

Fabricación de microlentes cilíndricas con perfil hiperbólico

Alma A. Camacho P.¹ y Cristina Solano²

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

Loma del bosque No. 115, Col. Lomas del Campestre León, Gto., Mexico

email: ¹alma@andromeda.cio.mx; ²csolano@foton.cio.mx

Recibido el 18 de enero de 1999; aceptado el 26 de agosto de 1999

El presente trabajo presenta el proceso de fabricación y caracterización de microlentes cilíndricas con perfil hiperbólico. Estas microlentes fueron fabricadas a partir de una preforma estirada utilizando los métodos de fabricación de las fibras ópticas. Las microlentes fabricadas tienen superficies refractoras hiperbólicas con un diámetro de $100\ \mu\text{m}$. Para evaluar la calidad de las lentes se midieron las superficies de la preforma y la microlente resultante comparándolas con las del diseño original. La mayor diferencia entre estas superficies y la original fue de $8\ \mu\text{m}$.

Descriptores: Técnicas de taller óptico; fabricación, recubrimiento y empalmes de fibras ópticas

A manufacturing method of microlenses obtain from a preform by the drawing technique is described. The experimental results are compared with the theoretical shape of the original design with a maximum difference between them was $8\ \mu\text{m}$. The resultant microlenses have hyperbolic refractive surfaces, and a diameter of $100\ \mu\text{m}$.

Keywords: Optical workshop techniques; fabrication, cladding and splicing fiber optics

PACS: 42.86.+b; 42.81.Bm; 42.79.-e

1. Introducción

El desarrollo de los láseres de diodo y la óptica integrada han incrementado el interés en las lentes cilíndricas de alto desempeño que se utilizan para acoplar la luz dentro y fuera de estos dispositivos. Estas lentes son necesarias para colimar el eje rápido de la luz emitida por los láseres de diodo o para acoplar eficientemente la luz dentro de la óptica integrada y otros dispositivos con aberturas de rendija. Las lentes deben ser al menos tan rápidas como el dispositivo (en los láseres de diodo la apertura numérica, A.N. ≈ 0.6) y preferentemente deberán estar limitadas por difracción. Sin embargo, las lentes cilíndricas rápidas bien corregidas no son productos que se fabrican a gran escala, o bien tienen dimensiones grandes comparadas con las de la óptica integrada y su costo es elevado. La óptica microscópica [1] tiene entre sus ventajas la posibilidad de colocarse muy cerca del dispositivo óptico integrado, estabilidad, conveniencia y potencialmente un costo menor que el de las lentes macroscópicas, particularmente cuando se contempla su producción a gran escala.

El problema principal de fabricación de las microlentes es que las técnicas tradicionales son difíciles de utilizar, por lo que se han buscado métodos alternativos. Entre las técnicas disponibles están el uso de vidrios fotosensibles, vidrios de índice graduado y óptica difractiva generada por computador o kinoformas [2].

En este trabajo se presenta el proceso de fabricación de microlentes con perfil hiperbólico de dimensiones transversales del orden de $0.20\ \text{mm}$ y distancia focal efectiva del orden de $0.09\ \text{mm}$. Las microlentes se obtuvieron a partir de una preforma que se estiró utilizando el método de fabricación de

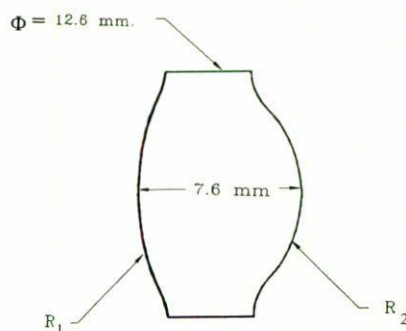


FIGURA 1. Sección transversal de la preforma cilíndrica.

las fibras ópticas [3]. Esta lente cilíndrica se diseñó para colimar la luz emitida por un conjunto de barras de láser de diodo (con A.N. ≈ 0.6) en una fibra óptica. Para evaluar los resultados experimentales se compararon las superficies resultantes de las preformas y microlentes con las especificadas en el diseño.

