

## DISEÑO DE UN DISPOSITIVO MECÁNICO PARA VISUALIZAR LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN ELEMENTOS TÍPICOS SOMETIDAS A CARGAS DE COMPRESIÓN.

J. Cortés-Pérez, J. J. Llanito P.

Centro Tecnológico Aragón, FES Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México.

Av. Rancho s/n, col. Impulsora, Cd. Nezahualcoyotl, Edo.de México.

Tel. 56 23 0970, Fax: 56 23 08 64

[jacop@correo.unam.mx](mailto:jacop@correo.unam.mx)

A. Reyes S., M., L. Marín E.

IME, FES Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México.

Av. Rancho s/n, col. Impulsora, Cd. Nezahualcoyotl, Edo.de México.

Tel. 56 23 09 88

[albres@servidor.unam.mx](mailto:albres@servidor.unam.mx)

J. Raigosa V., R. Cornejo T.

Sociedad de Fabricantes Nacionales de Tuberías de Polietileno y Polipropileno S. C.

Carretera a villa de García Km. 0.8, Santa Catarina, Nuevo León.

Tel: (81) 86 25 45 00

[juan.raigosa@adsmexicana.com](mailto:juan.raigosa@adsmexicana.com); [roberto.cornejo@adsmexicana.com](mailto:roberto.cornejo@adsmexicana.com)

### RESUMEN

Se presenta el diseño de un dispositivo mecánico portátil de operación manual capaz de simular fenómenos físicos típicos de la mecánica de sólidos. El dispositivo consiste en una prensa de carga, un juego de porta muestras y de modelos fabricados con un material birrefringente. La prensa de carga está dotada de escalas que permiten medir la magnitud de la carga aplicada y la deflexión del elemento así como un arreglo de placas polarizadas que permiten visualizar patrones isocromáticos en los modelos ensayados. Se presenta un prototipo del dispositivo diseñado operando para los casos de: a) compresión libre y confinada de un anillo circular, b) transmisión de carga a través de un medio granular, c) flexión en una viga y d) columna sometida a compresión.

### ABSTRACT

The design of a portable mechanical device (of manual operation) capable to simulate typical physical phenomena of solids mechanics is presented. The device consists of a load press, a set of carry-samples and models manufactured with a strain-sensitive coating. The load press has scales which allow to measure the load and the sample deflexion. Furthermore, the device has two polarized plates in an arrangement so it is possible to view the isochromatic patterns of the tested samples. A mechanical device's prototype (designing in the present work) was tested in the next load arrangements: a) free and constrain compression in circular rings, b) load transmit through granular media, c) flexion in a beam and d) compression in a column.

### NOMENCLATURA

F	Fuerza
L	Longitud
PMP	Probador Mecánico Portátil
$\Delta$	Deflexión

### INTRODUCCIÓN

En general, en la enseñanza de la ingeniería se asume que los equipos didácticos representan un gran apoyo para la adecuada comprensión de los fenómenos físicos que se estudian en diversas asignaturas. Lo anterior, debido a que el estudio de dichos fenómenos involucra cierto nivel de abstracción que a menudo causa confusión en los estudiantes. Como es bien sabido, la mayoría de los fenómenos que se estudian en ingeniería, en particular en ingeniería mecánica, son modelados matemáticamente a partir de representaciones abstractas de las condiciones reales y la aplicación de leyes físicas asumidas como válidas. Como se sabe, dichos modelos dan origen a ecuaciones matemáticas que al ser resueltas deben tener el poder de predecir el fenómeno en estudios bajo diversas condiciones. En éste sentido, el equipo didáctico permite visualizar y medir algunos de los parámetros del fenómeno en cuestión además de que permite comprobar predicciones teóricas de manera directa o indirecta.

Considerando lo anterior, se puede asegurar que un equipo didáctico debe cumplir con los siguientes puntos:

- Simular con la mayor precisión posible las condiciones asumidas por los modelos teóricos correspondientes.

- b) Permitir la visualización de los efectos asociados al fenómeno en estudio.
- c) Permitir la medición de los parámetros del fenómeno a fin de poder comprobar resultados provistos por los modelos teóricos.

Adicionalmente, un equipo didáctico debe permitir simular una amplia gama de fenómenos, ser de fácil operación y traslado así como económico.

A pesar de que se acepta la importancia del equipo didáctico como un valioso apoyo para la enseñanza, muchos laboratorios no cuentan con ellos debido a su alto costo lo cual se debe a que en su mayoría son de procedencia extranjera. Así mismo, muchos equipos didácticos son diseñados y construidos por los propios alumnos pero en general, carecen de la calidad necesaria para asegurar la precisión del experimento o bien no cuentan con los elementos de medición adecuados.

