiciones especiales de uso o dimensionales. Por ejemplo, “Beurrot-Borgarino *et al.* [1] utilizaron una máquina de fatiga de diseño propio para estudiar la fatiga de caucho natural en un equipo de sincrotrón. Con el dispositivo estudiaron el índice de cristalinidad, la razón de estrechamiento crítico, el tamaño del cristalito y la desorientación del material cuando es sometido a diferen-

tes condiciones de fatiga.

Otro tipo de pruebas de tipo cíclicas de largos periodos permiten medir, con una máquina universal de tensión, la degradación del módulo elástico debido al pre-deformado de probetas de polietileno (PE) por efectos viscoelásticos “Yi Zhan *et al.*[2]. Para ello se aplican pruebas ultrasónicas para medir la deformación y el tiempo de vuelo. Esta técnica es no-destructiva y permite cuantificar la evolución de los daños provocados por la deformación en las probetas.

Para evaluar muestras de aleaciones de aluminio, “Froustey *et al.* [3] diseñaron una máquina de impacto de fatiga de corta duración para realizar pruebas de tensión de impacto, mediante una volante y un péndulo que permiten controlar el tiempo de contacto y medirlo mediante multicámaras tipo CCD. El dispositivo mide el desplazamiento y proporciona

información cualitativa y cuantitativa sobre el mecanismo de estiramiento que conduce a la fractura de las aleaciones.

Las propiedades físicas de un material toman vital importancia en el diseño de cualquier componente ya que de éstas dependerá la seguridad del usuario, la durabilidad y confianza del equipo y su buen desempeño durante su vida útil. De acuerdo con las necesidades de caracterización de los materiales, en nuestro centro de trabajo nos dedicamos, en parte, al diseño y fabricación de algunos equipos o máquinas acorde a nuestras necesidades que sean de utilidad para la caracterización de materiales.

Los materiales expuestos a cargas cíclicas por debajo de la carga de ruptura y de la carga de fluencia, siempre estarán sujetas a fallar por fatiga.

En este trabajo se detalla el diseño y la fabricación de una máquina para realizar pruebas de fatiga en materiales poliméricos flexibles (de bajo módulo de elasticidad). La máquina propuesta es capaz de aplicar en forma controlada pruebas de carga cíclica con diferentes longitudes de probetas, diferentes elongaciones y velocidades del ciclo de carga aplicado. Entre los objetivos buscados en nuestros diseños podemos mencionar: primeramente, que cumpla con las especificaciones físicas de diseño (rigidez) y de fácil adquisición en el mercado local por lo anterior se eligió al acero inoxidable para construir la mayor parte de la máquina debido a que este tipo de acero además de cumplir con nuestros requerimientos ofrece otras características como limpieza y algo muy importante para nuestro clima húmedo: que es resistente a la corrosión. Otro de los objetivos buscados es contar con una máquina que satisfaga nuestras necesidades, a bajo costo y que se facilite el mantenimiento ya que tenemos el completo dominio en caso de presentar fallas con su correspondiente ahorro de tiempo.

Descripción de la máquina de fatiga

La máquina de fatiga propuesta está formada de elementos móviles soportados rígidamente en un chasis sólido y componentes fijos montados en una base. El mecanismo principal para realizar el movimiento cíclico se basa en una de las cuatro inversiones del mecanismo de cuatro barras. Utiliza un yugo escocés que permite aplicar ciclos silenciosos de movimientos lineales sobre la probeta, proporcionando movimientos armónicos cuando la velocidad del elemento de rotación se mantiene constante.

Descripción de las partes

A continuación, se describen los diferentes componentes que forman parte del dispositivo diseñado y construido.

a) El volante- manivela

Este componente, además de funcionar como volante de

inercia, funciona como manivela motriz del mecanismo de cuatro barras. Este volante cilíndrico de 57 mm de diámetro y 32 mm de espesor fue construido en su totalidad de acero inoxidable (Fig. 1). Su eje de conexión permite modificar el radio de excentricidad que se aplica como amplitud de estiramiento a la probeta.