En la sección transversal del diseño propuesto [4], mostrada en la Fig. 1, las superficies deben tener forma de elipsoide, parabólica o hiperboloide para compensar la aberración esférica en el eje [5]. La forma de estas superficies es importante también en el momento de estirar la preforma en la torre de extensión, ya que de esta manera es posible compensar los esfuerzos mecánicos y conservar la forma que se desea obtener.

La Tabla I muestra los parámetros del diseño de la microlente y los valores de la preforma. El factor de escala se calculó de acuerdo a la experiencia en los procesos de estirado de fibras ópticas [6].

TABLA I. Parámetros del diseño [4] para la microlente y la preforma.

Nombre del parámetro	Microlente	Preforma
Radio de curvatura para la superficie 1.	0.21 mm	13.15 mm
Constante de conicidad para R_1 (K_1)	-13.79	-13.79
Radio de curvatura para la superficie 2.	-0.09 mm	-5.54 mm
Constante de conicidad para R_2 (K_2)	-1.83	-1.83
Índice de refracción, vidrio LASFN-09	1.84	1.84
Distancia focal efectiva	0.09 mm	5.54 mm
Foco posterior	0.33 mm	21.34 mm
Espesor	0.10 mm	6.32 mm
Distancia entre el objeto y la primera superficie de la lente	0.07 mm	4.54 mm
Distancia imagen	0.33 mm	21.13 mm
Distancia imagen-objeto.	0.50 mm	31.92 mm
Amplificación transversal.	-3.03 mm	-193.42 mm
Altura del objeto.	0.01 mm	0.32 mm
Abertura numérica	0.64	0.64
Altura de la lente	0.19 mm	12.00 mm
# f	0.78	0.78

2. Procedimiento para la fabricación de preformas

Para la fabricación de las preformas (con vidrio LASFN-09) [7] y las herramientas necesarias (fabricadas con vidrio BK-7) [7] se cortaron bloques de vidrio con una sierra circular [8]. Para verificar la planicidad y el escuadrado de estos bloques se utilizó la máquina generadora de planos ópticos [9]. Las dimensiones finales de los bloques fueron: ancho 12.6 mm \times espesor 9.0 mm \times longitud 250 mm, con una incertidumbre de ± 0.05 .

Para realizar las preformas fue necesario fabricar también varios aditamentos mecánicos que se utilizaron en todos los procesos de fabricación, desde la generación de los bloques de vidrio hasta el esmerilado de las preformas. Éstos fueron:

- Placa de acero rectificada, empleada para rectificar las dos primeras caras de los bloques de vidrio y rebajarlos al espesor requerido.
- Herramienta para escuadrar los bloques de vidrio. La Fig. 2 muestra la colocación del bloque en esta herramienta así como sus dimensiones.
- Herramienta de aluminio con canales presentando sus paredes con ángulos de 30° , ver Fig. 3a. La finalidad de esta herramienta es la de eliminar el exceso de material en los bordes de los bloques de vidrio. La Fig. 3b muestra la colocación del bloque de vidrio en esta herramienta.

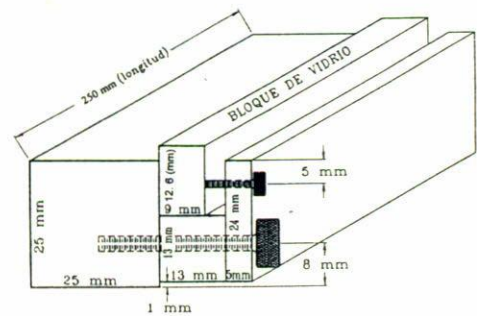


FIGURA 2. Herramienta fabricada para escuadrar el bloque de vidrio de donde se obtiene la preforma.