Es claro que en áreas de conocimiento como la mecánica de sólidos, contar con apoyos didácticos resulta de suma importancia debido, entre otras cosas, a que se manejan conceptos como los de campo de esfuerzos y deformaciones que en general resultan considerablemente difíciles de imaginar debido a su naturaleza matemática. Como se sabe, hoy en día existe una buena cantidad de dispositivos didácticos que emplean técnicas experimentales, tanto de campo como puntuales, que permiten medir las deformaciones en un elemento mecánico sometido a determinadas condiciones de carga y restricciones desplazamientos. No obstante, en general dichos equipos son costosos debido a que son importados de países como Estados Unidos, Inglaterra, Alemania, etc. [1, 2 y 3]. Lo anterior, trae como consecuencia que muchos laboratorios no cuentan equipos didácticos para como apoyo en la enseñanza de la mecánica de sólidos.

Es importante mencionar que los equipos didácticos no sólo son requeridos con fines de enseñanza, también empresas dedicadas a la fabricación de productos que durante el servicio se ven sometidos a condiciones mecánicas diversas. En estos casos, los equipos didácticos suelen ser muy útiles para valorar el comportamiento de producto bajo condiciones específicas que pueden diferir de aquellas para las que fue diseñado. Un caso de este tipo de productos son las tuberías plásticas enterradas las cuales pueden cambiar considerablemente su comportamiento al variar las condiciones de confinamiento.

En el presente trabajo se muestra el diseño conceptual de un dispositivo mecánico al que denominaremos Probador Mecánico Portátil<sup>1</sup> (PMP) capaz de simular diversos fenómenos de la mecánica de sólidos tales como: a) compresión de anillos circulares, b) transmisión de carga a través de un medio granular, c) flexión de una viga y d) pandeo de una columna. Dicho dispositivo está dotado de un sistema de aplicación de carga, un elemento para medir el desplazamiento en la dirección de la misma y dos placas polarizadas que permiten visualizar los patrones isocromáticos en elemento estudiado. El dispositivo es fabricado en materiales comunes por lo que resulta muy económico.

## **DESARROLLO**

### **Requerimientos de diseño**

Siguiendo la metodología típica del diseño, la primera etapa en el proceso fue la identificación plena de los requerimientos del dispositivo los cuales se describen a continuación.

Se buscó que el dispositivo fuera de pequeñas dimensiones y bajo peso (2 Kg máximo) para poder ser operado manualmente y transportado con facilidad. Así mismo, el dispositivo debería ser capaz de aplicar una carga estática variable a los siguientes elementos mecánicos:

- a) Un anillo circular sometido a carga de compresión en dos casos: compresión libre y bajo confinamiento lateral.
- b) Un arreglo que simule un medio granular a través del cual se transmiten cargas “vivas”.
- c) Una viga simplemente apoyada sometida a una carga de flexión
- d) Una columna en compresión

Adicionalmente, el dispositivo debe permitir medir la carga y la deflexión de los elementos de prueba así como visualizar el campo de deformaciones en las probetas durante las prueba.

---

<sup>1</sup> Patente en trámite

Un análisis de los puntos anteriores, permite distinguir dos aspectos fundamentales del dispositivo que son por un lado la visualización del campo de deformaciones en los elementos durante la prueba y por el otro la necesidad de contar con un marco que nos permita aplicar cargas de compresión.

### Diseño Conceptual

El primero de los aspectos mencionados anteriormente, se puede resolver con relativa facilidad, recurriendo de los principios físicos de la foto elasticidad, cuya teoría básica nos indica que es posible visualizar patrones isocromáticos en un elemento fabricados de un material birrefringente si este es colocados entre placas polarizadas de un cuarto de onda con ejes perpendiculares (simulando un polariscopio de transmisión) [4]. En la Figura 1, se muestra un patrón isocromático inducido en un anillo circular sometido a compresión. Como se sabe, en un patrón isocromático los puntos ubicados en una franja del mismo color corresponden con aquellos donde la diferencia de deformaciones principales es igual de donde es claro que un elemento mecánico donde las el campo de deformaciones no es constante, se presentarán una serie de franjas de diferentes colores. Como indica la teoría correspondiente, cada color representa un orden de franja diferente.

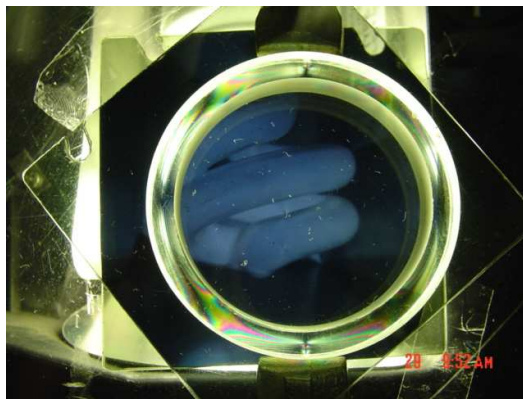


Fig. 1 Patrón isocromático en un anillo circular sometido a compresión apoyada en 2 puntos

Por otro lado, la conceptualización del marco de carga resulta un tanto más compleja debido a los requerimientos de diseño. De hecho, es claro que el marco de carga es la parte medular del dispositivo ya que las dimensiones de los elementos de prueba pueden ser pequeñas sin que esto afecte significativamente el comportamiento esperado durante las pruebas. Como se mencionó anteriormente, el dispositivo deber ser de dimensiones pequeñas, ligero y de operación manual por lo que el marco de carga debe cumplir con ellas además de que es claro, analizando los fenómenos que se pretende probar, que la carga de trabajo deberá ser de compresión.

