

## Fabricación y caracterización de membranas elásticas de PDMS para lentes líquidas con longitud focal variable (LLLFV)

### Manufacture and characterization of PDMS elastic membranes for liquid lenses with variable focal length (LLLFV)

A. Santiago-Alvarado<sup>(1)</sup>, S. Vázquez-Montiel<sup>(2)</sup>, J. González-García<sup>(1,\*)</sup>,  
B. I. G Licona-Moran<sup>(1)</sup>, J. A. Rayas-Álvarez<sup>(3)</sup>, y G. Castro-González<sup>(1)</sup>

1. Instituto de Física y Matemáticas, Universidad Tecnológica de la Mixteca UTM, Km 2.5 Carretera a Acatlima, Huajuapán de León Oaxaca, C. P. 69000, México.
2. Instituto de Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE, Santa María, Tonantzintla Puebla, Apartado Postal 51 y 216, México.
3. Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) Loma del Bosque 115, Lomas del Campestre, León Guanajuato, C.P. 37150 México.

\* Email: jgonzal@mixteco.utm.mx

Recibido / Received: 2 – Jul – 2008. Versión revisada / Revised version: 8 – Oct – 2008. Aceptado / Accepted: 10 – Oct – 2008

#### RESUMEN:

El uso de membranas elásticas cada vez es más frecuente en química, física y micro-ingeniería. Debido a sus excelentes propiedades químicas y físicas, fácil manejo y costo para producir micro componentes, moldes, válvulas, micro-lentes, etc. En este trabajo se describe el proceso de fabricación y caracterización tanto mecánica como óptica de membranas elásticas elaboradas de PoliDiMetilSiloxane (PDMS Sylgard 184). Dichas membranas se utilizarán como superficies refractoras de Lentes Líquidas con Longitud Focal Variable (LLLFV), las cuales están sometidas a los cambios de presión del medio líquido contenido entre ellas. Finalmente se presentan los resultados experimentales obtenidos y simulaciones del comportamiento físico de las membranas.

**Palabras clave:** Membranas Elásticas, Propiedades Mecánicas de PDMS.

#### ABSTRACT:

Elastic membranes are being used more and more in chemistry, physics and micro-engineering. This is due to their excellent chemical and physical properties as well as their cost and being easy to handle in the production of micro components, moulds, valves, separator tubes, micro lenses etc. This study, therefore, describes the manufacturing process and the mechanical and optical characterization of elastic membranes made from polydimethylsiloxane ((PDMS Sylgard 184) which undergo changes of pressure in the liquid medium between them. Finally, the experimental results and simulations of the physical performance of the membranes are presented.

**Key words:** Elastic Membranes, Mechanical Properties of PDMS.

#### REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] S. A. Soper, S. M. Ford, S. Qi, R. L. McCarley, K. Kelly, M. C. Murphy, "Polymeric microelectro-mechanical systems", *Anal. Chem.* **72**, 642-651 (2000).
- [2] K. Hosokawa, R. Maeda, "Low-cost technology for high-density microvalve arrays using polydimethylsiloxane (PDMS)", *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference*, 531-534 (2001).
- [3] K. B. Mogensen, J. El-Ali, A. Wolff, J. P. Kutter, "Integration of polymer waveguides for optical detection in microfabricated chemical analysis systems", *Appl. Opt.* **42**, 4072-4079 (2003).