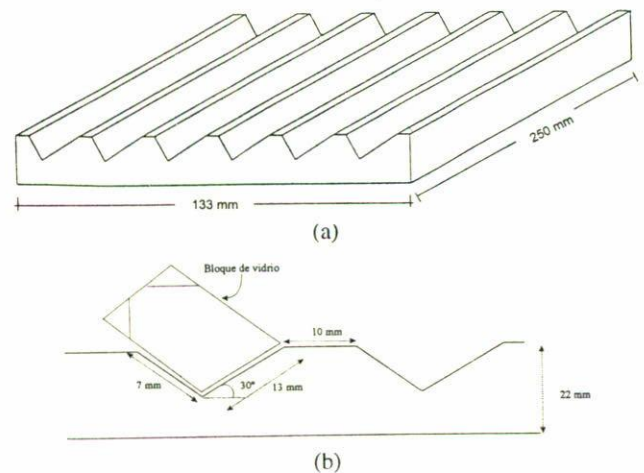


FIGURA 3. a) Herramienta utilizada para eliminar el exceso de material de los bordes de los bloques de vidrio. b) Colocación del bloque de vidrio en la herramienta (a).

- Sujetador metálico-óptico- de la preforma utilizada para el generado óptico en la sierra [8]. Este sujetador está constituido por una barra de acero y barra sostenedora fabricada con vidrio BK-7, como se muestra en la Fig. 4.
- Para realizar el esmerilado de las preformas, fue necesaria la fabricación de guías de acero, (Fig. 5). El objetivo de estas guías es el de mejorar el acoplamiento entre la preforma y la herramienta de esmerilado fabricada con vidrio BK-7.
- Herramientas fabricadas con vidrio BK-7 para el esmerilado y pulido de la preforma, soporte y auxiliar para su alineación.

2.1. Herramientas con película de diamante

La fabricación de superficies ópticas utilizando el método de "torneado con diamante" es relativamente nueva comparada con los métodos tradicionales de pulido óptico. En términos de geometría y movimientos que se requieren, el proceso de torneado con diamante es similar a la etapa de generación utilizada en los métodos en la fabricación óptica tradicional.

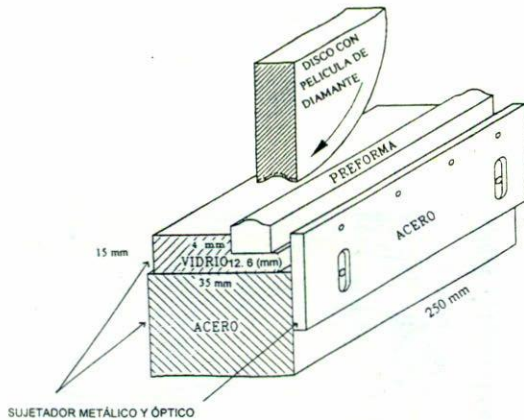


FIGURA 4. Sujetador metálico para generar la primera cara de las preformas y la herramienta con película de diamante.

Entre las ventajas del torneado con diamante están [10–12]: reducción de tiempo de operación, mejor acabado en la superficie, capacidad para producir superficies ópticas de calidad en todo el área del elemento, fabricación de materiales dúctiles difíciles de pulir, eliminación del alineamiento en algunos sistemas y para la fabricación de formas difíciles de realizar por otros métodos.

Durante el proceso de fabricación de la preforma, se realizaron varias pruebas utilizando herramientas de diamante, sin embargo debido a las características de tamaño y forma de las superficies, los mejores resultados se obtuvieron generando las superficies con la herramienta de diamante y realizando el proceso de esmerilado y pulido en forma tradicional.

En primer lugar fue necesario fabricar la herramienta de generado torneándola en una máquina de control numérico, ésta tiene la forma de un disco donde su superficie lateral coincide con las dimensiones del alto de la lente que se va a generar. Esta máquina se programó para cortar la forma de la superficie de la preforma sobre la superficie de la herramienta, como se observa en la Fig. 4. Posteriormente, se depositó una capa delgada de diamante con un espesor aproximado de 0.25 mm sobre la superficie de la herramienta.

Para el generado de las preformas y de las herramientas de esmerilado se requirió emplear herramientas con película de diamante, utilizando vidrio BK-7:

- Herramienta cóncava para la superficie R_1 (lente).
- Herramienta convexa para la superficie R_1 .
- Herramienta cóncava para la superficie R_2 (lente).
- Herramienta convexa para la superficie R_2 .

La Fig. 4 muestra la colocación de la herramienta de diamante para realizar el generado de la preforma. Uno de los factores fundamentales en este proceso de generado es la alineación del bloque de vidrio, para este efecto se utilizó la pieza auxiliar de alineación sobre la barra sostenedora sujetándola con tornillos. Esta barra se centró utilizando la rueda de película de diamante para generar así el radio respectivo.