Entre las opciones que existen para aplicar cargas de compresión de forma manual, la más conveniente para el dispositivo, cuyo diseño se presenta, fue la que denominamos: “Marco de Carga de Placas Deslizantes” (MCPD) cuyo bosquejo se muestra en la Figura 2. El marco de placas deslizantes consiste esencialmente en dos placas paralelas unidas por cuatro elementos elásticos que se deslizan a través de dos placas guías que son una extensión de un marco fijo.

La operación del marco de placas deslizante se muestra de manera esquemática en la Figura 3 (a) y (b). Al girar el maneral, el cual va fijamente unido a la placa deslizante inferior, ambas placas se deslizan, ya sea hacia abajo o hacia arriba, debido a que están unidas por los elementos elásticos. Es claro que la distancia  $L_0$  se mantendrá constante si los elementos elásticos son lo suficientemente rígidos y la fricción entre las placas y las guías es despreciable.

Cuando el desplazamiento es hacia abajo, en algún momento la placa superior toca el elemento superior del marco fijo y deja de desplazarse aún cuando se siga girando el maneral sin embargo, la placa inferior continúa desplazándose y los elementos elásticos comienzan a alongarse. Es claro que la carga resultante que la placa superior aplica sobre el elemento fijo del marco es igual de la elongación de los elementos elásticos ( $L_i - L_0$ ) multiplicada por la constante de resorte y por 4. Si se coloca un elemento de prueba entre la placa deslizante superior y el elemento superior del marco fijo, éste recibirá una carga de compresión que se buscaba. Para sujetar los elementos de prueba, en la parte superior de la placa superior del marco fijo se coloca un porta-muestra intercambiable que permite ensayar los diversos modelos descritos en la sección 2.1.

Finalmente para lograr visualizar los patrones iscromáticos deseados, se colocan en la placa deslizante superior dos placas polarizadas de cuarto de onda de tal manera que el elemento de prueba queda entre las dos placas polarizadas.

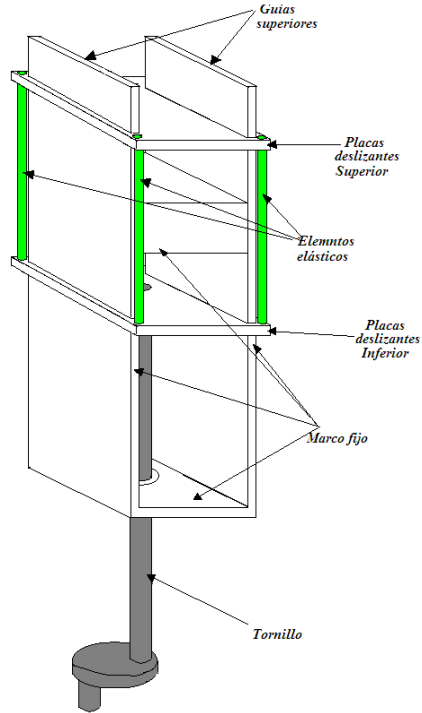


Fig. 2 Esquema general del “Marco de Carga de Placas Deslizantes”

