



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

**NUEVOS MÉTODOS
EXPERIMENTALES PARA MEDIR
INDIRECTAMENTE LA DISTANCIA
FOCAL DE LENTES**

TESIS QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS (ÓPTICA) PRESENTA

ING. ALMA ADRIANA CAMACHO PÉREZ

ASESOR: DRA. CRISTINA ELIZABETH SOLANO SOSA

LEÓN, GTO.

JULIO 2002

AGRADECIMIENTOS

Deseo externar mi agradecimiento a las siguientes personas por su apoyo y ayuda.

A la Dra. Cristina Solano, mi asesora, por sus enseñanzas y sus palabras de aliento en todo momento.

A los Dres. Daniel Malacara Hernández, Dr. Manuel Servín G. Y Dr. Zacarías Malacara Hernández por su apoyo incondicional.

Al Dr. Geminiano Martínez Ponce y a la candidata a Dra. Rosario Baltazar F., por haberme permitido colaborar y aprender con ellos.

De igual manera al Prof. Orestes N. Stavroudis y Alfredo Hernández Vilches por sus comentarios y observaciones en la elaboración de este trabajo.

Al Conacyt (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) proyecto #4196P #33793-E y Concyteg (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del estado de Guanajuato) proyecto #01-04-203-056 por el apoyo económico brindado.

Al equipo de trabajo que conforma la dirección de Formación Académica del CIO, por su confianza, motivación y ayuda en todo momento.

En especial a todos aquellos que han sido mis compañeros y amigos, y que me han motivado para concluir esta anhelada meta. Gracias a todos.

RESUMEN

El objetivo fundamental de nuestro trabajo de investigación fue proponer un método para medir la distancia focal de microlentes con radios de curvatura grandes.

En el primer capítulo del presente trabajo se reportan las consideraciones preliminares para la medición de la distancia focal de microlentes. Se analiza la caracterización de preformas cilíndricas con perfil hiperbólico en vidrio óptico, de estas preformas se hicieron microlentes con perfil hiperbólico de buena calidad utilizando tecnología de estirado de fibra óptica del Centro de Investigaciones en Optica A.C. Este fue nuestro punto de partida, pues el objetivo fundamental de este trabajo doctoral fue el caracterizar las microlentes, del cual dio como resultado dos métodos para calcular la distancia focal de este tipo de componentes ópticas, que pueden generalizarse para lentes de cualquier tamaño.

Estos métodos se analizan en el capítulo 2, donde se describe un método indirecto para medir la distancia focal de microlentes que permita la determinación de la distancia focal utilizando un arreglo experimental simple.

En el capítulo 3 se reporta un método simple para medir la distancia focal de lentes de cualquier tamaño.

Finalmente en el capítulo 4 se mencionan las conclusiones y el trabajo a futuro.

Alma Adriana Camacho Pérez.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA obtenida durante la estancia en el CIO.

- **Artículos aceptados en revistas científicas con arbitraje resultado de la investigación doctoral.**

1. **Alma A. Camacho P.**, Cristina Solano, Moisés Cywiak, Geminiano Martínez Ponce y Rosario Baltazar, "*Method for the determination of the focal length of a microlens*" Opt. Eng. **39 (8)** 2149 – 2152 (2000).
2. **Alma A. Camacho P.**, Cristina Solano, Geminiano Martínez-Ponce y Rosario Baltazar, "A Simple Method to Measure the Focal Length of Lenses" Opt. Eng. (2002)
3. **Alma A. Camacho P.** y Cristina Solano, "*Superficies Asféricas aplicadas a la óptica*", Rev. Mex. Fís. **45(3)**, 315 - 321 (1999).
4. **Alma A. Camacho P.** y Cristina Solano, "*Fabricación de microlentes cilíndricas con perfil hiperbólico*", Rev. Mex. Fís. **45(3)** 569 – 574 (1999).

- **Artículos in – extenso resultado de la investigación doctoral.**

1. **Alma A. Camacho P.**, Cristina Solano, Moisés Cywiak, Geminiano Martínez Ponce y Rosario Baltazar, "*Medición de la Distancia Focal en Microlentes Cilíndricas con Perfil Hiperbólico*", Memorias del VI Simposio de Inv. y Des. Tec., Ags., Ags. (1999)
2. **Alma A. Camacho P.**, Cristina Solano, Moisés Cywiak, Geminiano Martínez Ponce y Rosario Baltazar, "*Evaluation Criteria on Measurement of Focal Length* ", Memorias del Simposium Interno XX Aniversario CIO (1999)
3. **A. A. Camacho**, Cristina Solano, G. Martínez Ponce y R. Baltazar, "*Criterio de Evaluación de Medición de la Distancia Focal en Microlentes*", Memorias del VII Simposio de Inv. y Des. Tec., Ags., Ags. (2000).

- **Otros artículos aceptados en revistas científicas con arbitraje.**

1. C. Solano, M. Cywiak, R. Baltazar, **A.A. Camacho P.** y G. Martínez – Ponce. *“Análisis y Medición de objetos especulares por métodos heterodinos”* Comp. Y Sist., aceptado 2001.
2. R. Baltazar, C. Solano, G. Martínez-Ponce y **A.A. Camacho P.**, “Optical heterodyne profilometer to scan irregularities in reflective objects”, Opt. Comm. (2001).

- **Otros artículos in-extenso**

1. R. Baltazar, C. Solano, y **A.A. Camacho P.** *“Sistema de medición de irregularidades superficiales incorporando una señal temporal”*, Memorias del VI Simposio de Inv. y Des. Tec., Ags. Ags. (1999).
2. R. Baltazar, C. Solano, M. A. Casillas y **A.A. Camacho P.** *“Automatización de un Sistema Heterodino de Medición de Irregularidades Superficiales”*, Memorias del VI Simposio de Inv. y Des. Tec., Ags. Ags. (2000).
3. C. Solano, M. Cywiak, R. Baltazar, **A.A. Camacho P.** y G. Martínez – Ponce. *“Análisis y Medición de objetos especulares por métodos heterodinos”* Memorias del Congreso de Responsables de Proyectos de Investigación en Ingeniería Eléctrica, Ciencias de la Computación y Matemáticas Aplicadas a la Ingeniería, Oax., Oax. (2000)

- **Artículos que serán enviados a revistas científicas con arbitraje en proceso.**

1. **Alma A. Camacho P.**, Cristina Solano, Geminiano Martínez-Ponce y Rosario Baltazar, “Sensitivity and Tolerances of the Method for the determination of the focal length of lens” Opt. Eng. (2002)

2. R. Baltazar, C. Solano, G. Martínez-Ponce y **A.A. Camacho P.**,
“*Optical heterodyne method to measure phase objects*”, Opt. Comm.
(2001).

Lista de Figuras

Capítulo 1

Fig. 1.1 Fotografía de la preforma

Fig. 1.2 (a) Esta gráfica muestra las ocho mediciones que se tomaron a la preforma pulida en LASF-N-09.

Fig. 1.2 (b) Mediciones al radio de curvatura R_1 de la preforma pulida en LASF-N-09. La gráfica está normalizada para compararla con la gráfica del diseño de la microlente.