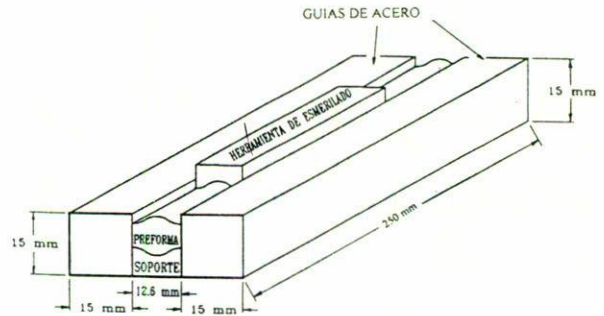


FIGURA 5. Guías de acero para realizar el esmerilado de la preforma.

2.2. Procedimientos de esmerilado y pulido de la preforma

Para efectuar el proceso de esmerilado se utilizaron las herramientas convexas mencionadas en la sección anterior. Durante este proceso se observó que es muy importante conservar el giro de la herramienta de esmerilado así como el de la preforma para mantener el mismo espesor a lo largo del elemento óptico.

Se utilizaron tres tipos diferentes de esmeriles con diferentes denominaciones. En primer lugar el WCA 25 μm (white calcined aluminum oxide), posteriormente el WCA 15 μm rebajando 0.08 mm del grosor. El esmerilado final se realizó con WCA 5 μm conservando la rotación de la herramienta y rebajando 0.04 mm. Después de esmerilar y pulir la primera cara, se procedió a trabajar la segunda, adhiriendo la cara pulida de la preforma sobre una herramienta óptica cóncava de esmerilado, asegurándose que no se formara una cuña entre las dos superficies.

El espesor de la preforma esmerilada fue de 7.62 ± 0.01 mm. Es importante notar que al finalizar este proceso el espesor resultante debe de ser mayor al especificado en la Tabla I, debido a que falta aun el proceso de pulido y repetir este proceso para la superficie R_2 .

Para pulir las superficies se utilizaron las mismas herramientas ópticas que en el proceso de generado. La breca o asfalto (PITCH) utilizado fue: Pitch de pulido semi-duro # 450 cuyo punto de fusión es de 68.3°C (155°F) esta es una fórmula universal lista para usarse [13].

Observamos que es difícil pulir la superficie R_2 con una sola herramienta que es necesario realizar este procedimiento en tres pasos. La breca o asfalto (PITCH) pulió gran parte de la cima, el poliuretano las orillas y la última parte fue la pequeña parte cóncava usando un método prácticamente artesanal que consistió de pulir con un parche empujándolo con la uña.

Cuando se terminó de esmerilar y pulir ambas caras de la preforma, ésta se limpió escrupulosamente y estuvo lista para ser estirada.

TABLA II. Valores experimentales obtenidos de la preforma.

Preforma	R_1 (mm)	K_1 (mm)	R_2 (mm)	K_2 (mm)
LASF-N-09 (pulida)	15.52 ± 0.01	-4.80 ± 3.42	-4.13 ± 0.01	-1.77 ± 0.14

3. Fabricación de las microlentes

El vidrio utilizado para la fabricación de la preformas es el LASF-N-09 de la marca Schott [7], con índice de refracción $n_c = 1.8425$ para $\lambda = 656.3$ nm, tiene las características adecuadas de viscosidad y temperatura para lograr el estiramiento de la fibra. La viscosidad y temperatura de transición son propiedades térmicas y mecánicas de los vidrios que intervienen para lograr el estiramiento de las preformas [3]. Experimentalmente se determinó el intervalo de temperatura para obtener una viscosidad adecuada para estirar la preforma entre 750–760°C. En este caso no fue posible obtener un valor numérico de la viscosidad.

Las microlentes cilíndricas se obtuvieron con el mismo procedimiento de estirado de las preformas que se utiliza para fabricar fibras ópticas.