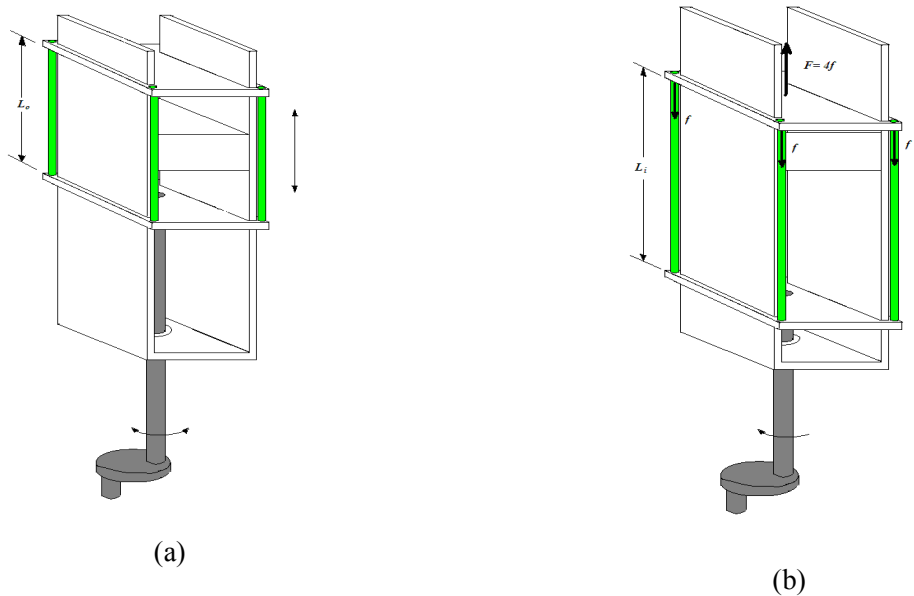


Fig. 3 a) Movilidad libre del MCPD, b) Posición de carga del MCPD

## RESULTADOS

### Diseño de detalle

Considerando los puntos discutidos en la sección anterior, se logró obtener una propuesta del dispositivo denominado: “Probador Mecánico Portátil” (PMP) el cual cumple con un 95% de los requerimientos del diseño. Una fotografía de un prototipo de PMP se muestra en la Figura 4 mientras que una serie de diagramas en los que se muestran sus partes componentes así como de sus dimensiones aproximadas se presenta en las Figura 5 y 6.



Fig. 4 Fotografías del prototipo del probador mecánico portátil desarrollado en el presente trabajo.

Como se puede apreciar en la Figura 6, las dimensiones del dispositivo obtenido son de aproximadamente 14x4x1.6 cm, pesa 1.7 Kg y tiene un costo de fabricación menor a \$ 2000.00. Así mismo el dispositivo permite visualizar los patrones isocromáticos en los cuatro casos descritos en la sección 2.1, medir la deflexión de los elementos de prueba y determinar, de manera indirecta, la carga aplicada sobre el elemento de prueba. A continuación, se presenta una descripción general del PMP.

El PMP, consiste esencialmente, en una prensa de carga de operación manual provista de un sistema para medir la magnitud de la carga aplicada y la deflexión del elemento de prueba así como dos placas polarizadoras, con ejes ortogonales, que permiten observar los patrones isocromáticos generados en los elementos de prueba por la carga aplicada. En la Figura 4 se muestra un diagrama general que muestra las partes componentes del PMP.

El marco fijo (1) del PMP, fabricado en acrílico, consiste de tres placas rectangulares, una de ellas con un tornillo pasado y las otras dos permiten el deslizamiento de otras dos placas móviles que constituyen la presa de carga deslizante (2) también fabricado en acrílico.

Las dos placas deslizantes de la presa de carga se unen entre sí por cuatro elementos elásticos fijos, fabricados de un material elastomérico, a los cuatro vértices de cada placa deslizante. La placa inferior, va unida al tornillo pasado del marco fijo y se desplazada por éste. El conjunto compuesto por el tornillo y las placas deslizante constituyen el sistema de aplicación de carga (3).

El llamado porta-elemento de prueba (4) es una placa fijamente unida al marco (1) sobre el se pueden colocar diversos apoyos donde se monta el elemento de prueba.

Las placas polarizadas de un cuarto de onda con ejes perpendiculares (5), van colocadas una frente al elemento de prueba y otra por detrás del mismo de tal manera que se logra un arreglo similar al de un polariscopio de transmisión [4].

El elemento de prueba (6) debe ser fabricado de un material birrefringente para visualizar el patrón isocromático aunque, es importante mencionar que el PMP permite realizar mediciones sobre elementos fabricados de un material común, preferentemente de un plástico ya que la capacidad de carga es limitada.