Fig. 1.2 (c) Mediciones al radio de curvatura R_2 de la preforma pulida en LASF-N-09. La gráfica está normalizada para compararla con la gráfica del diseño de la microlente.

Fig. 1.3 a Variación de la figura en la curvatura al mantener el radio y variar la conicidad.

Fig. 1.3 b Variación de los radios de curvatura para una constante de conicidad dada.

Fig. 1.4 (a) Resultados obtenidos con herramientas con película de diamante para generar R_1 . Las curvas se ajustaron y normalizaron a la escala de la microlente, representada por la línea sólida.

Fig. 1.4 (b) Resultados obtenidos con herramientas con película de diamante para generar la curvatura 2. Esta gráfica muestra curvas ajustadas y normalizadas a la escala de la microlente, representada por la línea sólida.

Fig. 1.5 Microfotografía de la sección transversal de la lente.

Fig. 1.6 a Gráfica que muestra la correlación entre la forma de la superficie R_1 de la microlente del diseño (línea sólida) y la superficie de la microlente fabricada con vidrio LASF-N-09 (círculos) así como también el ajuste de datos con respecto a las curvas anteriores (línea punteada).

Fig. 1.6 b Gráfica que muestra la correlación entre la forma de la superficie R_2 de la microlente del diseño (línea sólida) y la superficie de la microlente fabricada con vidrio LASF-N-09 (círculos) así como también el ajuste de datos con respecto a las curvas anteriores (línea punteada)

Capítulo 2

Fig. 2.1 Diagrama esquemático del arreglo óptico. La microlente está representada por líneas punteadas y representa el caso de cuando la lente se encuentra en la cintura del haz.

Fig. 2.2 Diagrama esquemático del arreglo óptico. La microlente está representada por líneas punteadas y representa el caso de cuando la lente se encuentra en y fuera de la cintura del haz.

Fig. 2.3 Arreglo esquemático del movimiento de rotación.

Fig. 2.4 Gráfica de la Ec. (2.18) en el caso de $f = 5.32 \text{ mm}$, $\theta = 15^\circ$. Se graficó la distancia en el movimiento de rotación $r_1 = \xi$ contra la distribución de amplitud normalizada

Fig. 2.5 Variaciones de la distancia focal (m) con respecto al ángulo de rotación θ (grados).

Fig. 2.6 Arreglo básico para medir la distancia focal. O = obturador, FD= Filtro de densidad, EH = expensor de haz, LM = lente menisco y M= microlente.

Fig. 2.7 Perfil del Láser He -Ne

Fig. 2.8 Sección transversal de la lente cilíndrica. Para la microlente cilíndrica, el diámetro es $208 \mu\text{m}$ y el espesor es $121 \mu\text{m}$. Para la preforma cilíndrica del diámetro = 12.6 mm y el espesor = 7.6 mm .

Capítulo 3

Fig. 3.1 Diagrama del arreglo óptico. La lente con líneas punteadas muestra la translación de la lente.

Fig. 3.2 Diferentes movimientos de translación con la lente (preforma) en posición vertical.

- a) La lente está en la cintura del haz y su desplazamiento se lleva a cabo a lo largo de la dirección z.
- b) La lente está en la cintura del haz y su desplazamiento se realiza a lo largo del eje x.

Fig. 3.3 Esta figura muestra la lente de prueba y el desplazamiento lateral de la mancha imagen (mancha transmitida)

Fig. 3.4 Gráfica que muestra el cambio de los semi-anchos del haz Gaussiano (R_0) para diferentes distancias focales f (m)

Apéndice A

Fig. A.1 Esquema del transformador geométrico. El dibujo muestra la fuente, la cual es una barra de diodo láser, la microlente cilíndrica colecta la luz de la barra del diodo láser y la fibra rectangular el recubrimiento delgado recibe la luz.

Fig. A.2 Diseño y trazo de rayos de la microlente. La escala utilizada fue de 2 cm = 0.05. El tamaño de la fuente es de 10 μm y el de la imagen de 30 μm . AC es la altura de la microlente y BD su espesor.

Fig. A.3 Diseño y trazo de rayos de la microlente cilíndrica obtenido con el programa EIKONAL.

Fig. A.4 Gráfica de la forma teórica de las superficies de la microlente. a) Superficie R_1 y b) Superficie R_2 .

Apéndice B

Fig. B.1 Sección transversal de la lente cilíndrica. Para la microlente cilíndrica, el diámetro es 208 μm y el espesor es 121 μm . Para la preforma cilíndrica el diámetro es 12.6 mm y el espesor es de 7.6 mm.

Fig. B.2 Especificación de los bloques para la Fabricación de Lentes. Estos bloques se utilizaron para herramientas ópticas de esmerilado y pulido. Además sirvieron como soporte y pieza auxiliar de alineación. Los vidrios empleados fueron LASF-N-09, SF-15 y BK-7.

Fig. B.3 Aditamento para escuadrar el bloque de vidrio.

Fig. B.4 a Herramienta de aluminio con canales presentando sus paredes con ángulos de 30 grados (Herramienta de Prismas).

Fig. B.4 b Colocación del bloque de vidrio en la placa de aluminio (herramienta de prismas).

Fig. B.5 Aditamento para sostener y sujetar el bloque de vidrio.

Fig. B.6 a Guías de acero para realizar el esmerilado de la preforma en la superficie R_1 .

Fig. B.6 b Guías de acero para realizar el esmerilado de la preforma en la superficie R_2 .

Fig. B.7 Alineación de la herramienta con película de diamante.

Fig. B.8 Aditamento o accesorio para generar la superficie en la primera cara de la preforma.

Fig. B.9 Torre de extensión

Lista de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Resultados promedio de los parámetros (R,K) al efectuar los ajustes de las ocho mediciones de las superficies de prueba R_1 y R_2 .

Capítulo 3

Tabla 3.1 Comparación de resultados experimentales de la distancia focal de diferentes lentes utilizando el método simplificado de la Ec. (3.5) con los resultados experimentales obtenidos con otros métodos.

Apéndice A

Tabla A.1 Parámetros del diseño de la microlente.

Apéndice B

Tabla B.1 Parámetros principales de la preforma.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	<i>i</i>
RESUMEN	<i>ii</i>
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	<i>iii</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>vi</i>
LISTA DE TABLAS	<i>ix</i>
CONTENIDO	<i>x</i>
CAPITULO 1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES	
Introducción	1
I,1 Evaluación de las superficies obtenidas	
Medición de las superficies de las preformas.....	2
I.2 Caracterización de las microlentes obtenidas.....	10
I.3 Conclusiones.....	12
CAPITULO 2 MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA FOCAL EN MICROLENTE	
Introducción	13
II.1 Teoría	14
II.1.1 La microlente fuera de la cintura del haz.	17
II.1.2 Rotación de la lente.....	20
II.2 Arreglo experimental.....	24
II.3 Métodos alternativos.....	28
II.4 Conclusiones.....	29
CAPITULO 3 MÉTODO SIMPLE PARA MEDIR LA DISTANCIA FOCAL DE LENTES.	
Introducción.....	30
III.1 Teoría	30
III.2 Movimiento de Translación Transversal.....	32
III.3 Resultados experimentales.....	36
III.4 Conclusiones.....	38