- [4] J. Ki-Hun, K. Jaeyoun, L. P. Lee, "Biologically inspired artificial compound eyes", *Science* **312**, 5773, 557-561 (2006).
- [5] V. Studer, G. Hang, A. Pandolfi, M. Ortiz, "Scaling properties of a low-actuation pressure microfluidic valve", *J. Appl. Phys.* **95**, 393-398 (2004).
- [6] K. S. Ryu, X. Wang, K. Shaikh, C. Liu, "A method for precision patterning of silicone elastomer and its applications", *J. Microelectromech. S.* **13**, 568- 575(2004).
- [7] <http://pibeta.web.psi.ch/handbook/suppliers/sylgard.pdf>.
- [8] L. Lebrun, S. Bruzaud, Y. Grohens, D. Langevin, "Elaboration and characterization of PDMS-HTiNbO<sub>5</sub> nanocomposite membranes", *Eur. Polym. J.* **42**, 1975-1985 (2006).
- [9] S. A. Parashar, V. K. Gijs, M. A. M. Gijs, "Micro-replication of optical lenses in glass using a novel sol gel technology", *Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 516-519 (2002).
- [10] Y. Xia, E. Kim, X. M. Zhao, J. A. Rogers, M. Prentiss, G. M. Whitesides, "Complex optical surfaces formed by replica molding against elastomeric masters", *Science* **273**, 5273, 347-349 (1996).
- [11] J. C. Yoo, M. C. Moon, Y. J. Choi, C. J. Kang, Y. S. Kim, "A high performance microfluidic system integrated with the micropump and microvalve on the same substrate", *Microelectron. Eng.* **83** 1684-1687 (2006).
- [12] B. S. Abhinkar, *Modeling and Development of Fabrication Method for Embedding Membrane Based Microvalve in Bulk Microfluidic Device*", Tesis de Maestría, Oregon State University (2007).
- [13] L. E. M. Gevers, I. F. J. Vankelecom, P. A. Jacobs, "Solvent-Resistant Nanofiltration with Filled Polydimethylsiloxane (PDMS) Membranes", *J. Membrane Sci.* **278**, 199-204 (2006).
- [14] J. R. Anderson, D. T. Chiu, R. J. Jackman, O. Cherniavskaya, J. C. McDonald, H. Wu, S. H. Whitesides, G. M. Whitesides, "Fabrication of topologically complete three-dimensional microfluidic systems in PDMS by rapid prototyping", *Anal. Chem.* **72**, 3158-3164 (2000).
- [15] J. C. McDonald, G. M. Whitesides, "Poly(dimethylsiloxane) as a material for fabricating microfluidic devices", *Accounts Chem. Res.* **35**, 7, 491-499 (2002).
- [16] T. L. Lowder, J. D. Gordon, S. M. Schultz, R. H. Selfridge, "Volatile organic compound sensing using a surface-relief D-shaped fiber Bragg grating and a polydimethylsiloxane layer", *Opt. Lett.* **32**, 2523-2525 (2007).
- [17] M. Wessling, M. L. Lopez, H. Strathmann, "Accelerated plasticization of thin-film composite membranes used in gas separation", *Sep. Purif. Technol.* **24**, 223-233 (2001).
- [18] H. Khoo, K. Liu, F. Tseng, "Characterization of the mechanical properties of microscale elastomeric membranes", *Meas. Sci. Technol.* **16**, 653-658 (2005).
- [19] R. Baudoin, A. Corlu, L. Griscorn, C. Legallais, E. Leclerc, "Trends in the development of microfluidic cell biochips for in vitro hepatotoxicity", *Toxicol. in Vitro* **21**, 535-544 (2007).
- [20] C. A. Marquette, L. J. Blue, "Direct immobilization in poly(dimethylsiloxane) for DNA, protein and enzyme fluidic biochips", *Anal. Chim. Acta* **506**, 127-132 (2004).
- [21] R. González, R. Bernal, F. Melo, "Caracterización de membranas de PDMS para el estudio de fuerzas de adhesión celular", Chile (2003), [http://nlplab.usach.cl/publications/presentations%20and%20posters/articulo\\_MembrAdhesionCelular\\_rodrigo.pdf](http://nlplab.usach.cl/publications/presentations%20and%20posters/articulo_MembrAdhesionCelular_rodrigo.pdf).
- [22] A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Adjari, I. Mezic, H. A. Stone, G. M. Whitesides, "Chaotic mixer for microchannels", *Science* **295**, 647-651 (2002).
- [23] G. J. M. Bruin, "Recent developments in electrokinetically driven analysis on microfabricated devices", *Electrophoresis* **21**, 3931-3951 (2000).
- [24] N. Chronis, G. L. Liu, K.-H. Jeong, L. P. Lee, "Tunable liquid-filled microlens array integrated with microfluidic network", *Opt. Express* **11**, 2370-2378 (2003).
- [25] T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach, "Tunable liquid microlens", *Appl. Phys. Lett.* **82**, 316-318 (2003).
- [26] S. Kuiper, B. H. Hendricks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1128-1130 (2004).
- [27] N. A. Polson, M. A. Hayes, "Microfluidics controlling fluids in small places", *Anal. Chem.* **73**, 312A-319A (2001).