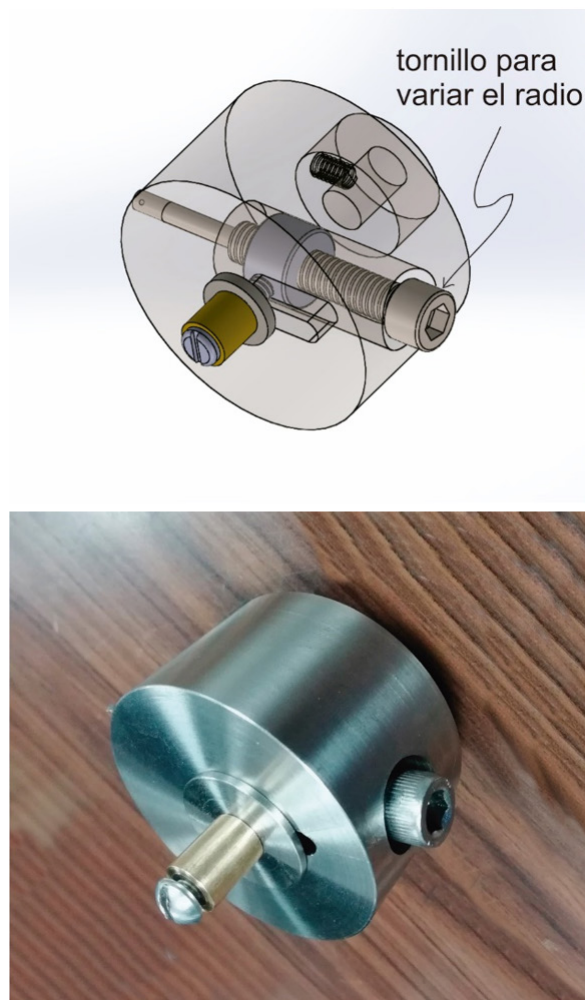


Figura 1. Volante-manivela de la máquina de fatiga cíclica: a) diseño en Solid Works, b) el componente construido.

El volante-manivela es diseñado para proporcionar un radio variable entre 0 y 15 mm permitiendo elongaciones a la muestra de hasta 30 mm. Para lograr esto, se colocó diametralmente un tornillo centrado de rosca estándar y se fijó tal que solo puede rotar sobre su propio eje. El tornillo es conectado interiormente a una tuerca cilíndrica tal que, al rotar el tornillo, dicha tuerca realiza un movimiento radial sobre una ranura diametral. Este movimiento radial se utiliza para ajustar el radio de giro que duplica la amplitud que será aplicada a la probeta durante el giro. La tuerca cilíndrica tiene en su parte externa un eje de latón deslizable utilizado como eslabón para transmitir el movimiento rotatorio. Un tornillo sobre el eje de latón deslizable permite liberar o fijar la posición de la tuerca una vez elegido el radio para efectuar el desplazamiento del eje. Por el lado opuesto al eje de latón, se conecta el eje del motor que permite su rotación controlada.

Este diseño compacto y confiable de volante-manivela es el componente clave del movimiento de la máquina de fatiga cíclica propuesta.

b) El yugo escocés

Este mecanismo, que va unido al eje de latón del volante-manivela, es el encargado de convertir el movimiento armónico rotatorio en un movimiento rectilíneo de vaivén. Una de las funciones de este mecanismo es que al rotar el volante-manivela con velocidad constante proporciona un movimiento armónico puro durante un ciclo de giro. Si comparamos este mecanismo con el de biela-manivela-corredera pueden observarse ciertas ventajas como: menor número de componentes móviles, funcionamiento más suave en los cambios de sentido y que la fuerza es aplicada en la probeta en el mismo sentido del movimiento.