El proceso de formación de la fibra (microlente) consiste en calentar la preforma a una temperatura tal que pueda estirarse. La fibra resultante se enrolla en un tambor. En este proceso es necesario evitar daños en la superficie de la fibra que pueden reducir considerablemente la resistencia mecánica (tracción). Estos daños pueden provocarse al contacto con un medio abrasivo (superficie del tambor), por lo que es importante recubrirlo con un revestimiento protector.

Es necesario que la fibra tenga dimensiones bien definidas y constantes al término del proceso de estirado. Las dimensiones finales de la fibra dependen tanto de la temperatura de formación como de la tracción aplicada a la fibra [2, 14].

En la fibra obtenida de la preforma se cortaron diversas secciones: al inicio, en la parte intermedia y al final de la fibra resultante. Se rectificaron las superficies transversales de diez microlentes para dar uniformidad a las superficies. Posteriormente se esmerilaron estas superficies con diferentes tamaños de grano: 25, 9 y 5 μm , por un período de doce y media horas. Finalmente se utilizó la técnica de pulido de conectores, la cual se hace en dos o más pasos con pulidores cada vez más finos típicamente de 1 μm ó 0.3 μm [15]. Este proceso se verificó continuamente con un microscopio. La Fig. 6 muestra la sección transversal de una de las microlentes obtenidas.

4. Evaluación de las superficies obtenidas

4.1. Medición de las superficies de las preformas

Debido al tamaño de las microlentes no es posible utilizar los métodos tradicionales para la medición de distancias focales. Sin embargo, con el fin de evaluar los resultados obtenidos se realizaron varias mediciones en las superficies de las preformas y de las microlentes para comparar su forma con las del diseño original.

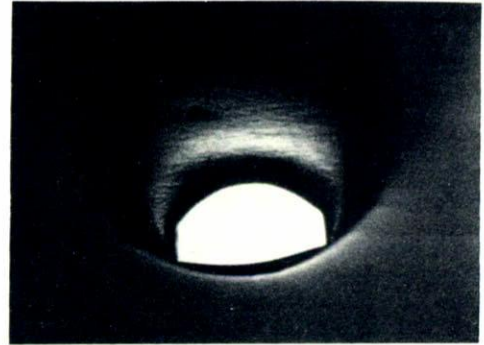


FIGURA 6. Microfotografía de la sección transversal de la microlente.

En el caso de las preformas estas mediciones se realizaron empleando la máquina de medición de coordenadas (MMC) [16, 17] en diferentes puntos de sus superficies, (Fig. 7a). La resolución de esta máquina es de $3 \pm 0.75 \mu\text{m}$ [18]. El ajuste de datos se llevó a cabo por medio del programa GNUPLOT [19], éste es un programa gráfico iterativo que utiliza el ajuste de mínimos cuadrados no lineales [20]. Los datos obtenidos se escalaron a las dimensiones que deberá tener la microlente resultante después del proceso de estirado de la preforma. Estos resultados se muestran en las Figs. 7b y 7c, para las superficies R_1 y R_2 respectivamente. En la Fig. 7b, correspondiente a la superficie R_1 observamos que los resultados experimentales se ajustan muy bien a la curva teórica. Sin embargo para R_2 , corresponden solamente en la región paraxial.

De los valores experimentales se obtuvieron también los valores del radio de curvatura (R) y de la constante de conicidad (K) para cada superficie de las preformas fabricadas. Los valores promedio se muestran en la Tabla II.

En esta tabla podemos observar que los valores del radio de curvatura son del mismo orden de magnitud sin embargo las constantes de conicidad aunque se trata de hipérbolas, su magnitud difiere considerablemente. Con el fin de estudiar estas diferencias entre estos valores y los especificados en el diseño se realizaron las gráficas teóricas de las Figs. 8a y 8b.

La Fig. 8a muestra las gráficas de diferentes curvas con el mismo radio de curvatura y constante de conicidad diferente. De acuerdo con estos resultados podemos observar que todas las curvas coinciden en la parte central, que en óptica es la región paraxial. Sin embargo al variar los radios de curvatura para una constante de conicidad dada, Fig. 6b, observamos que la forma de las curvas difiere considerablemente.