CAPITULO 4 CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO

IV.1 Conclusiones Generales	39
IV.2 Trabajo a Futuro	40

APENDICE A CONSIDERACIONES PRELIMINARES PARA LA FABRICACIÓN DE MICROLENTES

Introducción.....	41
A.1 Diseño óptico utilizado.....	42

APENDICE B FABRICACIÓN DE PREFORMAS Y MICROLENTES CILÍNDRICAS CON PERFIL HIPERBÓLICO

Introducción.....	49
B.1 Procedimiento para la fabricación de preformas.....	52
B.1.1 Ruedas o herramientas con película de diamante.....	58
B.2 Procedimientos de esmerilado y pulido de la preforma.....	60
B.3 Fabricación de las Microlentes.....	62
B.4 Conclusiones.....	64

REFERENCIAS	65
--------------------------	-----------

CAPÍTULO 1

CONSIDERACIONES PRELIMINARES

INTRODUCCIÓN

La óptica ha desarrollado un cambio constante en los últimos años, tanto en el tamaño de las componentes como en la complejidad de los sistemas. Las componentes ópticas utilizadas en diversos instrumentos se presentan en diferentes tamaños y formas. Algunas componentes pueden variar desde unos cuantos milímetros hasta algunos cientos de micrómetros. Estos elementos pertenecen a la "MICRO-ÓPTICA", y pueden emplearse en diversas aplicaciones. Éstas componentes manejan un intervalo de valores de distancias focales desde $10\mu\text{m}$ hasta 100 mm y con un diámetro que varía aproximadamente desde $10\mu\text{m}$ a 1 mm [Abitbol, 1990].

En la actualidad, es necesario modificar los métodos de evaluación para caracterizar tanto a las componentes como a los instrumentos ópticos. Y sin lugar a dudas uno de los parámetros iniciales que se miden es la distancia focal. Existen dos definiciones para la distancia focal de un sistema óptico. La distancia focal posterior, definida como la distancia de la última superficie del sistema óptico al punto focal. La segunda definición es la distancia focal efectiva que se define como la distancia entre el plano principal de la lente y el punto focal [Malacara, 1994].

Para medir la distancia focal posterior se puede utilizar un microscopio y un banco óptico o un focómetro (es un instrumento que utiliza un colimador de foco).. Hay varios instrumentos y métodos para medir la distancia focal efectiva por ejemplo el banco nodal (instrumento), la ampliación de imagen, entre otros. Sin embargo estos instrumentos y métodos se aplican únicamente a lentes macroscópicas, pues debido a su tamaño no es posible utilizarlos para lentes microscópicas.

En lo referente a las técnicas de fabricación de microlentes se incluyen el

uso de vidrios fotosensibles, vidrios de índice graduado y óptica difractiva generada por computadora o kinoformas [Snyder, 1991].

Con respecto a los métodos utilizados en la medición de parámetros de microlentes se han propuesto un gran número de métodos [Horst 1994, Sturm 1997, Malacara 1994]. Entre otros requerimientos, estos arreglos experimentales requieren de componentes limitados por difracción.

El objetivo de nuestro trabajo es el caracterizar la distancia focal de las microlentes y macrolentes.

I.1 Evaluación de las superficies obtenidas

Medición de las superficies de las preformas.

A continuación se describe un proceso para obtener microlentes a partir de una preforma de vidrio. Una preforma es una barra cilíndrica que prefigura la geometría de la microlente. Esta barra de corta longitud se coloca en la torre de extensión de fibras y se estira para formar la microlente. La formación de la microlente a partir de la preforma no modifica más que las dimensiones del diámetro y ancho de la lente. Se puede ver entonces, la preforma como una fibra gruesa de corta longitud. (Fig. 1.1). En la descripción de la medición de las superficies de las preformas se aplican las consideraciones preliminares del diseño óptico de la microlente, ver apéndice A.

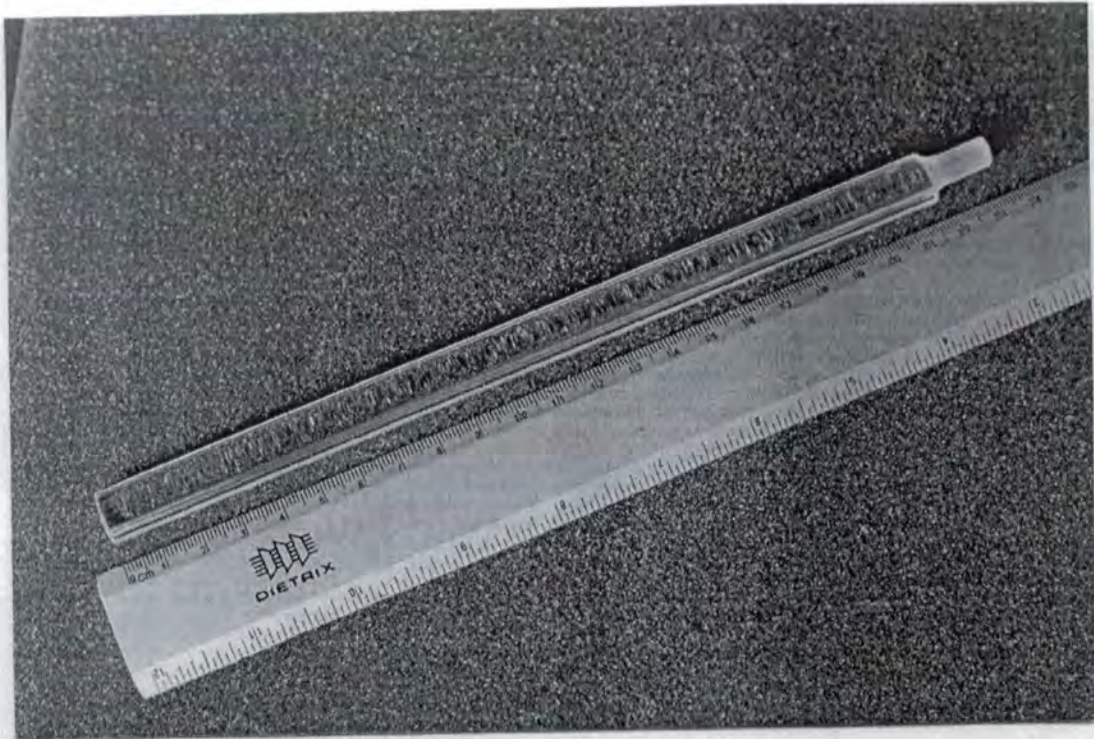


Fig. 1.1 Fotografía de la preforma

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos se realizaron varias mediciones a las superficies de una de las preformas y una de las microlentes para comparar su forma con las del diseño original. En el caso de la preforma estas mediciones se realizaron empleando la máquina de coordenadas (MMC) [Zeiss, Cenam 1995] en diferentes puntos de sus superficies. (Fig. 1.2a).

La resolución de esta máquina es de $3 \pm 0.75 \mu\text{m}$ [Zeiss, 1992]. El ajuste de datos se llevó a cabo por medio del programa GNU PLOT [Williams, 1993]. Este es un programa gráfico iterativo que utiliza el ajuste de mínimos cuadrados no lineales [Bevington, 1992]. Los datos obtenidos se escalaron a las dimensiones que debiera tener la microlente resultante después del procedimiento de estirado de la preforma. Estos resultados se muestran en las Figs. 1.2 (b) y 1.2 (c), para las superficies R_1 y R_2 respectivamente.