La Figura 2 muestra el yugo escocés diseñado en Solid Works y el mismo mecanismo ya construido en acero inoxidable 304.

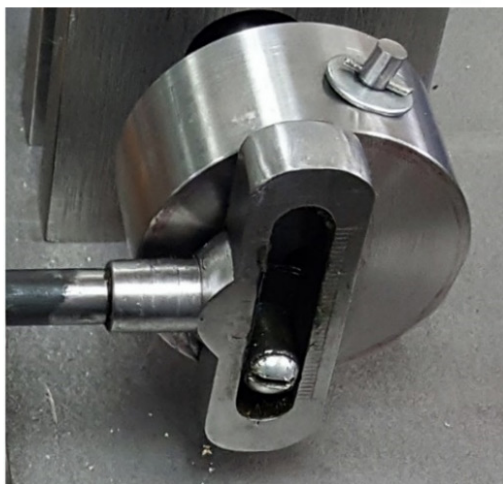
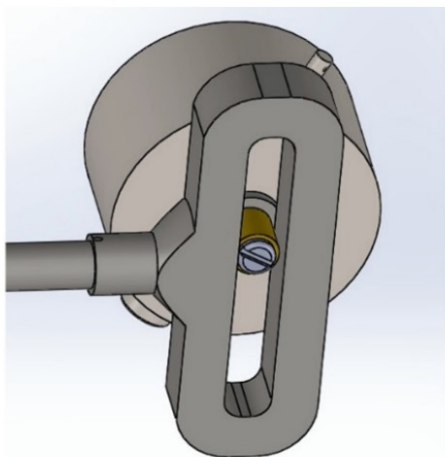


Figura. 2. Mecanismo de yugo escocés: diseñado (izquierda) y construido (derecha).

c) Mordazas

Para sujetar las probetas a ser analizadas es necesario contar con dos mordazas especiales que permitan sujetar probetas

muy delgadas. Estas fueron fabricadas de acero inoxidable 304 y son similares a las construidas y utilizadas en una máquina universal de diseño propio, “Eduardo et al. [4]. Una mordaza es fijada en el extremo del vástago móvil que conecta con el yugo escocés y es la que transmite el movimiento cíclico a la probeta a estudiar. La otra mordaza va fija a una barra roscada de 120 mm de longitud y 9.52 mm (3/8 pulg) de diámetro de acero inoxidable 304. La finalidad de esta barra roscada es permitir el montaje de probetas de diferentes longitudes en un rango de 30 mm a 100 mm. El diseño de estas mordazas permite sujetar especímenes de hasta 8 mm de ancho quienes se fijan con dos tuercas. La Figura 3 muestra el diseño de las mordazas, así como ya construidas y colocadas en la máquina de fatiga.

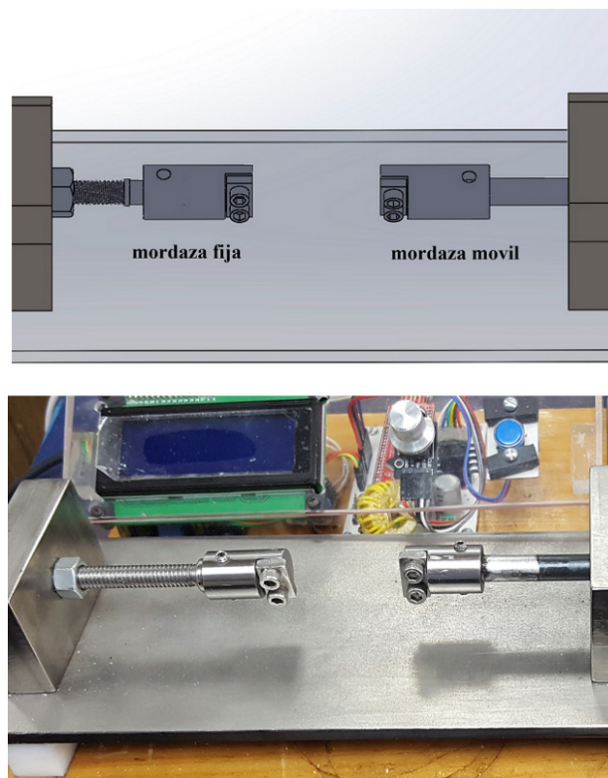


Figura 3. Mordazas de sujeción de las muestras a medir: diseñadas (izquierda) y construidas y montadas (derecha).

