



SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO OPTO-MECÁNICO DE UNALENTE LÍQUIDA USANDO UNA MEMBRANA DE ESPESOR VARIABLE.

Mario C. Flores-Bustamante^a, Sergio Calixto^a

^aCentro de Investigaciones en Óptica, León, Gto., mariocfb@cio.mx, scalixto@cio.mx

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de simulación del comportamiento mecánico y óptico de una lente sintonizable formada por dos elementos ópticos, un vidrio plano y una membrana de hule de silicón de espesor variable y entre ambos un medio líquido. Se ha determinado que la membrana al deformarse se comporta como un paraboloide elíptico. También se determinó que las aberraciones esféricas longitudinal y transversal aumentan de manera no lineal con el aumento de la presión cuando se emplea un líquido con índice de refracción $n = 1.414$ igual al material de la membrana. En la simulación, se proyectaron rayos colimados paralelos al eje óptico de la lente por la superficie plana. Bajo estas condiciones, las gráficas presión vs aberración esférica longitudinal y transversal muestran que el comportamiento óptico de la lente con membrana de espesor variable es semejante al de una lente con membrana de espesor constante.

1. INTRODUCCIÓN

A través de los años los elementos ópticos han sido fabricados de materiales duros e indeformables como vidrio, cristales o metales por mencionar algunos. Características como el radio de curvatura y el índice de refracción de estos elementos permanecen fijas a lo largo de su vida útil. En la actualidad, muchas aplicaciones modernas exigen que las características de los elementos ópticos sean dinámicas. Las lentes sintonizables cumplen con este requisito cambiando su distancia focal al modificar alguno de sus parámetros geométricos y/o el índice de refracción entre sus caras. Estas lentes han sido empleadas en micro-sistemas ópticos aligerándolos, simplificándolos y compactándolos. Los parámetros geométricos pueden ser modificados de diversas formas, por ejemplo, al ejercer presión en el fluido de la lente, por electroquímica, por efectos térmicos, por electromojado o por dielectroforésis, entre otros. Las lentes líquidas con membranas elásticas son un tipo de lente sintonizable que han sido propuestas para aparecer como elementos ópticos de diferentes sistemas ópticos. Tienen la ventaja de ser simples y de buena calidad en su funcionamiento. La literatura es abundante y puede encontrarse una gran cantidad de información sobre lentes con membranas de espesor constante, sin embargo, la información sobre lentes líquidas con membranas de espesor variable es escasa. Hemos iniciado un estudio de lentes líquidas con este tipo de membranas con el objetivo de obtener información, desde la más básica, para realizar una labor de reconocimiento del tema.

2. TEORÍA

Los elementos de la lente líquida estudiada se muestran en la Figura 1 y son los siguientes: una superficie plana de contorno circular de 50 mm de diámetro y 0.13 mm de espesor, hecha con vidrio BK7 con índice de refracción 1.516. Una membrana plano/esférica hecha con material comercial Silastic T2 de Dow Corning USA e índice de refracción $n = 1.414$. Las dimensiones son las siguientes: diámetro de 5 cm, espesor en la zona de sujeción de 0.2 cm, espesor en el centro de la membrana de 0.25 cm, radio de curvatura de la cara exterior de 125 cm. La forma puede



verse en la figura 1(b). Un fluido transparente cuyo índice de refracción es igual al índice de refracción de la membrana $n = 1.414$, contenido en un recipiente indeformable.

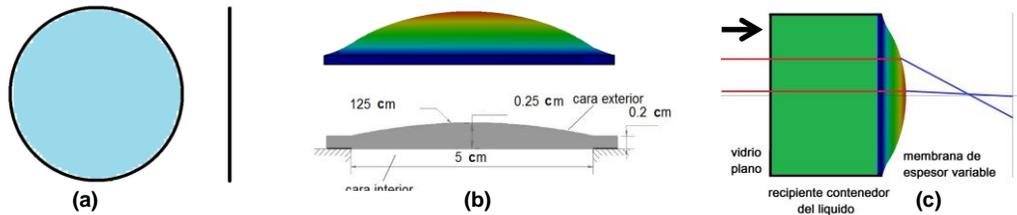


Figura 1. (a) vidrio plano (b) membrana de espesor variable en su forma original y deformada (c) ensamble.