De estas figuras podemos concluir que las diferencias entre los valores experimentales y los teóricos observadas en la Fig. 7c se deben a las diferencias en la constante de conicidad

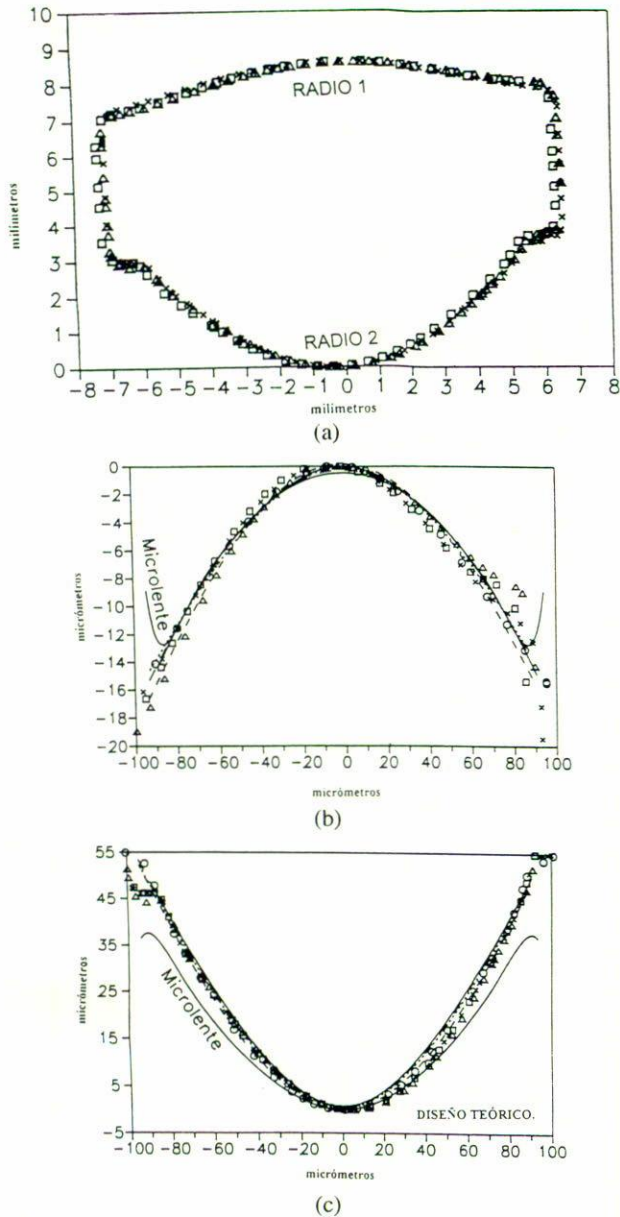


FIGURA 7. a) Puntos de la preforma donde se realizaron las mediciones. Comparación de los datos teóricos (línea sólida) con los experimentales escalados a las dimensiones de la microlente para (b) superficie R_1 y (c) superficie R_2 .

obtenida. En este caso podemos esperar que al menos la parte paraxial de la preforma se comporta de acuerdo a los datos del diseño original.

Para determinar si los errores obtenidos en la preforma se debieron a diferencias en las herramientas, se analizó el error de las herramientas con película de diamante utilizadas para generar las curvaturas de las preformas. Este análisis se realizó en diez muestras de vidrio diferentes obteniéndose resultados similares. De los resultados obtenidos es posible concluir que el error presentado en las superficies podría atribuirse a un error de alineación en el proceso de fabricación de la preforma.