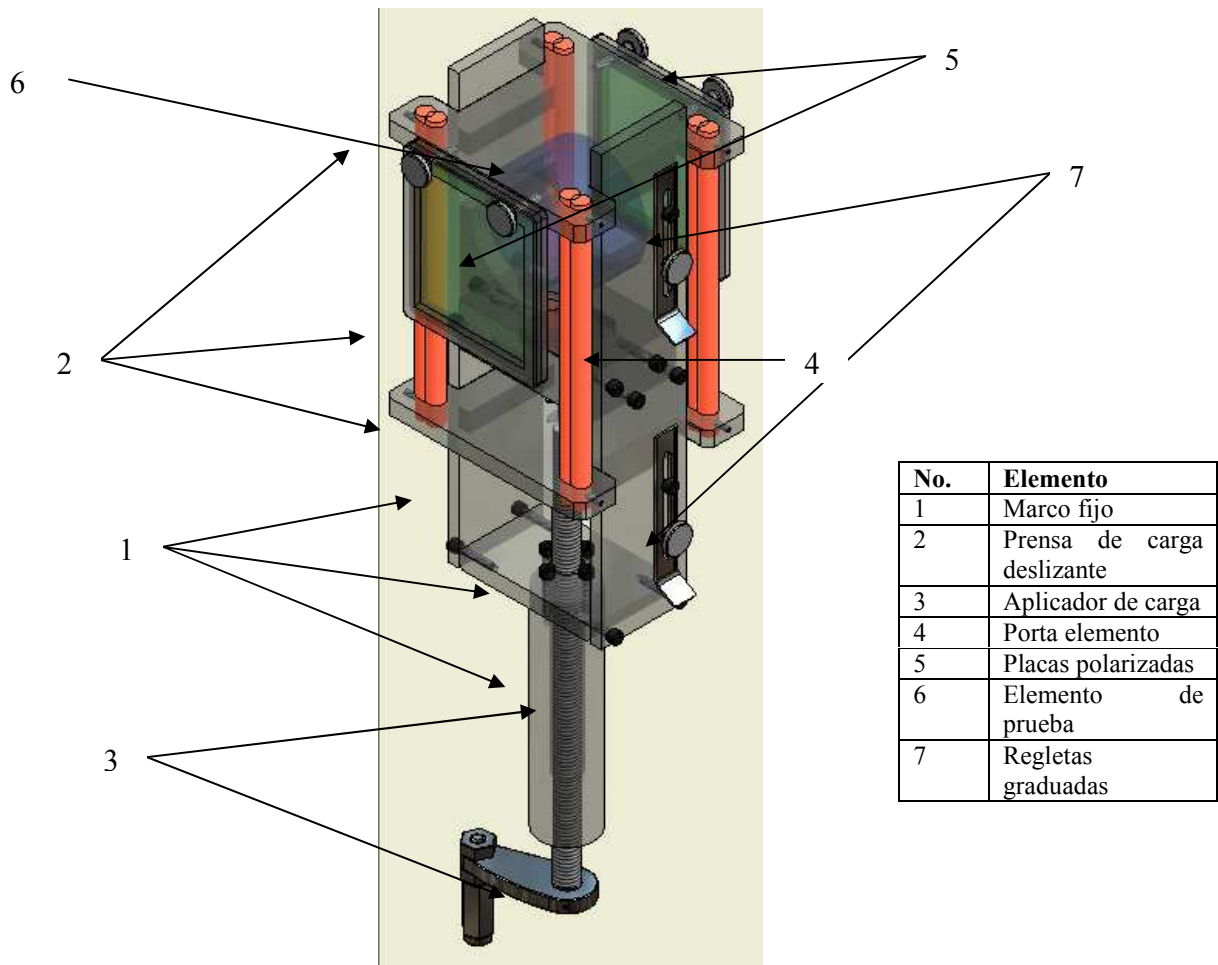


Fig. 5 Esquema general del Probador Mecánico Portátil (PMP)

Las regletas graduadas (7) permiten medir el desplazamiento que sufre las placas deslizantes superior e inferior de la prensa de carga (2) por lo que es posible determinar con ellas, tanto la deflexión del elemento de prueba como la carga aplicada sobre éste conociendo la constante de resorte de los elementos elásticos.

Es importante mencionar que el 5% de las especificaciones que no cumple el PMP se debe a que el dispositivo presenta ciertas limitaciones en cuanto a la medición de la carga aplicada y el desplazamiento asociado. Lo anterior, se debe a que los elementos que aplica la carga son de material elastomérico, cuyo comportamiento es no lineal, y a que la mínima medición que se puede realizar con las escalas es un milímetro. Por otro lado, el PMP sólo permite visualizar los patrones isocromáticos pero no determinar las deformaciones ya que, debido a las dimensiones de las muestras y al arreglo de las placas polarizadas, no es posible realizar la separación de las deformaciones.

No obstante lo anterior, aún cuando no se pueden asegurar gran precisión en las mediciones, el dispositivo diseñado permite apreciar claramente los fenómenos que se propusieron en las especificaciones del apartado 2.2. De hecho, dado que los fenómenos que se pretenden simular con el dispositivo, en su mayoría, son típicos de la mecánica de sólidos es posible comparar los resultados obtenidos con el PMP con los que prevé la teoría correspondiente [4-8].