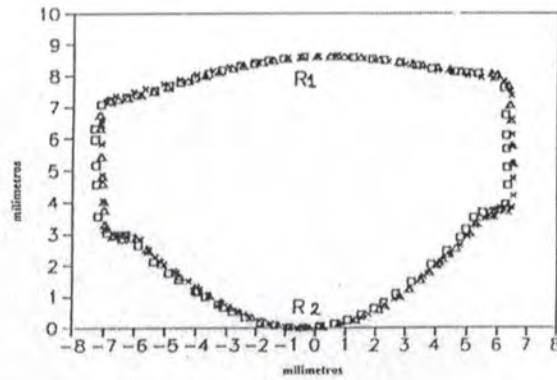


Fig. 1.2 (a) Esta gráfica muestra las ocho mediciones que se tomaron a la preforma pulida en LASF-N-09

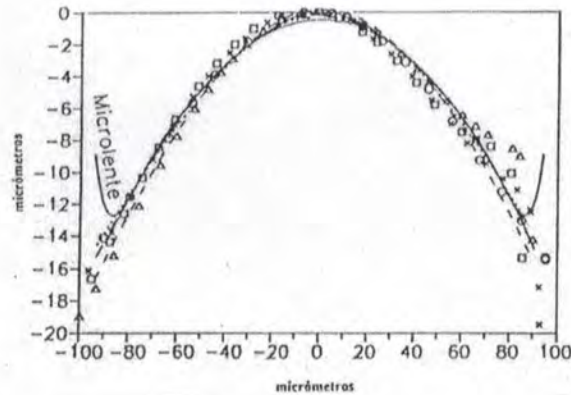


Fig. 1.2 b Mediciones al radio de curvatura R_1 de la preforma pulida en LASF-N-09. La gráfica está normalizada para compararla con la gráfica del diseño de la microlente

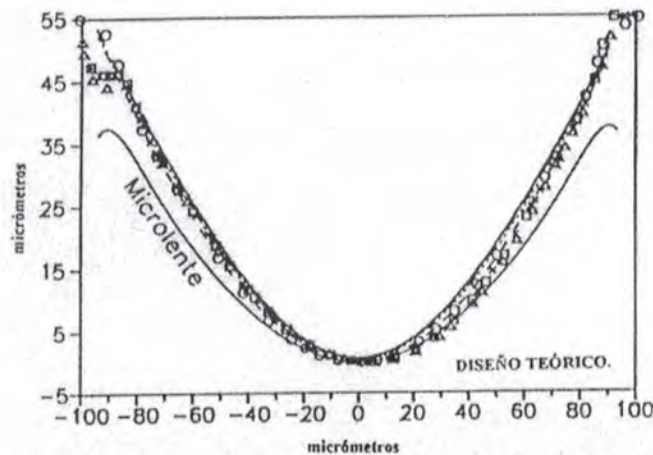


Fig. 1.2 c Mediciones al radio de curvatura R_2 de la preforma pulida en LASF-N-09. La gráfica está normalizada para compararla con la gráfica del diseño de la microlente.

En la Fig. 1.2 b, correspondiente a la superficie R_1 observamos que los resultados experimentales se ajustan muy bien a la curva teórica. Sin embargo, para R_2 , éstos 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 1.1

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

TABLA 1.1 Resultados promedio de los parámetros (R,K) al efectuar los ajustes de las ocho mediciones de las superficies de prueba R_1 y R_2

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 las diferencias entre estos valores y los especificados en el diseño se realizaron las gráficas teóricas de las Figs. 1.3 a y 1.3 b.