d) Sujeción del eje del motor

La potencia aplicada por el motor debe ser aprovechada al máximo. Esta potencia es transmitida por medio de un eje de 9 mm de diámetro y 90 mm de longitud fabricado de acero inoxidable 304 en cuyo extremo va acoplada la junta Oldham, “Hall et al.,[5] que sirve de eslabón entre el motor el sistema, esta junta es un tipo de acoplamiento flexible rígido a torsión que consiste en tres piezas compuesto de acero inoxidable montados en un disco central de PVC. Permite la transmisión de movimiento con velocidad angular constante entre ejes paralelos desalineados. Los cubos de acero se unen a cada uno de los ejes y el disco central de PVC se une a cada uno de ellos con un par cinemático de traslación, siendo la dirección de la traslación perpendicular respecto a

cada eje admitiendo desalineaciones radiales elevadas y desalineaciones angulares pequeñas, garantizando la transmisión de par con cero juego y permitiendo una alineación precisa y silenciosa entre ambos ejes al rotar. Este eje es soportado mediante dos chumaceras rectangulares de $70 \times 66 \times 15 \text{ mm}^3$ y 22 mm de separación que alojan rodamientos de carga radial tipo 629-2RSR-C3 que permiten la libre rotación del eje con fricción muy reducida. En el otro extremo del eje, se conecta el volante- manivela.

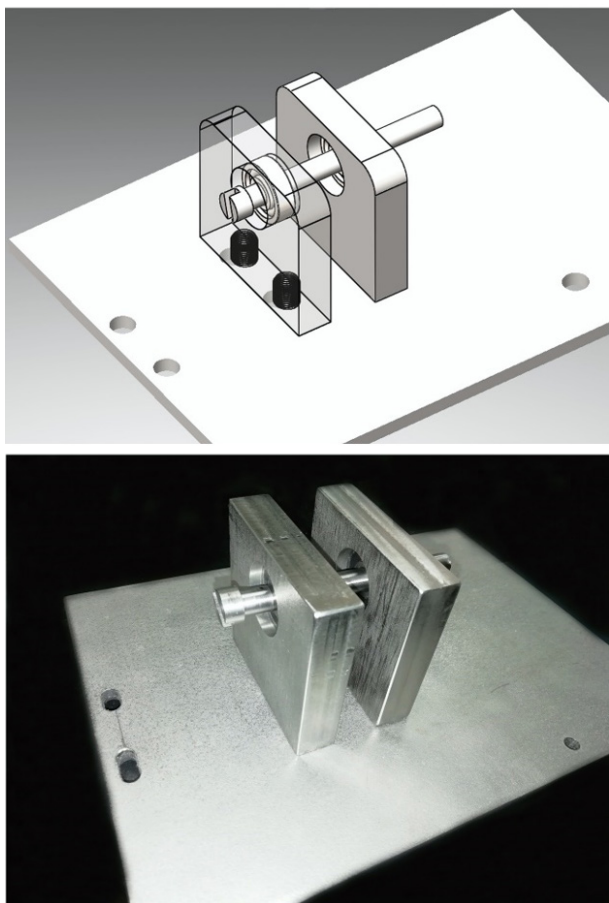


Figura 4. El eje de sujeción montado en las chumaceras con sus rodamientos: esquema diseñado(izquierda) y piezas construidas de acero (derecha).