- [28] H. Ren, D. Fox, P. A. Anderson, B. Wu, S. T. Wu, "Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor", *Opt. Express* **14**, 8031-8036 (2006).
- [29] K.-H. Jeong, G. Liu, N. Chronis, L. Lee, "Tunable microdoublet lens array", *Opt. Express* **12**, 2494-2500 (2004).
- [30] D. Shaw, T. E. Sun, "Optical properties of variable-focus liquid-filled optical lenses with different membrane shapes", *Opt. Eng.* **46**, 024002 (2007).
- [31] K. B. Mogensen, J. El-Ali, A. Wolff, J. P. Kutter, "Integration of polymer waveguides for optical detection in microfabricated chemical analysis systems", *Appl. Opt.* **42**, 4072-4079 (2003).
- [32] A. Santiago-Alvarado, S. Vázquez-Montiel, J. González-García, V. M. García-Luna, A. Fernández-Moreno, E. Vera-Díaz, "Analysis and design of an adaptive lens", *Proc. SPIE* **6288**, 6288OS (2006).
- [33] [http://www.ohaus.com.mx/voyager\\_pro\\_a.htm](http://www.ohaus.com.mx/voyager_pro_a.htm).
- [34] A. Martínez, J. A. Rayas, E. Rodríguez-Vera, "Medición del módulo de Young en el Hule Latex usando ESPI", *Rev. Mex. Fis.* **49**, 555-564 (2003).
- [35] <http://mrtl.colorado.edu/equipment/pdf%20files/Dow%20Corning%20Sylgard%20184%20data%20sheet.pdf>
- [36] ANSYS Inc., *ANSYS Theory Reference*, 11 ed. Oxford University Press. (2008).
- [37] K.H. Huebner, E.A. Thornton, T.G. Byron, *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley & Sons (1995).
- [38] G. C. Knollman, J. L. S. Bellin, J. L. Weaver, "Variable-focus liquid-filled hydroacoustic lens", *J. Opt. Soc. Am.* **49**, 253-261 (1971).
- [39] N. Sugiera, S. Morita, "Variable-focus liquid-filled optical lens", *Appl. Opt.* **32**, 4181-4186 (1993).

## 1. Introducción

La fabricación de membranas hechas de un material polimérico es relativamente fácil, y su uso como material reduce el tiempo y complejidad en la elaboración de prototipos [1], además su alta transparencia, eficiencia, nula toxicidad, y bajo costo [2], las hace ideales para su empleo en diversas áreas del conocimiento como química [3], biomedicina [4], física [5] y en la micro y nanotecnología [6].

Recientemente uno de los materiales elásticos poliméricos más activo y del que más aplicaciones se han reportado en la literatura es el Polidimethylsiloxane mejor conocido como PDMS Sylgar 184 [7,8]. Con él se han diseñado y elaborado micro-moldes [9,10], micro-válvulas [11,12], tubos separadores [13], sistemas de micro-fluidos [14,15], sensores químicos [16,17], membranas para protección de equipos [18], células de biochips [19,20], membranas para estudios de fuerzas de adhesión celular [21], mezcladores de líquidos y gases [22], en análisis médicos, monitoreo ambiental, análisis bioquímico y microquímico [23].

En óptica se ha reportado el uso y fabricación de lentes líquidas con longitud focal variable y micro lentes [24-26], las cuales están formadas por dos membranas elásticas transparentes con un medio líquido entre ellas, y cambian su longitud focal al modificar la cantidad del medio líquido, estos trabajos se han concentrado en la forma que

adquiere la membrana y el comportamiento de las lentes así formadas y no en la fabricación de estas.

La fabricación en PDMS es directa ya que generalmente se utiliza un molde maestro obteniéndose replicas con precisiones de 0.1  $\mu\text{m}$  a 10 nm de fidelidad [27], esto es debido al fácil curado y manipulación del material, así como a la excelente propiedad de sellado que posee. El PDMS es suministrado en dos componentes, una base y un agente de curado. El proveedor sugiere mezclar las dos partes en una proporción de 10:1 base-agente de curado, vertir el líquido sobre el master, y curar la mezcla.

En cada una de estas aplicaciones el proceso de fabricación es variado, desde utilizar diferentes concentraciones de base y agente de curado para la mezcla [28], hasta modificar el tiempo de curado y temperatura sugeridos por el fabricante [24,29,30], por otra parte la técnica empleada para la fabricación y curado de las membranas cambia, en algunas ocasiones se hace uso de litografía suave y en otras de centrifugado [24,28,31].

En este trabajo se propone un método alternativo, sencillo y barato para la elaboración y caracterización de membranas de PDMS, que son empleadas como superficies refractoras de lentes líquidas con diámetros del orden de centímetros. La caracterización consiste en medir parámetros mecánicos y ópticos. Finalmente con los datos obtenidos, se realizó una simulación en ANSYS para generar mapas de esfuerzos de las membranas

cuando son sometidas a cambios de presión por el medio líquido contenido entre ellas, asimismo se presenta una descripción del comportamiento de las membranas bajo estas condiciones de trabajo.