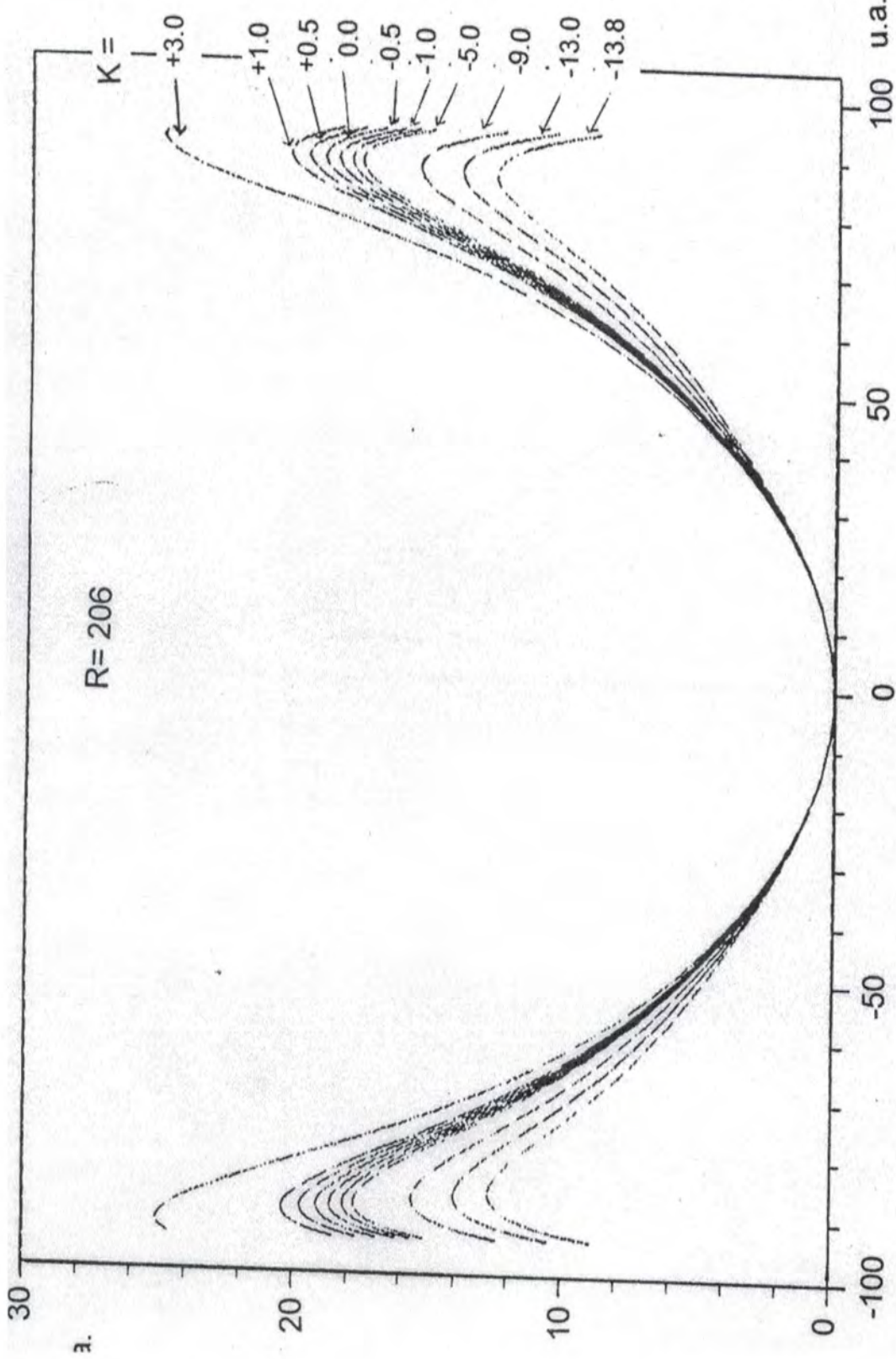


Fig. 1.3 a variación de la curvatura al mantener el radio y variar la conicidad

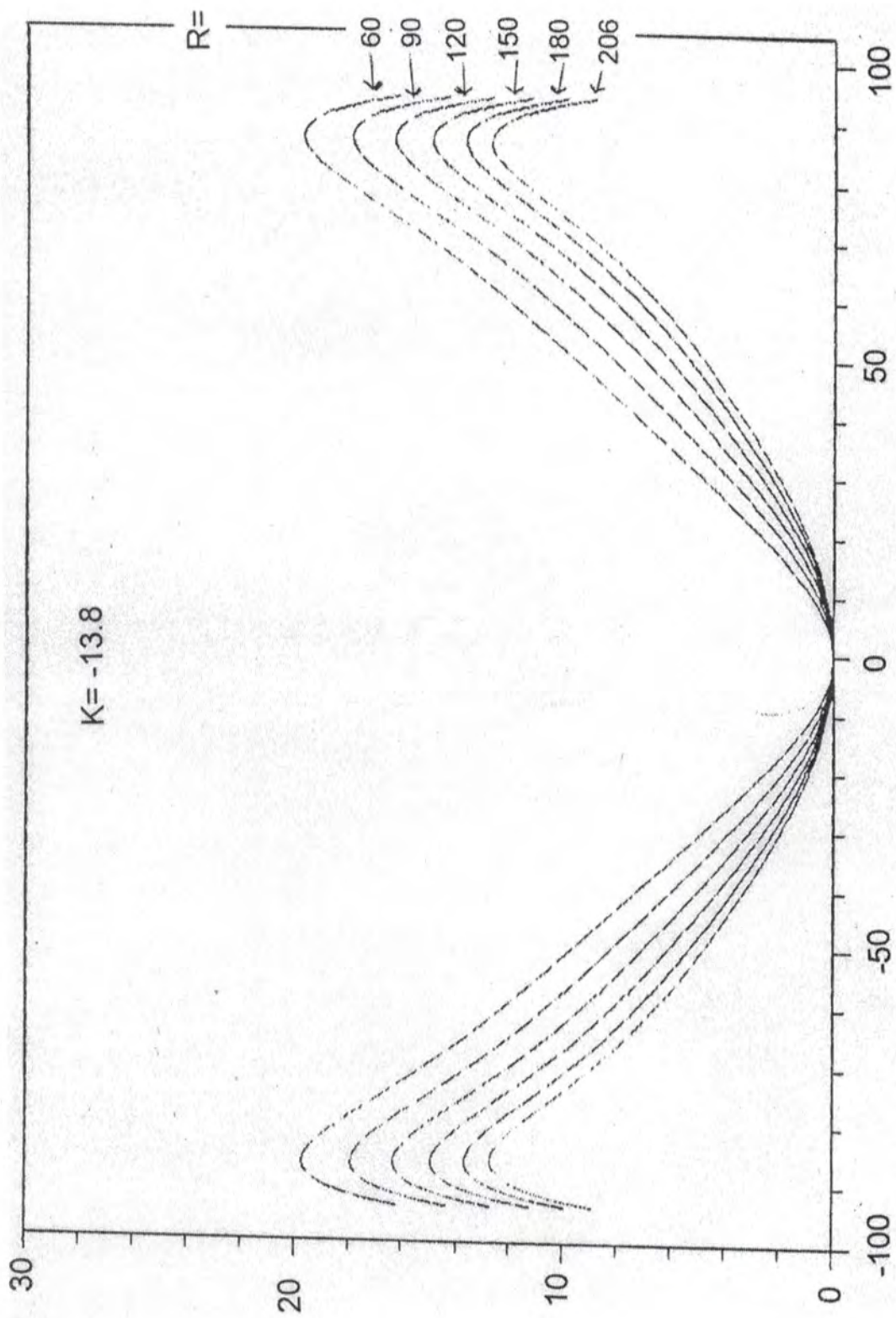


Fig. 1.3 b Variación de los radios de curvatura para una constante de conicidad dada

La Fig. 1.3 a muestra la variación de la figura en la curvatura [Fischer 1997, Malacara 1994] al mantener constante el radio y variar la conicidad. Estos resultados muestran que todas las curvas coinciden en la parte central, que es la región paraxial. Sin embargo, al variar los radios de curvatura para una constante de conicidad dada, Fig. 1.3 b, observamos que la forma de las curvas difieren considerablemente. De estas figuras podemos concluir que las diferencias entre los valores experimentales y los teóricos observados en la Fig. 1.2a se deben a las diferencias en la constante de conicidad obtenida. En este caso podemos esperar que al menos la parte paraxial de la preforma se comporta de acuerdo a los datos de diseño original.

Para determinar si los errores obtenidos en la preforma se debieron a diferencias en las herramientas, se analizaron 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 (Fig 1.4a y Fig. 1.4b). 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.

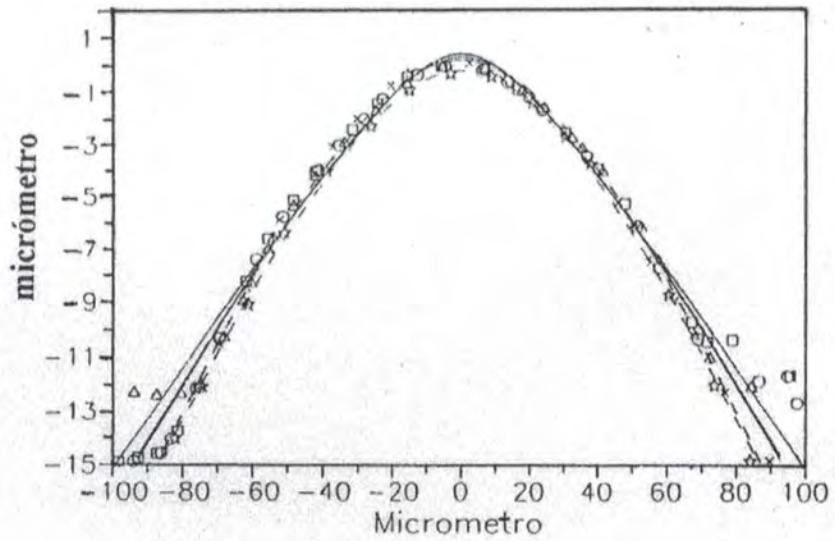


Fig. 1.4 (a) Resultados obtenidos con herramientas con película de diamante para generar R_1 . Las curvas se ajustaron y normalizaron a la escala de la microlente, representada por la línea sólida.