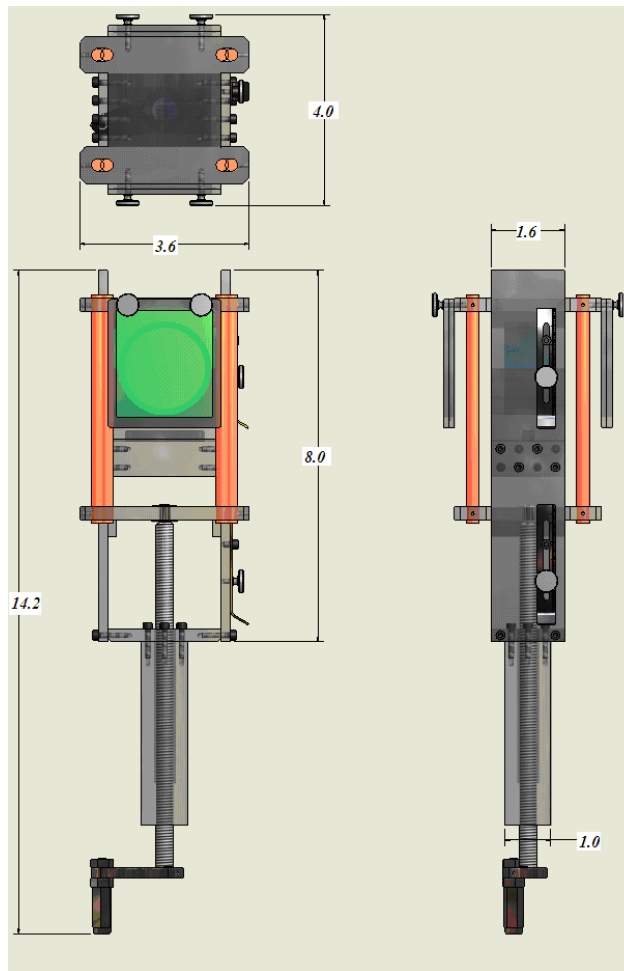


Fig. 6 Vistas y dimensiones generales, en milímetros, del Probador Mecánico Portátil (PMP).

### Pruebas al prototipo

Como se mencionó en las especificaciones del diseño, el PMP debe ser capaz de permitir la visualización de los siguientes fenómenos:

- Deflexión de un anillo circular sujeto a aplastamiento tanto libre como confinado.
- Transmisión de carga a través de un medio granular
- Flexión de una viga simplemente apoyada
- Compresión en una columna

Para lograr lo anterior, el PMP diseñado está provisto de accesorios y modelos fabricados en material birrefringente que son montados en la prensa de carga. A continuación, se presentan una serie de imágenes que muestran las pruebas que se pueden realizar en el PMP así como una breve descripción de los resultados que se obtienen en cada caso.

#### Anillo circular

En la Figura 7 se observa el patrón isocromático que se obtiene en los casos: a) de un anillo circular sometido a carga de compresión libre y b) de un anillo sometido a compresión con confinamiento lateral. Los patrones generados, para cada caso, permite apreciar claramente el cambio en la distribución de esfuerzos al cambiar las condiciones de frontera. Para el caso de la compresión libre se aprecia el típico patrón simétrico que ha sido reportado en la literatura [4, 5 y 6]. Cabe mencionar que es posible, empleando el PMP, medir la deflexión que sufre un tubo plástico bajo condiciones de aplastamiento libre así como confinado.