## 2. Proceso de fabricación

Las membranas a fabricar se utilizarán como superficies de LLLFV con diámetros de 1 a 2 cm, espesores de 0.1 a 1 mm., estarán fijadas de sus bordes a la montura de la lente, y serán sometidas a cambios de presión por el medio líquido contenido entre ellas. El líquido deformará a la membrana (dentro de la región elástica sin que esta cambie sus propiedades mecánicas) modificando la curvatura, espesor axial, y con ello los parámetros geométricos de la lente.<sup>32</sup> Dadas las condiciones de uso, el comportamiento esperado y dimensiones, no es requerido el uso de técnicas sofisticadas como litografía suave, que generalmente es empleada en la fabricación de micro-canales o moldes [28,29]. Nosotros optamos por aplicar una técnica artesanal que es sencilla y barata, ya que no involucra el uso de aparatos sofisticados, y aun los empleados pueden ser sustituidos por aquellos de fabricación casera.

La metodología desarrollada consiste en 4 pasos:

- Paso 1, pesado de componentes en proporción 10:1 (base: agente de curado) para ello se utilizó una balanza analítica Ohaus modelo Voyager [33].
- Paso 2, mezclar los componentes mediante agitación manual (durante cinco minutos) hasta obtener una mezcla homogénea en un vaso de precipitado y empleando una varilla de vidrio.
- En el Paso 3 se realiza una extracción de burbujas de aire presentes en la mezcla, para ello, se colocó el vaso que contenía la mezcla dentro de una cámara de vacío, diseñada y fabricada por nosotros, el tratamiento consistió en aplicar vacío durante un total de 10 periodos de 3 minutos cada uno (ver Fig. 1).
- Finalmente, el Paso 4 consistió en verter la mezcla en una superficie de vidrio plana (limpiada previamente con alcohol isopropílico para eliminar la presencia de partículas y grasa), dejándola reposar dentro de una campana de flujo laminar en posición horizontal por siete días para su curado, y posterior desprendimiento de la membrana, este procedimiento puede observarse en la Fig. 2. El proceso se realizó a una temperatura de 25 °C (la resistencia mecánica óptima se alcanza en 7 días al igual que sus propiedades mecánicas y eléctricas).

El uso de la campana de flujo laminar (marca Labconco modelo 36212-04) fue para evitar la contaminación por partículas sólidas de la mezcla durante su vertido y curado de la misma (la campana de flujo laminar es del tipo 2, y posee filtros para retención de partículas mayores a 45  $\mu\text{m}$ , con lámparas de UV, y flujo laminar para formar una pared de aire que aisle el ambiente interno del externo).

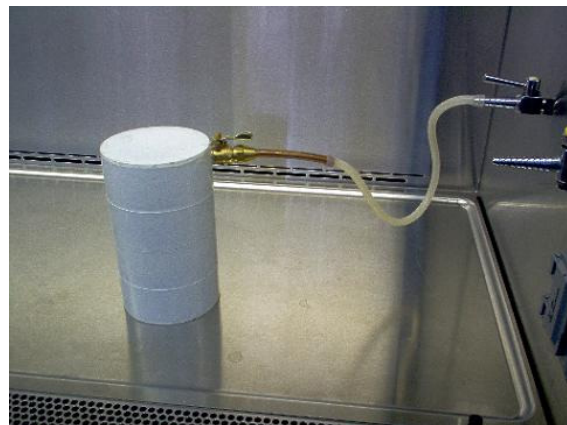


Fig. 1. Cámara de vacío para extracción de aire.

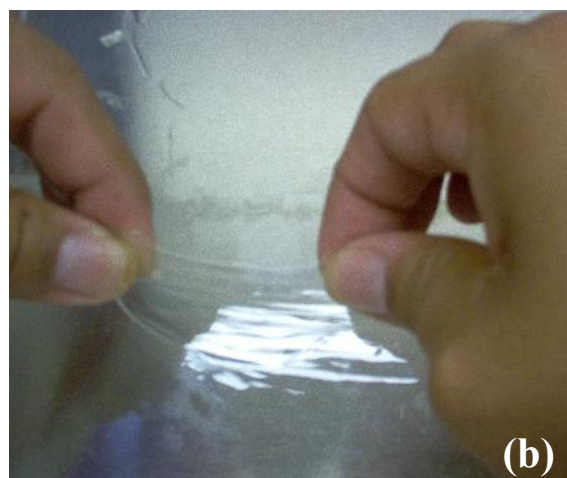
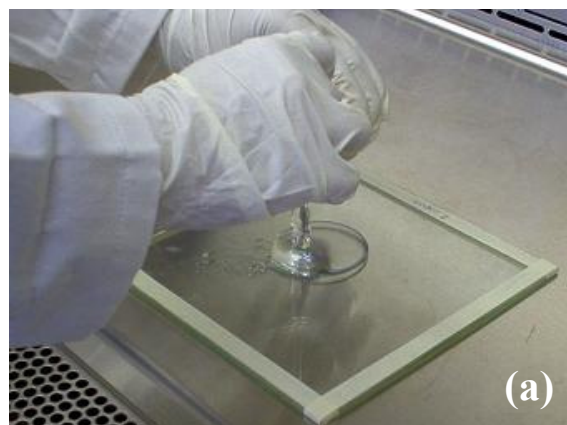


Fig. 2. (a) Vertido de mezcla, (b) desprendimiento de membrana.