e) Selección del motor

Una de las partes más importantes de este dispositivo es el motor que realizará el desplazamiento de la máquina cíclica. Para elegir correctamente el motor adecuado, se utilizó como referencia el mayor valor del módulo de Young “Richard & Keith, [6] de los posibles materiales a utilizar en las pruebas. Se eligió el nylon (PP, polipropileno) con un módulo elástico de 3500 MPa. Si las dimensiones típicas de la probeta son: 80 mm de largo, 5 mm de ancho y 0.07 mm de espesor con cambio de longitud de 4 mm, mediante las ecuaciones (1) y (2) es posible calcular el esfuerzo de cedencia (σ):

$$E = \sigma L / \Delta L \quad (1)$$

$$\sigma = F / A \quad (2)$$

De donde: σ es el esfuerzo de cedencia (en Pa), E es su módulo elástico (en Pa), L es la longitud de la muestra (en m), ΔL es la elongación que se aplicará (en m), F es la fuerza aplicada (N), A es el área de la sección transversal de la probeta (m^2). De este cálculo se obtuvo un valor de $\sigma=176 \text{ MPa}$ considerando un área transversal A (ancho \times espesor) de 0.35 mm^2 , nos arroja una fuerza necesaria de $F= 62 \text{ N}$ que combinados con el brazo de giro de 15 mm, nos arroja un valor del par requerido del motor de $T= 0.93 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Después de una búsqueda en el mercado, se seleccionó un modelo de motor A58SW-555B que funciona con 24 VDC y cuenta con caja reductora de 50:1 (Figura 5), velocidad de hasta 130 rpm, consumo de 1.5 A y un par de 1.47 N·m. Este valor de par, aunque superior al valor calculado, asegura que el motor seleccionado realizará el movimiento cíclico sin problema. Además, el motor posee un codificador (encoder) para regular la velocidad en lazo cerrado. La Figura 5 muestra el motor adquirido con su caja reductora y el eje de salida del par.

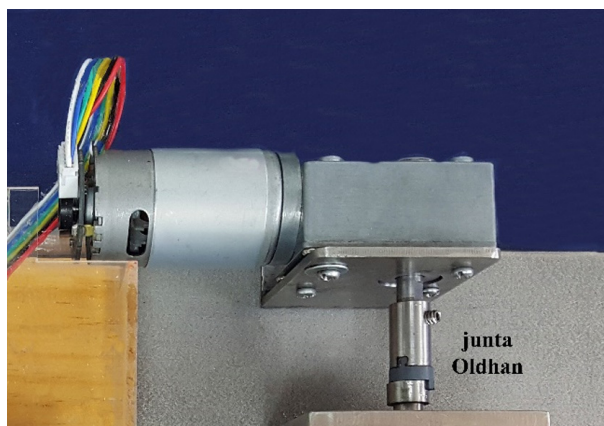


Figura 5. El motor seleccionado y el eje de salida con la junta tipo Oldham.

f) Control de velocidad del motor

Para el sistema de control de la velocidad del motor seleccionado para la máquina de fatiga, se utilizó un microcontrolador Cypress CY8C4245AXI-483 con un núcleo ARM M0 de 32 bits a 48 MHz, 4 Kb de RAM, 32 Kb de memoria de programa, 4 bloques TCPWM (timer counter and pulse width modulation), 2 bloques de comunicación y 4 bloques digitales universales. Los bloques TCPWM se utilizaron para medir la velocidad del motor, para la interfaz de usuario y para el conteo del tiempo de funcionamiento. Una pantalla LCD permite visualizar los parámetros del controlador PID, el tiempo de la prueba y la velocidad del motor y por ende del estiramiento elegido. Para ello, se utilizó una pantalla alfanumérica genérica de 4 líneas y 20 columnas. A fin de minimizar el número de conexiones utilizadas, se utilizó un expander de puertos I2C de NXP Semiconductors,

modelo PCF8574AT. Para la comunicación con la PC, debido a que el microcontrolador usado no cuenta con interfaz USB, se utilizó un puente USB a serial de marca Cypress CY7C65211.24LTXI con velocidad de transferencia de 1 Mb/s.