Estudio mecánico. El estudio de la deformación de la membrana se realizó con el software Solidworks a través del método de elementos finitos (MEF). El MEF es un método numérico que permite que un problema sea planteado a través de una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas. La serie de ecuaciones se obtiene por la modelación de la división de un cuerpo en un sistema equivalente de cuerpos más pequeños interconectados por medio de puntos comunes o nodos, que forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes (Figura 2). Cada elemento es afectado por las condiciones de frontera del cuerpo estudiado como un todo. Dado que el problema tiene que ser “discretizado”, la solución arroja valores aproximados de las incógnitas en un número finito de locaciones en la división de la pieza. El MEF se ha posicionado como una de las herramientas principales en el proceso de análisis en el

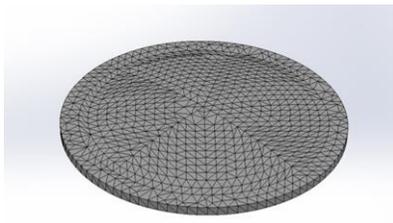


Figura 2. División o mallado de una membrana de espesor variable.

diseño de productos basados en materiales elastoméricos y los paquetes comerciales involucran modelos constitutivos para describir su comportamiento elástico no lineal. La caracterización adecuada de la hiperelasticidad en el software comercial, permite relacionar los modelos constitutivos con los datos experimentales disponibles y obtener resultados cercanos y congruentes con la realidad. En el presente trabajo se eligió el modelo constitutivo Mooney Rivlin para hacer la simulación, y que funciona adecuadamente hasta elongaciones del 60% de las dimensiones originales de una pieza.

Estudio óptico. Las imágenes producidas por un sistema óptico presentan una serie de defectos llamados aberraciones. La aberración esférica ha sido una de las más estudiadas y trabajadas en los sistemas ópticos porque afecta la totalidad de la superficie de una lente. En la lente líquida propuesta en este trabajo se calculan las aberraciones esféricas mediante el trazo de rayos en el plano meridional. El trazo de rayos es una técnica empleada para analizar la propagación de un haz luminoso a través de un sistema óptico, aplicando la ley de Snell para obtener el

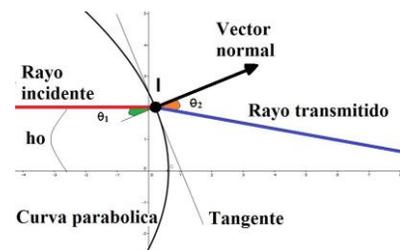


Figura 3. Rayos incidente, transmitido y vector normal a una parábola en el punto de intersección I



ángulo de transmisión en cada superficie. De acuerdo a Snell, la dirección del rayo transmitido en la Figura 3 está dada por

$$\theta_2 = \arcsen(n_1 \sen \theta_1) \quad (1)$$

Para calcular las aberraciones esféricas se traza un rayo paralelo al eje óptico de izquierda a derecha, que incide perpendicularmente a la superficie plana de la lente líquida (Figura 1c), transmitiéndose sin modificar su dirección hasta incidir en el perfil de la membrana, por ejemplo, en el punto I (Figura 3). Calculando el vector normal a la curva en I se obtiene θ_1 entre el rayo incidente y el vector normal y por (1) obtenemos la dirección del rayo transmitido θ_2 respecto al vector normal. I y θ_2 permiten hacer el trazo del rayo transmitido. Al variar la altura (h_0) del rayo incidente, el programa actualiza todos los parámetros. Cuando se proyectan rayos paralelos a diferentes alturas h_0 del perfil de la membrana, se observa que no convergen en un punto al intersectar el eje óptico. La longitud generada por la falta de convergencia entre los rayos transmitidos es lo que se conoce como aberración esférica y el foco del rayo paraxial se toma como origen para medir este tipo de aberración. Para calcular el radio de curvatura y la curvatura en el vértice de la parábola, calculamos la circunferencia osculatriz de la parábola en el vértice. La expresión de la potencia de la lente la obtuvimos a partir de la ecuación de fabricante de lentes suponiendo una lente de grosor (s):

$$\phi = \frac{1}{f_e} = (n - 1) \left[\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{s(n - 1)^2}{nr_1 r_2} \right] \quad (2)$$

$$\text{si } r_1 \rightarrow \infty \quad \phi = \frac{1-n}{r_2} \quad (3)$$

3. PARTE EXPERIMENTAL

Las constantes del material presentes en las ecuaciones del modelo constitutivo se obtienen a partir de ensayos experimentales, por lo que se realizó una prueba simple de tensión del hule de silicón de acuerdo a la norma ASTM D-638 con los siguientes resultados