### 3. Caracterización física de membranas elaboradas de PDMS

La caracterización de la membrana consiste en conocer el mayor número de sus propiedades físicas para predecir su comportamiento, sobre todo de aquellas que están relacionadas con su funcionamiento cuando es sometida a cambios de presión por el medio líquido.

En la siguiente sección se presentan las propiedades mecánicas y ópticas estudiadas en las membranas de PDMS que son fabricadas con la técnica propuesta.

#### 3.a. Propiedades Mecánicas de la membrana

La caracterización mecánica de las membranas elásticas de PDMS consistió en realizar una prueba de ensayo a tensión, para medir su Módulo de Young, coeficiente de Poisson, límite elástico, módulo cortante, límite de tracción, densidad, espesor, rango elástico y punto de corte.

Para la medición de estos parámetro se realizó una prueba con un dispositivo comercial

equivalente a una máquina de ensayo a tensión [34]. La longitud original de la probeta es de 110 mm y con un ancho de 13.7 mm. Con ayuda de este equipo se realizó una prueba de ensayo realizando 254 mediciones de esfuerzos, deformaciones unitarias y del módulo de elasticidad con los cuales se construyó el diagrama esfuerzo-deformación unitaria correspondiente, el cual es mostrado en la figura 3. En la gráfica de la figura 4 se ilustra un ajuste lineal a los valores de la curva esfuerzo-deformación unitaria, la cual es la región elástica del material. Esta región muestra el rango en el que la membrana tiene un comportamiento lineal (de 0.032 a 0.6636 en deformación).

El valor del módulo de Young encontrando (pendiente de la gráfica esfuerzo-deformación unitaria) al hacer un ajuste con el método de mínimos cuadrados es de 1.2 MPa, con una desviación estándar de 24.1 kPa y un coeficiente de correlación de 0.9945 a una temperatura de 24 °C. Por lo tanto el valor de referencia para el módulo de Young de la membrana es de 1.2 MPa.

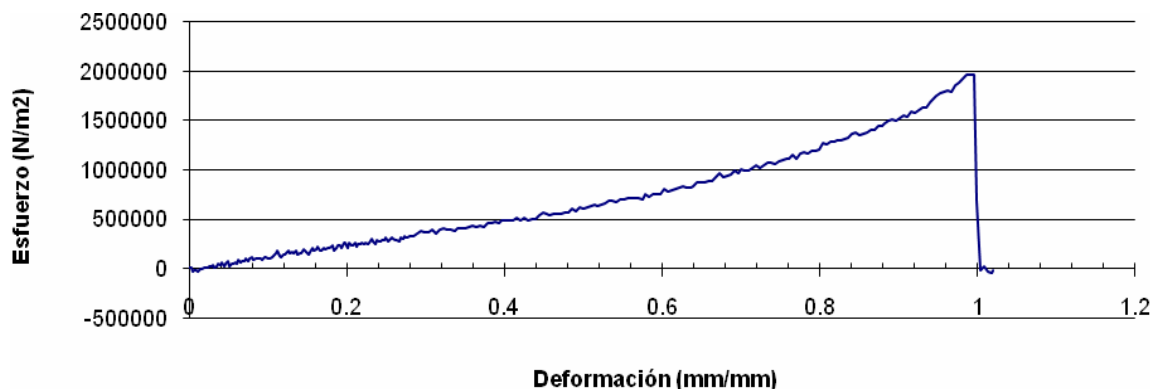


Fig. 3. Gráfica de esfuerzos-deformación unitaria de membrana PDMS.

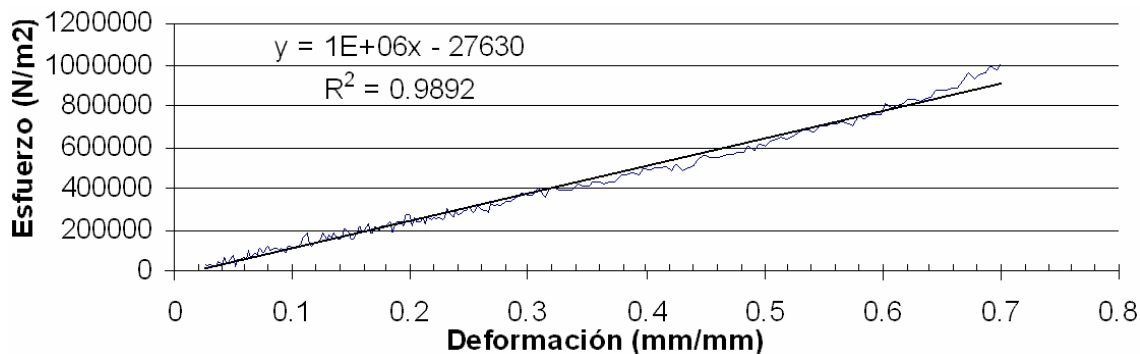


Fig. 4. Gráfica de ajuste lineal a curva de esfuerzo-deformación unitaria.