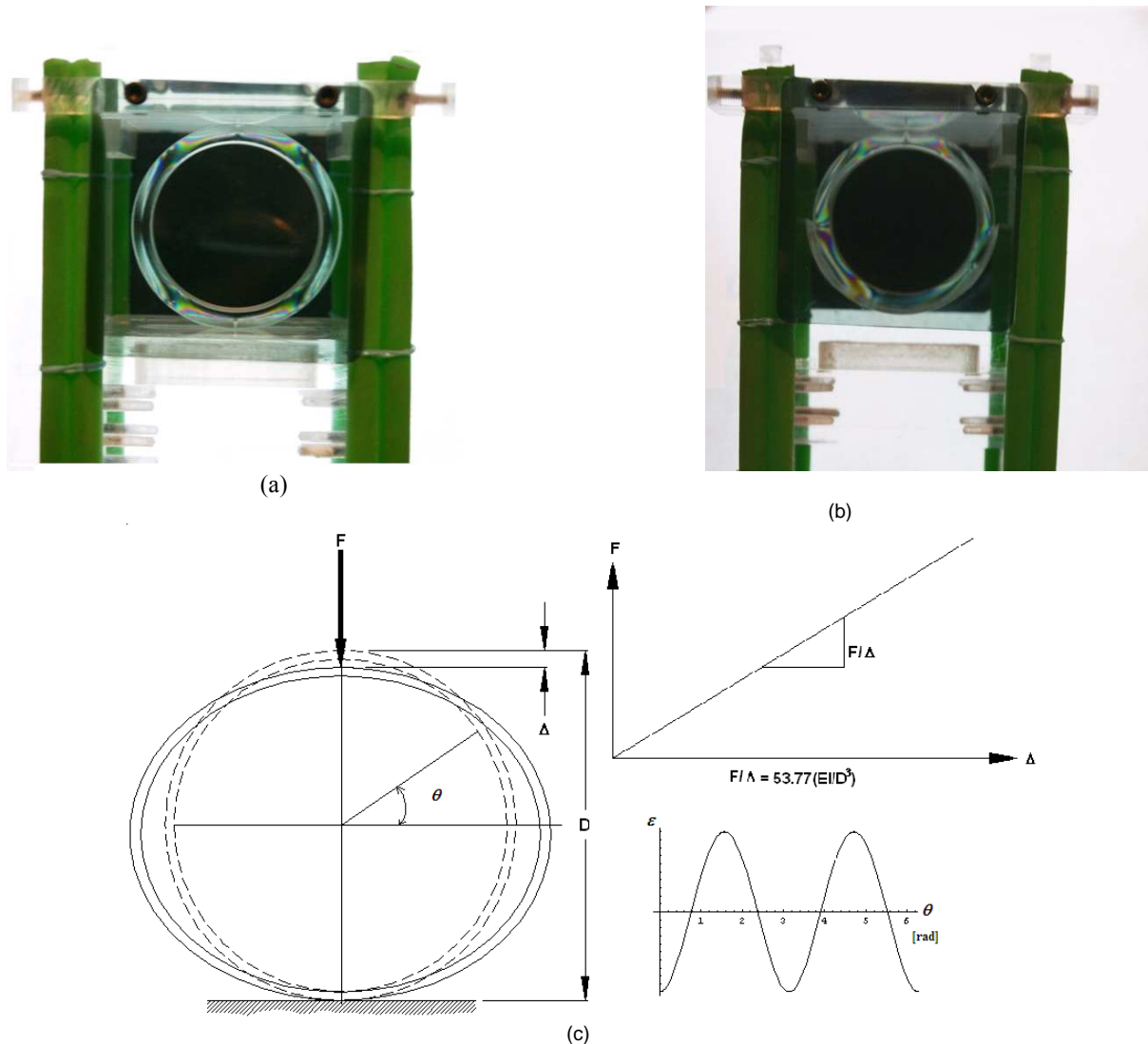


Fig. 7 Compresión de un anillo circular: a) libre, b) confinado, c) modelo teórico para el caso (a)

#### Medio granular

En la Figura 8, se presenta una fotografía en la que se emplea el PMP para estudiar la transmisión de carga a través de un medio granular. Dado que el medio granular es simulado mediante pequeños cilindros fabricados con resina birrefringente, es posible apreciar el efecto de la transmisión de las cargas vivas hacia las paredes de una zanja que es de gran importancia para las tuberías enterradas [7 y 8].

#### Flexión en viga

En la Figura 9 se muestran el típico patrón isocromático generado en una viga simplemente apoyada sujeta a una carga puntal en su parte media, montada en el PMP. Así mismo, en la Figura 9a se muestra el patrón isocromático teórico obtenido aplicando la teoría de elasticidad [5 y 6].

#### Columna en compresión

Finalmente en la Figura 10, se muestra un elemento tipo columna intermedia sometida a compresión con extremos empotrados montado en el PMP. En este caso el PMP permite al usuario observar el inicio del pandeo, el cual se manifiesta con la aparición de las franjas isocromáticas debidas a la flexión que se presenta al alcanzar la carga crítica [6].