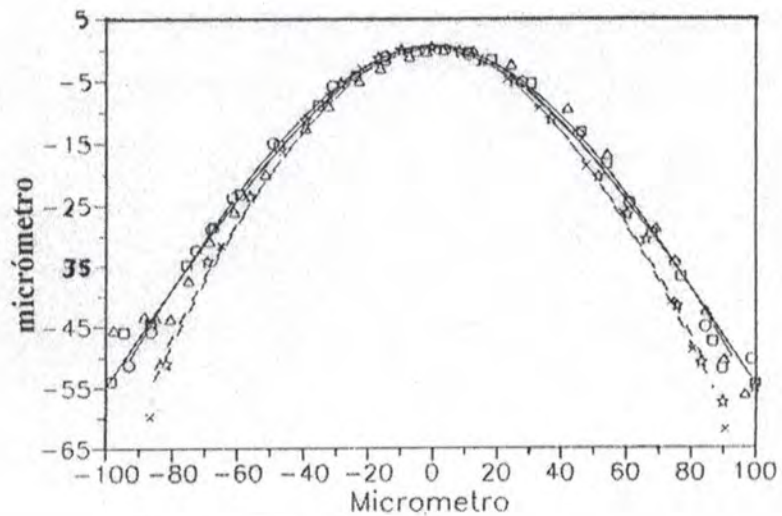


Fig. 1.4 (b) Resultados obtenidos con herramientas con película de diamante para generar la curvatura 2. Esta gráfica muestra curvas ajustadas y normalizadas a la escala de la microlente, representada por la línea sólida.

I.2 Caracterización de las microlentes obtenidas

Para medir la sección transversal de las microlentes se digitalizó la imagen observada en el microscopio, Fig. 1.5.

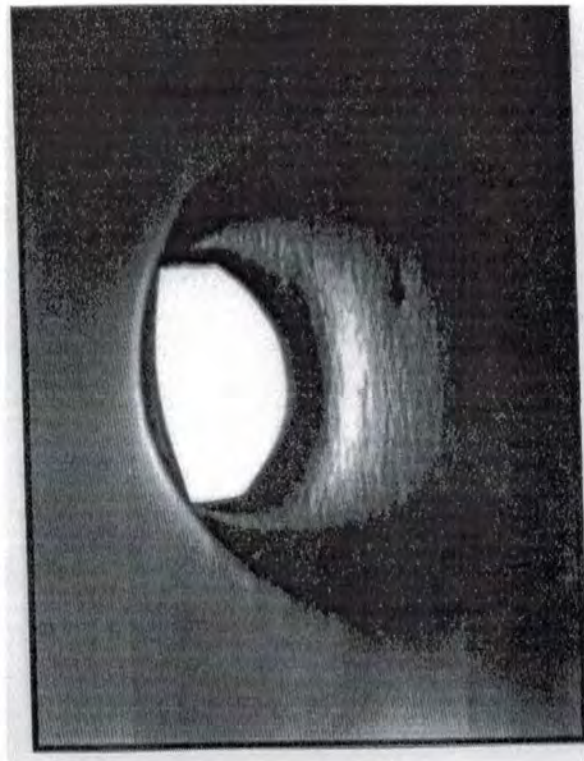


Fig. 1.5 Microfotografía de la sección transversal de la lente

Las coordenadas correspondientes a la imagen digitalizada de la microlente se obtuvieron con el programa Autocad [Autocad, 2001]. El análisis de los datos experimentales se efectuó de la misma manera que en el caso de las preformas. Las Figs. 1.6 a y 1.6 b, muestran la gráfica de ajuste de datos de las superficies R_1 y R_2 con respecto a la curva teórica para esta microlente.

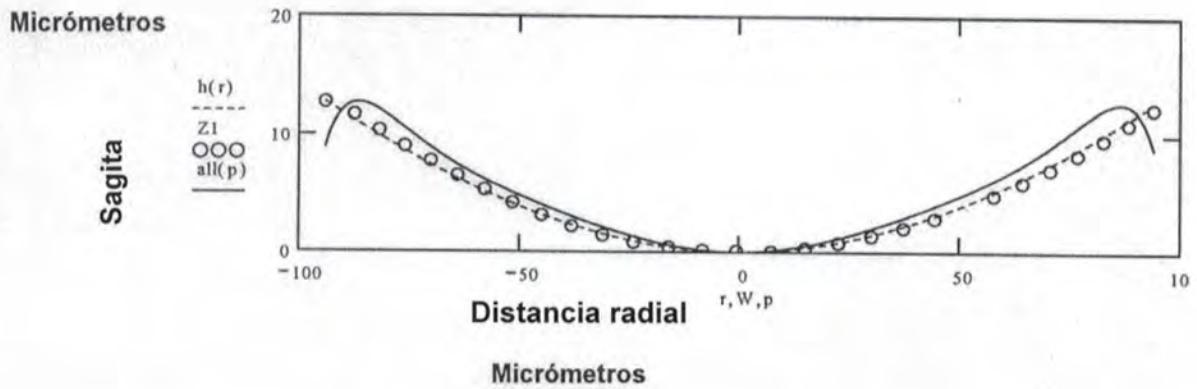


Fig. 1.6 a Gráfica que muestra la correlación entre la forma de la superficie R_1 de la microlente del diseño (línea sólida) y la superficie de la microlente fabricada con vidrio LASF-N-09 (círculos) así como también el ajuste de datos con respecto a las curvas anteriores (línea punteada)

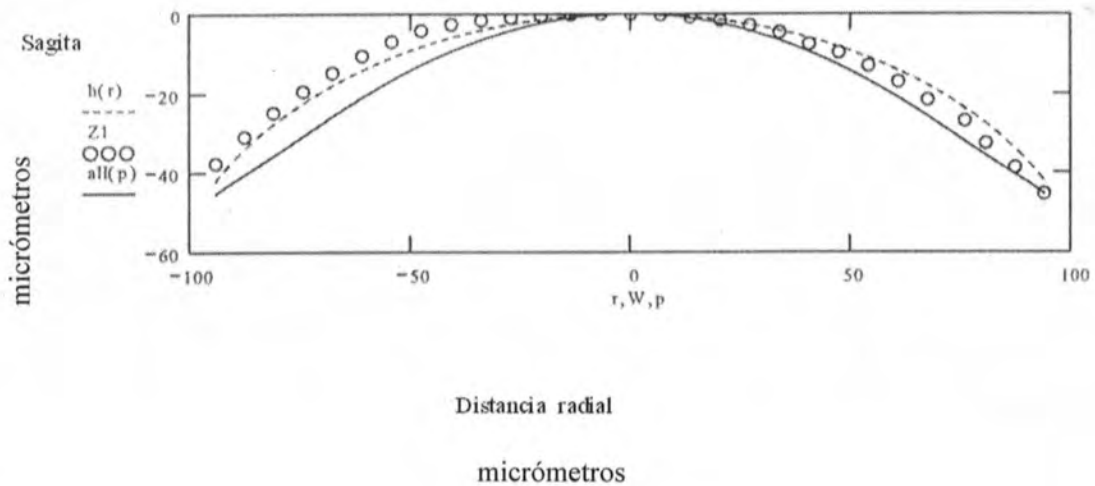


Fig. 1.6 b Gráfica que muestra la correlación entre la forma de la superficie R_2 de la microlente del diseño (línea sólida) y la superficie de la microlente fabricada con vidrio LASF-N-09 (círculos) así como también el ajuste de datos con respecto a las curvas anteriores (línea punteada) .

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 de $6.5 \mu\text{m}$. 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 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.