El coeficiente de Poisson resultó ser de 0.46, para la membrana fabricada (este se midió indirectamente al medir la deformación transversal con ayuda de una cámara de CCD), el espesor de la membrana fue de 0.5 mm medido con un vernier digital. Con los valores medidos se encontró que el módulo cortante del material es de 411 kPa, valor que se calcula relacionando el módulo de Young y el coeficiente de Poisson. La densidad medida del material resultó ser de 0.982 g/mL. El límite elástico y el límite de tracción del material son de 700 kPa y 1.9 MPa respectivamente, estos valores se tomaron del diagrama esfuerzo-deformación unitaria.

Al realizar el ajuste a la curva esfuerzo-deformación (Fig. 4) se observa que en este valor la línea se separa cada vez más, y con la finalidad de manejar una cantidad cerrada se escogió el valor de 700 kPa como límite elástico, porque se cree que en este punto termina la zona lineal de la curva. Como no es clara la transición en la curva, se debería calcular como límite elástico la tensión a la cual el material tiene una deformación plástica del 0.2%, pero resulta que el material nunca entra a la zona plástica, más bien parece que se hace más resistente cuanto mayor carga se le aplica, al contrario que los metales. Por esta razón se tomó el límite elástico justo en la zona de transición (cuando termina la zona lineal en el ajuste).

### 3.b. Propiedades ópticas de membranas

Dado que las membranas fabricadas se ocuparán como superficies refractoras de una LLLFV en la región visible, es importante conocer sus propiedades ópticas en esta región, como es el índice de refracción, transmitancia y absorción espectral para predecir su funcionamiento.

El índice de refracción se midió experimentalmente con ayuda de un refractómetro de proyección de Abbe, modelo WY1A Xintian fine optical instrument corporation, arrojando un valor de  $n=1.4157 \pm 0.0001$ , el cual es muy similar a los reportados en la literatura [29,31].

Respecto a las gráficas de absorción y transmisión espectral, estas se midieron experimentalmente con un Spectrometer UV 300-visible, marca Spectronic, Unicam, ver Figs. 5 y 6 respectivamente. Como se puede ver la membrana absorbe menos del 0.05% y transmite arriba del 90% de la radiación visible que llega a esta. Por lo que podemos considerar que tiene un desempeño eficiente.

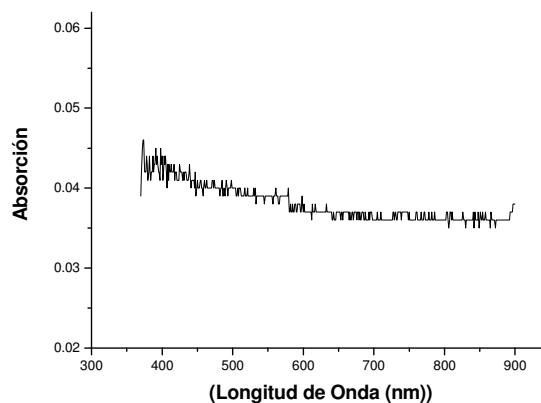


Fig. 5. Rango espectral de absorción de la membrana de PDMS con 1 mm de espesor.

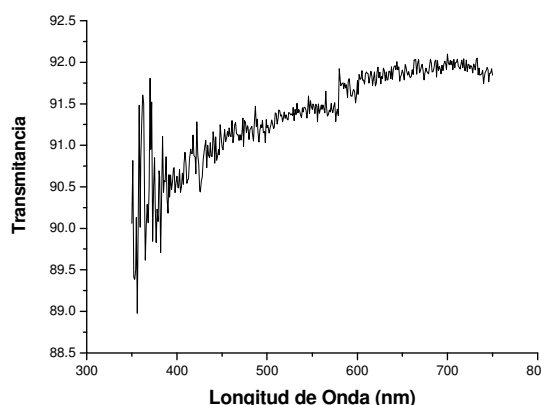


Fig. 6. Rango espectral de transmitancia de la membrana elaborada de PDMS con 1 mm de espesor.