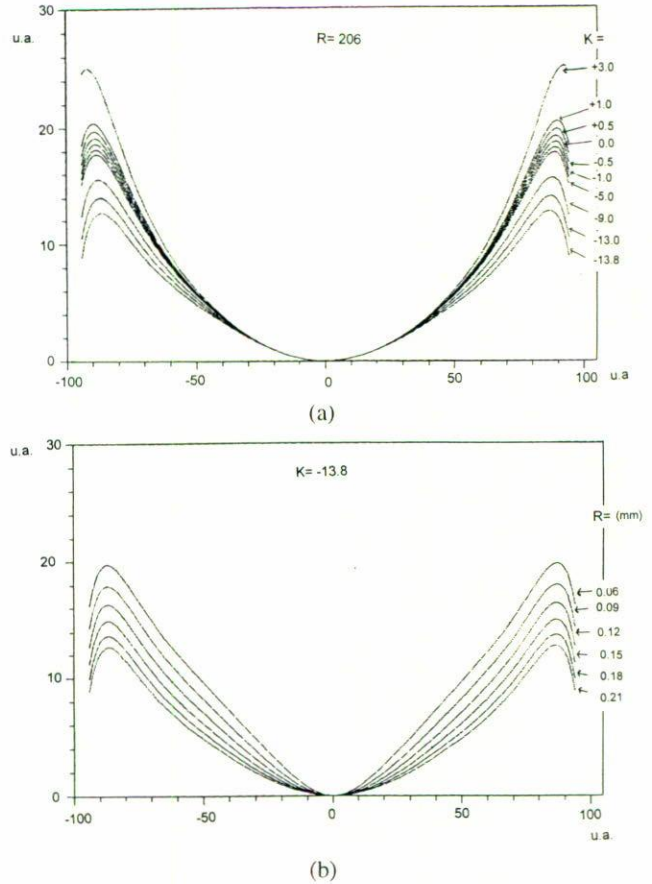


FIGURA 8. Modificación de la forma de la curva cuando a) El radio de curvatura se mantiene constante, $r = 0.21$ mm y diferentes valores para K . b) La constante de conicidad $K = -13.8$ y diferentes radios de curvatura.(u.a.= unidades arbitrarias.)

4.2. Caracterización de las microlentes obtenidas

Para medir la sección transversal de las microlentes se digitalizó la imagen observada en el microscopio, Fig. 6. Las coordenadas correspondientes se obtuvieron con el programa Autocad [21]. El análisis de los datos experimentales se efectuó de la misma manera que en el caso de las preformas.

Las Figs. 9a y 9b, muestran la gráfica de ajuste de datos de las superficies R_1 y R_2 con respecto a la curva teórica para esta microlente.

Es posible observar que al comparar la forma de la superficie R_1 de la preforma con respecto a la superficie R_1 del diseño el error o la separación máxima entre una y otra es de un micrómetro. Correlacionando la superficie R_2 de la preforma con respecto a la superficie R_2 del diseño el error o la separación máxima entre una y otra es de ocho micrómetros. De la misma manera se compararon el diseño de la microlente con respecto a la microlente fabricada el error en la superficie R_1 es $(1.2 \mu\text{m})$ sin embargo en la superficie R_2 el error es $6.5 \mu\text{m}$. De esta forma podemos ver que la microlente conservó la forma de la preforma. Como se señaló anteriormente se determinó como una de las principales fuentes de error a

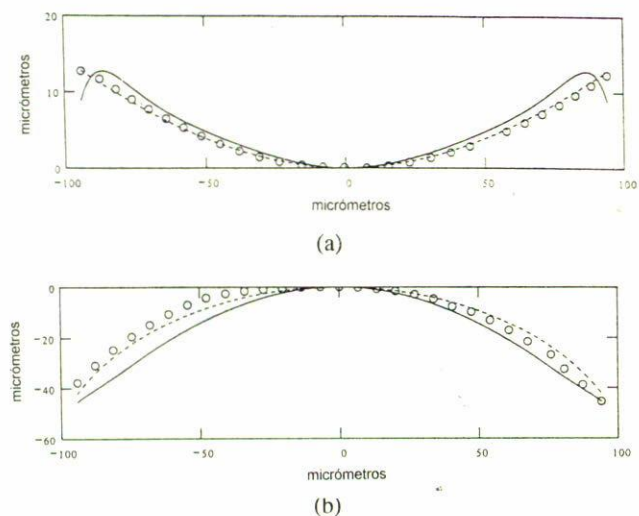


FIGURA 9. Comparación de los datos teóricos (—) con los experimentales (o) para el caso de la microlente para (a) superficie R_1 y (b) superficie R_2 . (- -) Gráfica del ajuste.

la alineación de las herramientas de generado. Sin embargo debido a que las superficies esféricas tienen un grado de dificultad mayor que las esféricas con respecto a la fabricación y principalmente la forma y tamaño de la preforma fabricada se considera que los resultados son satisfactorios.