Para alimentar al motor se utilizó una fuente de alimentación conmutada modelo WX-DC2412 de 24 V y 4 A de salida y para alimentar al microcontrolador y la pantalla LCD, un regulador LM2596 a 5V. Para controlar el motor se utilizó un MOSFET IRF1407 y un diodo Schottky SB3150 como diodo contraelectromotriz para conmutar el motor mediante una señal de pulso modulado. Estos modelos se eligieron por ser comunes en el mercado local, aunque sus características están por encima de las necesidades del diseño.

Resultados

Diseñada y construida la máquina, se realizaron pruebas de fatiga usando una deformación cíclica con capacidad de efectuar elongaciones cíclicas con probetas poliméricas de bajo módulo de Young. La fuerza de estiramiento máxima es estimada en 70 N, con capacidad de aceptar longitudes de probetas entre 30 mm y 100 mm y hasta 8 mm de ancho. La velocidad controlada de estiramiento de la máquina está entre 0.2 y 2 ciclos/s. El tiempo total de la prueba puede ser programado con un microcontrolador de 5 V alimentado con una fuente de voltaje regulada y conectada a la línea (127 V). Los parámetros de la medición son visualizados a través de una pantalla LCD alfanumérica de 4 filas \times 20 caracteres. La Figura 6 muestra un diseño completo de la máquina con los diferentes componentes detallados. También se incluye una fotografía de la máquina terminada.

Para probar el funcionamiento de la máquina, se seleccionaron tres materiales poliméricos comerciales comunes: acetato (PET), nylon (PP) y una liga (caucho), con propiedades elásticas diferentes. Se cortaron las probetas con diferentes dimensiones, se montaron en la máquina construida y se realizaron diferentes pruebas de fatiga.

La Tabla 1 muestra las características geométricas de cada material analizado, así como su módulo elástico reportado “Koshkin & Shirkévich, [7].

Tabla 1. Muestras para ensayo de fatiga.

material	acetato	nylon	liga
espesor	0.3 mm	0.07 mm	2 mm
longitud	90 mm	80 mm	10 mm
ancho	5 mm	5 mm	2 mm
módulo elástico	2500 MPa	3500 MPa	7 MPa

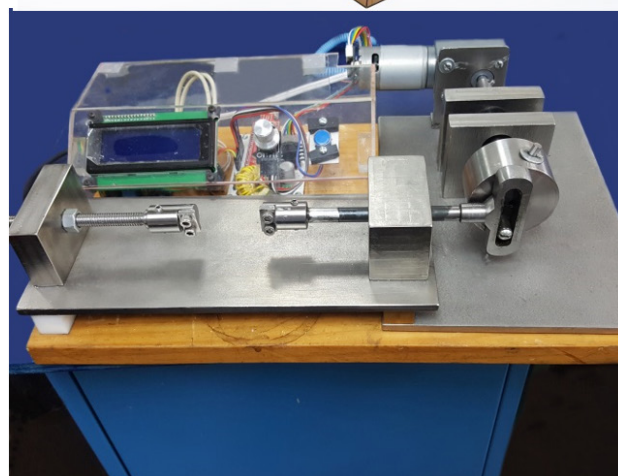
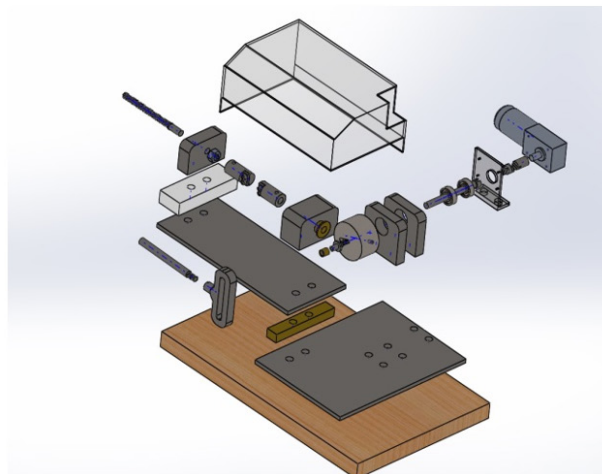


Figura 6. a) Esquema en explosión de los componentes de la máquina de fatiga y b) la máquina de fatiga completamente terminada.