I.3 CONCLUSIONES

De la misma forma se realizó el mismo proceso con la microlente. En este caso se puede observar que los resultados tienen una correlación menor con respecto al teórico esperado. Esto puede ser debido a los esfuerzos mecánicos ocurridos en el proceso de estiramiento de las preformas. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible afirmar que se cumplió con el objetivo del trabajo.

CAPÍTULO 2

MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA FOCAL EN MICROLENTE.

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las aplicaciones en las que se utiliza un láser como fuente de iluminación es necesario modificar la distribución de amplitud con lentes y otros elementos ópticos. Aunque la óptica macroscópica puede ser la apropiada para realizar experimentos en el laboratorio, el tamaño físico de las microlentes ha sido un factor limitante cuando se utilizan los láseres de diodo en óptica integrada.

Las microlentes cilíndricas se pueden fabricar con una sección transversal predeterminada [Snyder 1991, Grubman 1999] por diferentes técnicas [Wuand 1991, Calixto 1998, Camacho 1999, Erdmann 1998, Pfeil 1998, Kubo 1990, Borelli 1999, Herzig 1997]. Estos elementos se utilizan para colimar o enfocar la luz que proviene de un láser de diodo, para acoplar haces a una fibra óptica o bien como componente óptico integrado o para formar micro-imágenes [Snyder 1991].

Para determinar el funcionamiento refractivo de una microlente es necesario conocer la distancia focal, la forma y la calidad de sus superficies. Sin embargo, debido a sus dimensiones y las altas tolerancias de alineación, la medición de los parámetros de una microlente es mucho más complicado que el proceso para lentes normales. Se han propuesto un gran número de métodos [Horst 1994, Sturm 1994, Malacara 1994, Juan 2001] para caracterizar microlentes.

En este capítulo se describe un método indirecto para medir la distancia focal de microlentes que permite la determinación de la distancia focal utilizando un arreglo

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes experimental simple. El método está basado en la propagación de los haces Gaussianos [Milonni 1988, Laures 1967]. En este método se mide la cintura del haz al mismo tiempo de su paso através de la microlente. Los resultados experimentales se obtuvieron midiendo una microlente que se fabricó por el método de estiramiento de fibra. Comparados con otros métodos difieren al menos 3%.

II. 1 TEORIA

La Fig. 2.1 muestra un diagrama del arreglo experimental. Se utiliza un láser He - Ne para obtener un haz Gaussiano con un perfil de amplitud $\Psi_o(\xi, \eta)$. El diámetro del haz se redujo utilizando un expensor de haz y una lente menisco.

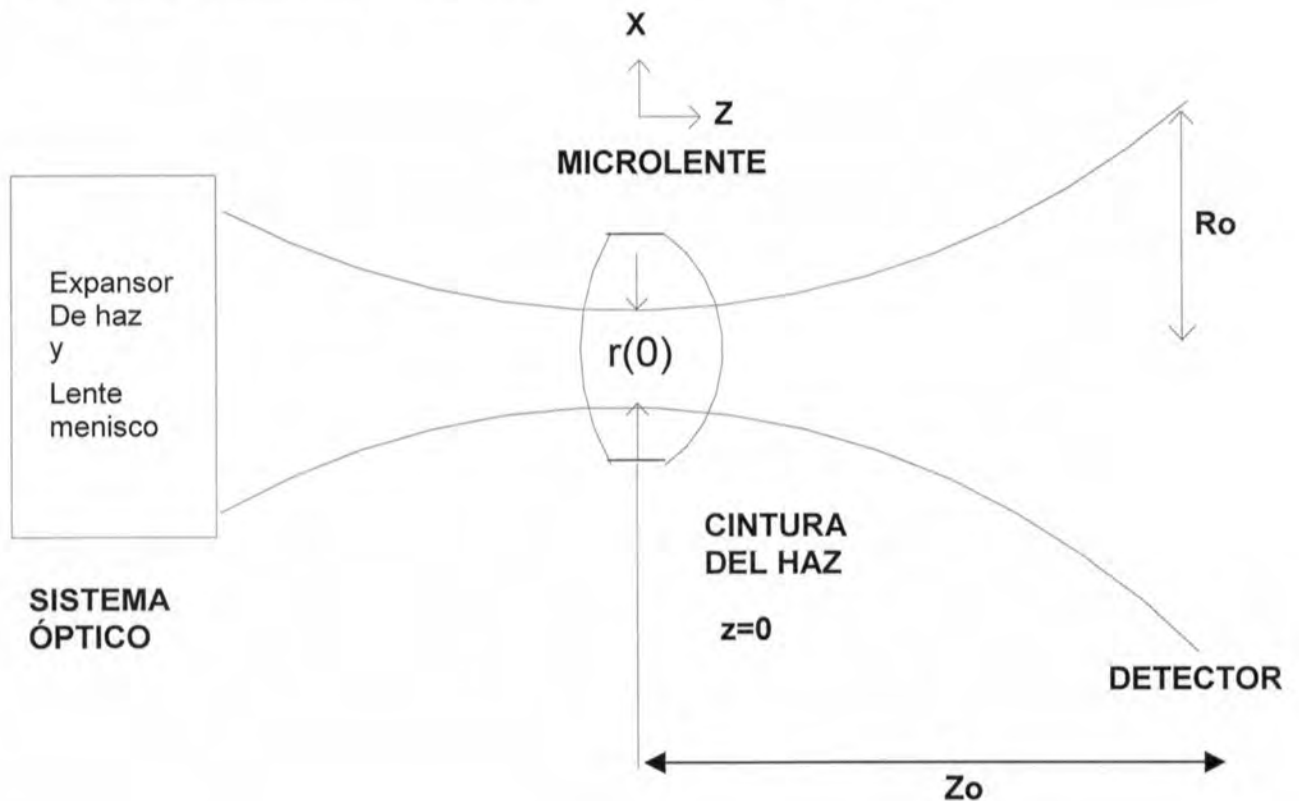


Fig. 2.1 Diagrama esquemático del arreglo óptico. La microlente representa el caso de cuando la lente se encuentra en la cintura del haz.

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

La distribución de amplitud de un haz gaussiano se escribe como

$$\Psi(x, y, z) = A(z) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r(0)^2}\right]. \quad (2.1)$$

Donde $A(z) = \sqrt{\frac{2P_0}{\pi r(0)^2}}$ es el factor que involucra la potencia del haz P_0 y $r(0)$ es el semi-ancho en la cintura del haz.