## 4. Características de la membrana

Finalmente en esta sección se presenta un resumen de las propiedades y características físicas que exhiben las membranas elásticas fabricadas bajo el procedimiento descrito en la sección 2, algunas de ellas son proporcionadas por el fabricante [7,35], o aparecen reportadas en la literatura [17], ver tablas I y II.

El compendio de las características y propiedades de las membranas en un solo documento permitirá saber si éstas son óptimas para posibles aplicaciones. Por otro lado, con la información aquí presentada se puede simular el comportamiento mecánico de la membrana empleando Ansys [36], el cual usa la técnica de elemento finito para realizar el análisis [37]. En éste programa se puede simular la aplicación de esfuerzos radiales, tangenciales, cambios de presión, etc., y evaluar la respuesta del material bajo éstas circunstancias.

TABLA I  
Propiedades físicas y químicas del PDMS.

Propiedad	Característica	Consecuencia
Óptica	Transparente, longitud de onda UV de corte de 240 nm, índice de refracción 1.4157, absorción del 0.04% y transmisión arriba del 90% en la región visible.	Detección óptica de 240 a 1100 nm. Transparente en la región visible, siendo homogéneo, lineal e isotrópico.
Eléctrica	Aislante, voltaje de colapso o falla de $2 \times 10^7$ V/m.	Permite incrustación de circuitos; no presenta fallas al abrir conexiones.
Mecánica	Módulo de Young 1.2 MPa, coeficiente de Poisson 0.46, módulo cortante 411 kPa, límite de tracción 1.9 MPa, límite elástico 700 kPa y densidad 0.982 g/mL.	Adopta la forma de la superficie, facilidad de moldeado, y es reversible cuando se actúa sobre él al deformarlo.
Térmica	Aislante, conductividad térmica 0.2 W/(m·K), coeficiente de expansión térmica $310 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ .	Puede ser usado como aislante térmico, no permite disipación de calor resistivo de separación electroforética.
Interfacial	Baja energía libre superficial $\sim 20 \text{ erg}/\text{cm}^2$ , 100% de elongación.	Las replicas son fácilmente removidas del molde, sellado reversible en materiales que contienen soluciones acuosas en canales.
Permeabilidad	Impermeable al agua, permeable a gases y solventes orgánicos no polares.	Permite transportar gas a través de grandes cantidades de material, incompatible con muchos solventes orgánicos.
Reactividad	Inerte, puede ser oxidado por exposición a un plasma $\text{Bu}_4\text{N}^+\text{F}^-$ ((TBA)F).	No reactivo con muchas sustancias químicas, la superficie puede ser grabada, puede ser modificado para ser hidrofílico y también reactivo con silicón e hidrógeno, grabado con (TBA)F puede alterar la topografía de la superficie.
Toxicidad	No tóxico.	Puede ser implantado en vivo; soporta células mamíferas en crecimiento.

TABLA II  
Rasgos especiales y beneficios [15].

Rasgo Especial	Beneficio
Baja Toxicidad.	No requiere cuidados especiales para manejo industrial.
No produce calor en el proceso de curado.	No requiere ventilación especial; no causará corrosión; bajo encogimiento durante el proceso de curado.
Después del curado se convierte en un elastómero flexible transparente.	Suministra estabilidad y ayuda ante choques mecánicos; baja transmisión de vibraciones; permite inspección visual de componentes y fácil reparabilidad.
Protección ambiental.	Baja absorción de agua; buena resistencia a la radiación; baja volatilidad al vacío.
Excelentes propiedades dieléctricas.	Mantiene y protege el aislamiento eléctrico requerido
Estabilidad sobre un amplio rango de temperaturas y resistente a la reversión.	Mantiene la flexibilidad elastomérica y provee estabilidad funcional de -55 to 200 C (-67 a 392 F), posee mismo comportamiento en confinamiento.
Resistente al fuego.	Clasificación de flamabilidad UL de 94 V-1 y una temperatura máxima de 130 C (265 F).
Técnicas de tratamiento de curado.	Uno de los siguientes ciclos de curado es sugerido: 25 C (77 F) por 24 horas 65 C (149 F) por 4 horas 100 C (212 F) por 1 hora 150 C (302 F) por 15 minutos

Con la información obtenida, se realizó una simulación en Ansys para conocer el comportamiento de la membrana cuando es sometida a cambios de presión, como le sucederá cuando sea colocada como superficie refractora de la lente líquida. Para la simulación se consideró un espesor de 0.5 mm, un diámetro de 20 mm con forma circular y una presión de 100 mmHg. De los resultados obtenidos en la simulación, se encontró que en el centro de la membrana es donde se presentan los mayores esfuerzos (ver Fig. 7), al igual que los mayores desplazamientos (ver Fig. 8), asimismo es en el centro donde el espesor de la membrana se reduce más como se puede ver en la Fig. 9. Esta información concuerda con los resultados teóricos predichos por Knollman y Sugiera [38,39], aunque ellos emplean membranas con espesores del orden de micras y en este trabajo se emplean espesores del orden de milímetros, el cambio de espesor puede ser despreciado, ya que solo introduce modificaciones menores al 1.5 % en la longitud focal de la lente cuando es o no considerado el grosor de la membrana.