Para determinar la deformación a aplicar a cada material, se obtuvo el esfuerzo de cedencia (σ) y el incremento de longitud (ΔL) para cada material usando las ecuaciones (1) y (2).

En la Tabla 2 se muestra los incrementos calculados de longitud para aplicar en cada material:

Tabla 2. Incrementos calculados de longitud

Material	acetato	nylon	liga (caucho)
esfuerzo cedencia (σ)	88.3 MPa	378.4 MPa	33.1 MPa
ΔL (calculada)	3.17 mm	8.6 mm	47.2 mm
elongación a aplicar	1.55 mm	4.0 mm	20 mm

Los tres polímeros seleccionados fueron deformados al 50% de su valor estimado de cedencia, con la intención de someterlos a pruebas de fatiga sin que alcancen deformaciones permanentes y así probar su comportamiento elástico.

Los tres materiales fueron sometidos a pruebas cíclicas durante 1 h usando diferentes velocidades (de 30 a 120 rpm). Concluidas las pruebas se observó que el acetato (PET) y el nylon (PP) sufrieron una deformación temporal y la recuperación de su longitud original 30 min después de concluida la prueba; mientras que la liga (caucho), debido a su mayor

capacidad elástica, no sufrió ninguna deformación al finalizar la prueba.

De las pruebas realizadas podemos afirmar que la máquina de fatiga cíclica construida cumple con las expectativas de diseño propuestas inicialmente. Actualmente se utiliza en trabajos rutinarios para realizar pruebas en diferentes materiales sometidos bajo diferentes condiciones de fatiga. Adicionalmente, se ha generado infraestructura, ya que el equipo forma parte ahora de las técnicas de caracterización mecánicas existentes en el laboratorio.

Referencias

- [1] Beurrot-Borgarino, S., Huneau, B., Verron, E., Rublon, P., Thiaudière, D., Mocuta, C., Zozulya, A. *In situ synchrotron x-ray diffraction study of strain induced crystallization of natural rubber during fatigue tests*. *Plastics, Rubber and Composites*, 41 (7) (2012) 290-295.
- [2] [2] Yi Zhang, Ben Jar P.-Y., Kim-Cuong T. Nguyen, Lawrence H. Le. *Characterization of ductile damage in polyethylene plate using ultrasonic testing*. *Polymer Testing*, 62 (2017) 51-60.
- [3] Froustey, C., Lambert, M., Charles, J.L., Lataillade, J.L. *Design of an impact loading machine based on a flywheel device: application to the fatigue resistance of the high rate pre-straining sensitivity of aluminum alloys*. *Experimental Mechanics*, 47 (2007) 709–721.
- [4] Eduardo Albert Huerta Argáez, José Emilio Corona Hernández, Andrés Iván Oliva Arias, Francis Avilés Cetina, “*Máquina universal para medir propiedades mecánicas de materiales en película delgada*”. Patente: MX 356742 B, (2018).
- [5] Hall, A.S., Holowenco, A.R., Laughlin, H.G. *Diseño de máquinas*. Teoría y 320 problemas resueltos, Editorial McGraw-Hill, Colombia, 1971.
- [6] Richard G Budynas y J Keith Nisbett, *Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley*, 9ª. Ed., Editorial Mc Graw Hill, México 2011.
- [7] Koshkin, N.I., Shirkévich M.G. *Manual de Física Elemental*. Editorial Mir, 1975.