Es necesario señalar que es importante también medir los parámetros de la microlente resultante pero debido a las di-

mensiones de estos elementos no es posible utilizar las técnicas tradicionales. Actualmente nos encontramos desarrollando una técnica indirecta para medir la distancia focal y determinar así la abertura numérica de estos elementos.

5. Conclusiones

En este trabajo se describió el proceso de fabricación de las preformas para la obtención de microlentes cilíndricas. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible afirmar que se cumplió el objetivo del trabajo. Sin embargo es necesario puntualizar que podrían explorarse diferentes técnicas para la optimización del proceso descrito. Entre estas está la búsqueda de materiales más eficientes para obtener el pulido de las superficies. Más aún es necesario realizar pruebas para determinar si la calidad de la fibra estirada es satisfactoria eliminando completamente el proceso de pulido de la preforma.

6. Agradecimientos

Agradecemos extensivamente la colaboración en este trabajo al personal técnico del taller óptico, especialmente a Ragnar Jacobsen, Alfredo Hernández Vilches y José de la Luz Hurtado Ortega. Así también al personal del Instituto de Física, en especial al Dr. José Socorro García Díaz y M. C. José Bibiano Varela. Trabajo apoyado parcialmente con el proyecto de CONACyT 4196P-A.

- M. Abitbol and N. Eisenberg, *SPIE Proc., Current Developments in Optical Engineering IV* **1334** (1990) 110.
- J.J. Snyder, Reichert Patrick, and M.T. Baer, *Appl. Opt.* **30** (1991) 2743.
- A.A. Camacho P. y C. Solano, *Fabricación y Caracterización de Microlentes Cilíndricas con Perfil Hiperbólico*, Reporte Técnico, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., CIO, (1999).
- L. Zenteno S., (comunicación personal) (1996).
- A.A. Camacho P. y C. Solano, *Rev. Mex. Fís.* **45** (1999) 315.
- A.A. Camacho P., *Descripción Del Diseño De La Microlente*, Reporte Técnico, Centro de Investigaciones en Óptica, CIO, (1998).
- Schott OPTICAL GLASS, Throughout the world of Quality optics*, (Glass Technologies Inc., New York, 1989).
- Sierra circular, marca Strasbaugh, modelo 100.
- Máquina generadora de planos ópticos, LOH, Spheromatic Plano for generating plano surfaces, (LOH Optikmaschinen KG, Germantown, WI, USA,) p. 6.
- M. Bass, (Ed), *Handbook of Optics*, Optical Society of America; 2nd Edition, *Devices, Measurements & Properties II*, (1995) Sect. 7.1.
- Karow H. Hank, *Fabrication Methods for Precision Optics*, (Wiley-Interscience Publication, New York, 1993) Sect. 4.3.
- Parks E. Robert, *Non Traditional Optical Fabrication Methods*, Univ. of Arizona, Short Course Notes, SPIE, 1990. Annual International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science & Engineering, San Diego, California, USA, (1990).
- Universal Photonics, INC, *Advanced Surficing Products and Technology*, Diamond Products, Diamond Wheels, p. 47.
- Nérou Jean Pierre, *Introducción a Las Telecomunicaciones por Fibras ópticas*, (Ed. Trillas, México, DF., 1991).
- D.J. Sterling, Jr., *Technicians Guide to Fiber Optics*, (Delmal Publishers, Inc, New York, 1987).
- Máquina para la Medición de Coordenadas*, Carl ZEISS Inc IMT División modelo SYS DCC, C400 1518-12 Part # 126-6275, Serial # CMM940102121
- Centro Nacional de Metrología (CENAM), *Máquinas de Medición por Coordenadas*. Curso. (1995)
- Zeiss Carl Inc, *U-SOFT User's Guide IMT Division*, (1992).
- Williams Thomas and Kelley Colin *GNU PLOT, An Interactive Plotting Program*, 1993.
- R.P. Bevington and D.K. Robinson, *Data Reduction Error Analysis for the Physical Science*, (Mc. Graw Hill, New York, 1992).
- Autocad user's*, Release 13c4, (1996).