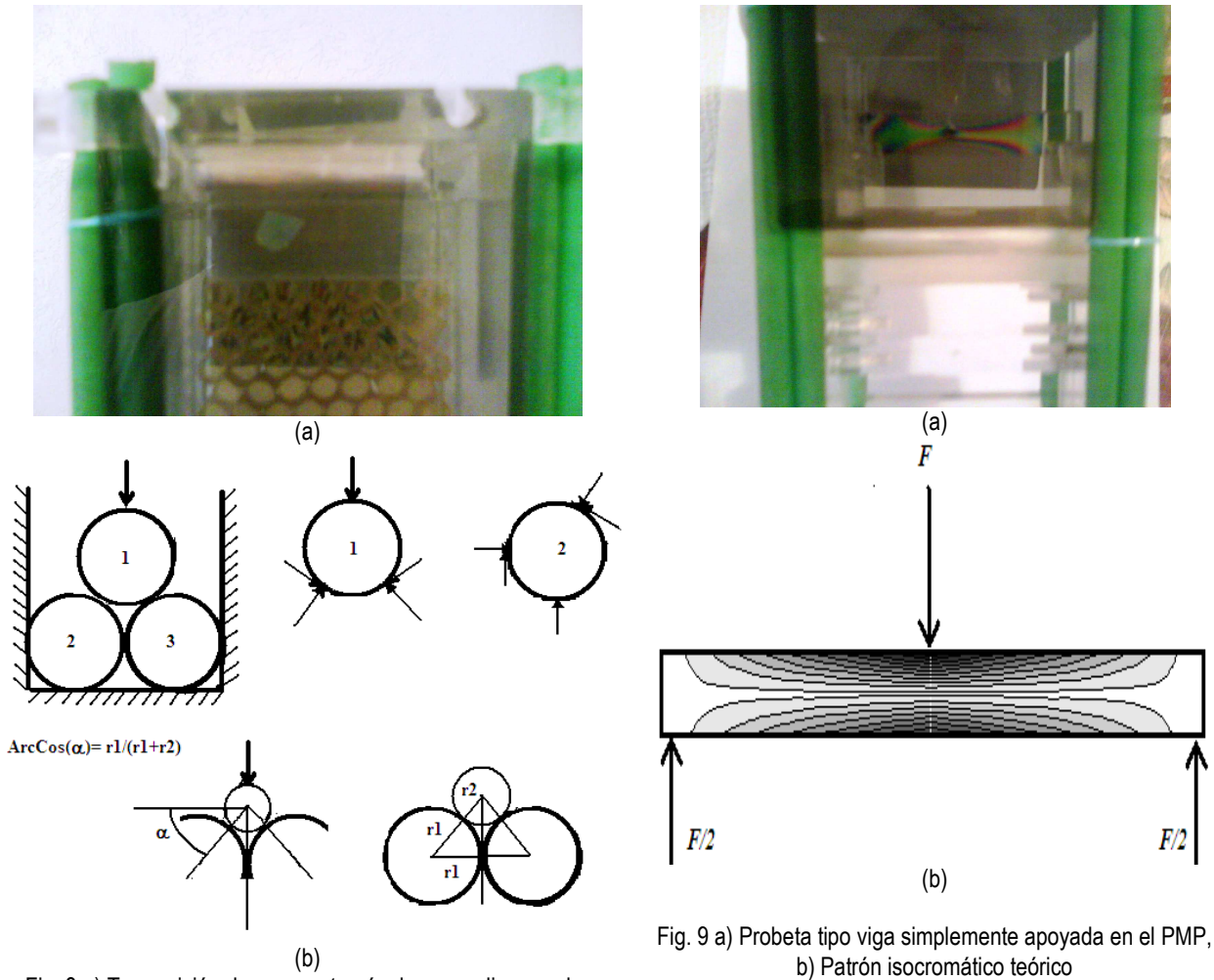


Fig. 8 a) Transmisión de carga a través de un medio granular empleando el PMP, b) Modelo teórico.

Fig. 9 a) Probeta tipo viga simplemente apoyada en el PMP, b) Patrón isocromático teórico

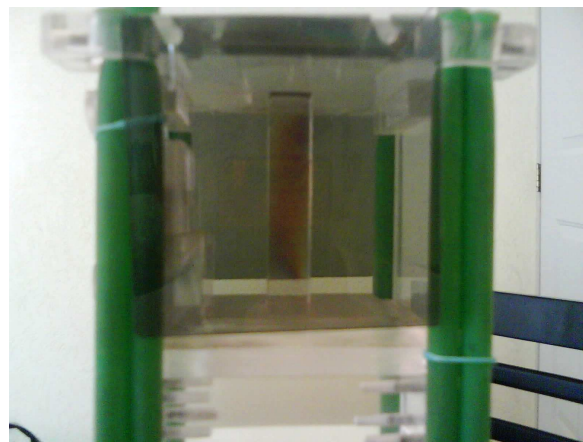


Fig.10 Modelo de columna en compresión en el PMP

## CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un dispositivo mecánico portátil, de operación manual y bajo costo capaz de simular los siguientes fenómenos físicos:

- e) Deflexión de un anillo circular sujeto a aplastamiento tanto libre como confinado.
- f) Transmisión de carga a través de un medio granular
- g) Flexión de una viga simplemente apoyada
- h) Compresión en una columna

El dispositivo diseñado permite medir, con moderada precisión, la deflexión inducida y las cargas aplicadas en las muestras ensayadas. Así mismo, el dispositivo cuenta con un arreglo de placas polarizadas que permite visualizar los patrones isocromáticos en las muestras ensayadas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico del programa PAPIME de la UNAM a través del proyecto PE102505. Así mismo se extiende un agradecimiento al personal técnico que apoyó en la elaboración del presente trabajo: Ing. Alberto Higuera García y C. Antonio González Montaña.

## REFERENCIAS

- [1] [www.gunt.de/static/s1\\_1.php](http://www.gunt.de/static/s1_1.php)
- [2] [www.tq.com/teachequip\\_products.asp?choice=1&menu=1](http://www.tq.com/teachequip_products.asp?choice=1&menu=1)
- [3] [www.vishay.com](http://www.vishay.com)
- [4] Dally J. y Riley W., “Experimental stress analysis”, Editorial McGraw-Hill, 1991.
- [5] Ugural A.C. y Fenster S.K., “Advanced Strength and applied elasticity”, Editorial Prentice Hall, 1994.
- [6] Timoshenko S. and Woinowsky S., “Theory of plates and shells”, Editorial McGraw-Hill, 1959.
- [7] Moser A.P., “Buried pipe design”, Editorial McGraw-Hill, 2001.
- [8] Watkins R. y Anderson L., “Structural mechanics of buried pipes”, Editorial CRC press, 2000.