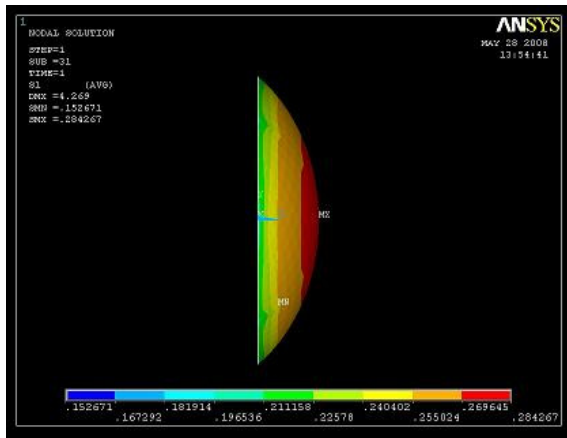


Fig. 7. Distribución de esfuerzos en la superficie de la membrana.

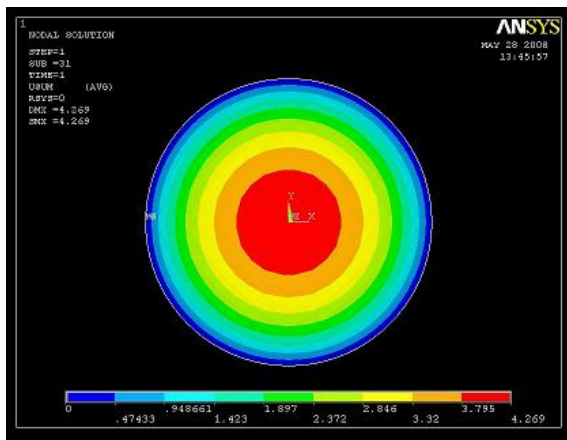


Fig. 8. Desplazamientos presentes en la membrana bajo una presión de 100 mmHg.

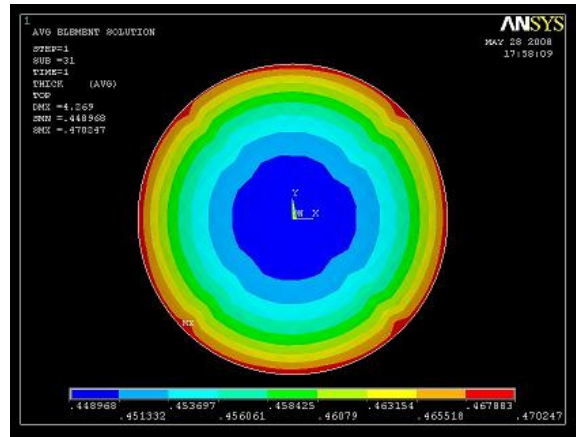


Fig. 9. Distribuciones de espesores en la membrana bajo una presión de 100 mmHg.

### 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para fabricar membranas elásticas de PDMS y caracterizar sus propiedades mecánicas y ópticas, dichas membranas son utilizadas como superficies refractoras de LLLFV y a su vez sirven como superficies contenedoras del medio líquido inmerso entre ellas, modificando su curvatura debido a cambios de presión del medio líquido. Las propiedades y parámetros físicos encontrados, predicen comportamientos deseados para la aplicación propuesta, ya que los rangos de presiones a los que serán sometidas no alterarán sus propiedades mecánicas y ópticas. El método de fabricación propuesto resulto ser sencillo y económico, ya que no involucra el uso de aparatos sofisticados, y aun los empleados pueden ser sustituidos por aquellos de fabricación casera o artesanal. El PDMS ha resultado ser un material con propiedades y características deseables para lentes líquidas, lo que ha permitido su uso en diversas áreas del conocimiento y la tecnología, proporcionando soluciones rápidas, sencillas y baratas, principalmente en microingeniería. Las perspectivas de uso de este material son muy prometedoras y cada día aparecen reportadas más aplicaciones en las diversas áreas de la ciencia y la tecnología.

### Agradecimientos

Desearnos agradecer al CONACYT por su financiamiento mediante el proyecto: SEP2004C01-46080, “Óptica Adaptativa de Sistemas Refractoras”.