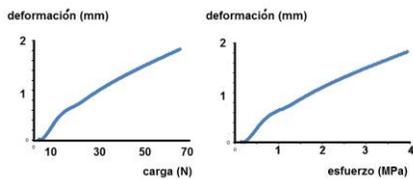


Figura 4. Gráficas carga/deformación y esfuerzo/deformación del material Silastic T2 de Dow Corning.

Las expresiones algebraicas de los perfiles meridionales de la membrana se obtienen de muestras estadísticas de la simulación y se emplean para calcular las características ópticas y las aberraciones de la lente.

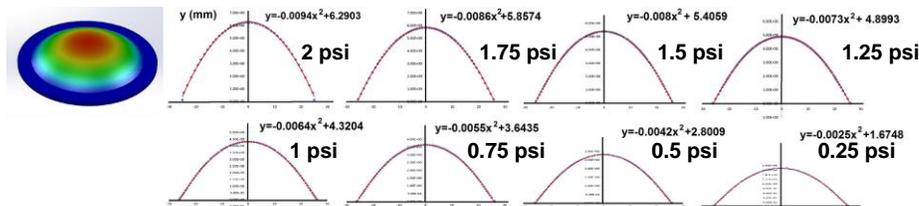


Figura 5. Perfiles meridionales de una lente líquida sometida a diferentes valores de presión.



Se calcularon los radios de curvatura y las distancias focales de la lente líquida a diferentes presiones y se observó que disminuyen de manera no lineal con el aumento de presión, mientras que la curvatura y la potencia aumentan de manera no lineal con el aumento de presión.

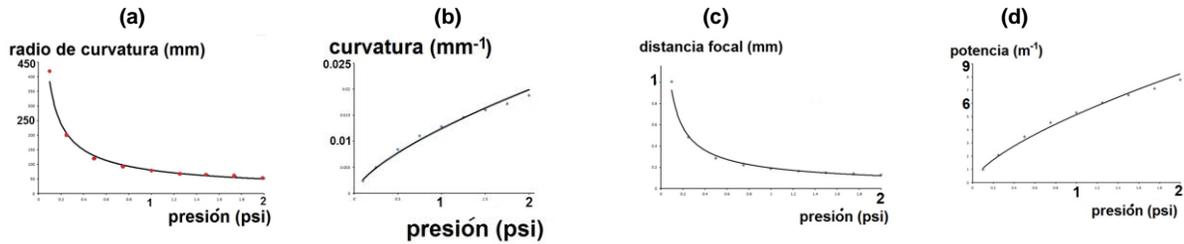


Figura 5. Gráficas (a) radio vs presión, curvatura vs presión, distancia focal vs presión, potencia vs presión para una membrana de espesor variable.

Las aberraciones esféricas longitudinal y transversal aumentan de manera no lineal con la presión para una altura h_o del rayo de incidencia y aumentan con el incremento de la altura de los rayos incidentes.

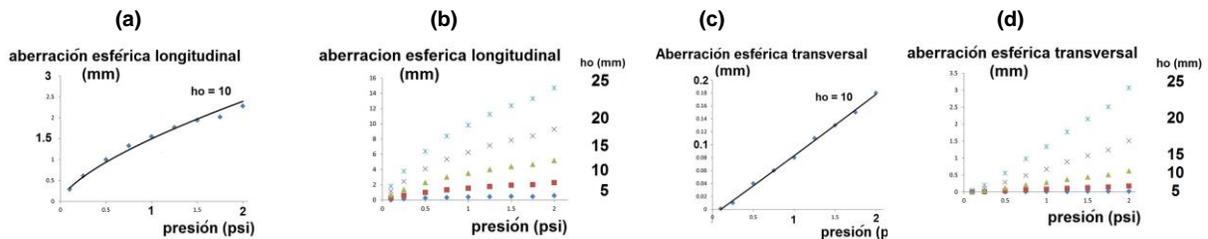


Figura 6. Gráfica aberración esférica longitudinal vs presión para (a) una y (b) varias alturas de incidencia de los rayos colimados, gráfica aberración esférica transversal vs presión para (c) una y (d) varias alturas de incidencia de los rayos colimados.

Las aberraciones esféricas longitudinal y transversal aumentan de manera no lineal con la curvatura para una altura h_o del rayo de incidencia y aumentan con el incremento de altura de los rayos incidentes.

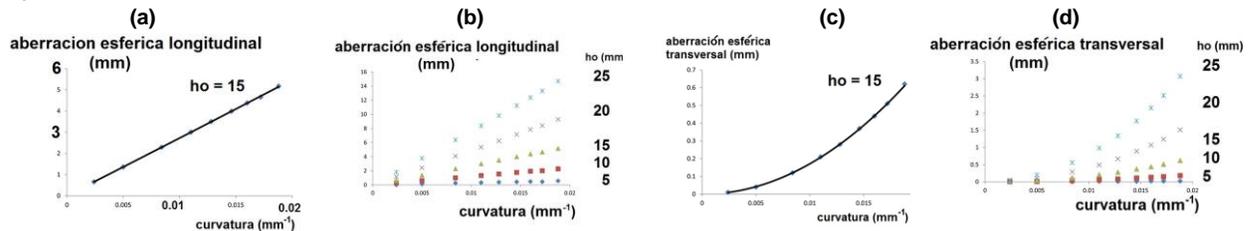


Figura 7. Gráfica aberración esférica longitudinal vs curvatura para (a) una y (b) varias alturas de incidencia de los rayos colimados, gráfica aberración esférica transversal vs curvatura para (c) una y (d) varias alturas de incidencia de los rayos colimados.



En el programa OSLO se realizó el trazo de rayos colimados y paralelos al eje óptico comprobándose la distancia focal del sistema para cada valor de presión y se encontró una gran dispersión de puntos alrededor del círculo de Airy.

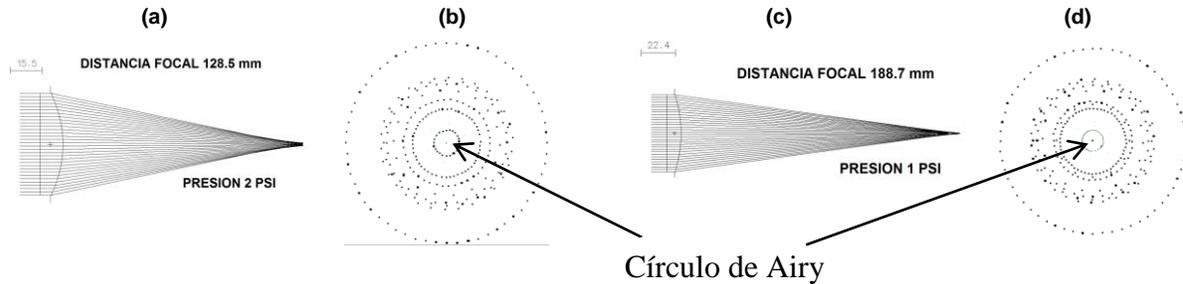


Figura 8. Trazo de rayos colimados paralelos al eje óptico en la superficie plana de la lente líquida. Se muestra una gran dispersión de puntos alrededor del círculo de Airy. (a) membrana sometida a presión de 2 psi. (b) membrana sometida a presión de 1 psi

4. CONCLUSIONES.

El perfil meridional de la membrana de espesor variable a diferentes valores de presión de la lente, toma forma parabólica. El comportamiento óptico de la membrana de espesor variable es similar al comportamiento de la membrana de espesor constante cuando se iguala el índice de refracción del líquido al de la membrana.

Con el aumento de la presión (para una misma altura ho de incidencia del rayo):

Aumenta la curvatura, aumenta la potencia de la lente, aumenta la aberración esférica longitudinal y aumenta la aberración esférica transversal.

Disminuye el radio de curvatura y disminuye la distancia focal.

Las aberraciones esféricas de la lente líquida de espesor variable presentada en este trabajo son grandes.

1. D. Shawn, T.E Sun "Optical properties of variable focus liquid filled optical lenses with different membrane shapes", Optical Engineering 46(2), 024002 (February 2007)
2. Born M., Wolf E. "Principles of optics" (The Macmillan Company, New York 1964), Chapter 3, pp. 109-132.