Cuando la microlente se coloca en el plano $(x, y, z=0)$, la fase del haz Gaussiano se modifica por un factor $\exp\left(\frac{-ikx^2}{2f}\right)$, donde el número de onda es $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ es la longitud de onda. La distribución de amplitud después de que el haz gaussiano atravesó la lente está dado por

$$\Psi(x, y) = A(z) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r(0)^2}\right] \exp\left[\frac{-ikx^2}{2f}\right] \quad (2.2)$$

La propagación de Fresnel del haz hasta el plano (ξ, η) localizado a una distancia z_0 de la microlente está dado por

$$\Psi(\xi, \eta, z; x, y, z) = A(z) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r(0)^2}\right] \exp\left[\frac{-ikx^2}{2f}\right] \exp\left[\frac{ik(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2z_0}\right] dx dy. \quad (2.3)$$

Separando la integral de la Ec. (2.3) para cada uno de los ejes coordenados se obtiene

$$\Psi(\xi, \eta, z_o) = A(z) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[\frac{-(x)^2}{r(0)^2}\right] \exp\left[\frac{-(ikx^2)}{2f}\right] \exp\left[\frac{ik(x-\xi)^2}{2z_o}\right] dx \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[\frac{-(y^2)}{r(0)^2}\right] \exp\left[\frac{ik(y-\eta)^2}{2z_o}\right] dy. \quad (2.4)$$

En el plano ($z=z_o$), como se muestra en la Fig. (2.1), la distribución de amplitud en el plano de detección sobre el frente de onda de la microlente cilíndrica ($\eta = 0$) se escribe como [Goodman 1994]

$$\Psi(\xi, z_o) = A(z) \exp\left[-\frac{(\pi^2 r(0)^2 f^2) \xi^2}{z_o^2 (\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4)}\right] \times \exp\left[\frac{i\pi \xi^2}{\lambda z_o}\right] \left[1 + \frac{\pi^2 r(0)^4 f}{z_o (\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4)}\right]. \quad (2.5)$$

Tomando en cuenta sólo el inverso del argumento del exponencial real en la Ec. (2.5), se puede obtener el semi-ancho del haz propagado en z_o ,

$$R_o^2 = \frac{z_o^2 (\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4)}{\pi^2 r(0)^2 f^2}, \quad (2.6)$$

por lo que despejando de la Ec. (2.6) el valor de la distancia focal de la lente, f ,

$$f = \frac{\pi r(0)^2 z_o}{\sqrt{(R_o \pi r(0) - z_o \lambda)(R_o \pi r(0) + z_o \lambda)}}. \quad (2.7)$$

De la Ec. (2.7) es posible obtener la distancia focal de la microlente a partir de la medición de $r(0)$, el semi-ancho del haz Gaussiano y, R_o , el semi-ancho del haz

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes propagado a través de la microlente a una distancia z_0 . La exactitud del resultado dependerá de los instrumentos utilizados para obtener los valores experimentales.

II.1.1 La microlente fuera de la cintura del haz.

El método descrito en la sección anterior es válido si la lente se coloca exactamente en la cintura del haz. Sin embargo no siempre es posible colocar con exactitud los elementos bajo prueba. Por ello en esta sección consideramos el efecto del desplazamiento de la microlente a una posición fuera de la cintura del haz sobre el eje óptico. Esta situación se describe en la Fig. 2.2 como posición alternativa.

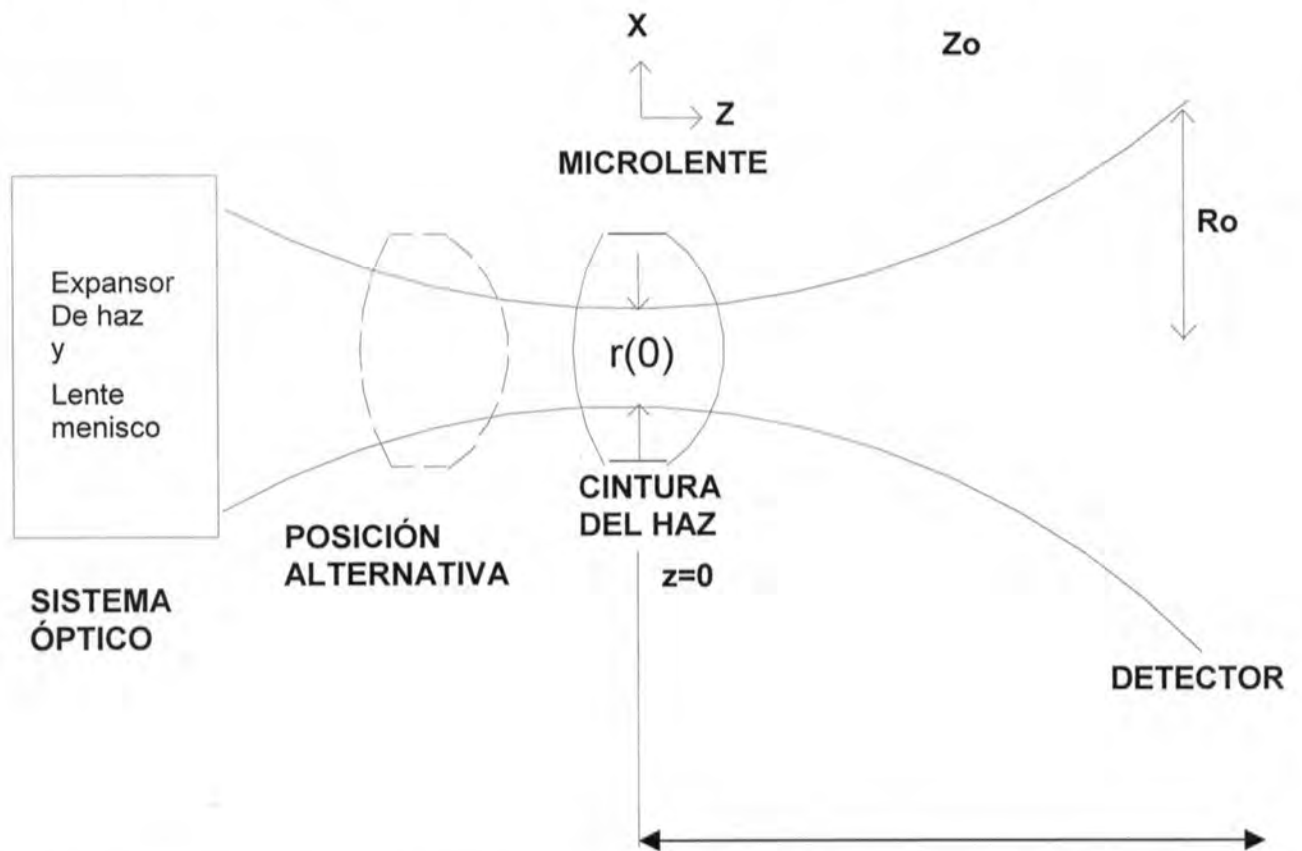


Fig. 2.2 Diagrama esquemático del arreglo óptico. La microlente está representada por líneas punteadas y representa el caso de cuando la lente se encuentra en y fuera de la cintura del haz.

En este caso es necesario usar la expresión general para la propagación de haces Gaussianos [Milonni 1998],

$$\Psi_0(x, y) = A(z) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r(z)^2}\right] \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2P(z)}\right], \quad (2.8)$$

donde $A(z) = \frac{\sqrt{2P_0}}{\sqrt{\pi r(0)^2}} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$, $P(z) = z + \frac{z_0^2}{z}$ representa el radio de curvatura del frente de

onda donde se coloca la microlente y $r(z)$ es el semiancho fuera de la cintura del haz.

La amplitud del frente de onda una vez que atraviesa a la microlente, está dada por

$$\Psi_0(x, y) = A(z) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r(z)^2}\right] \exp\left[-\frac{ikx^2}{2f}\right] \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2P(z)}\right]. \quad (2.9)$$

Se puede observar que el factor de fase que corresponde a la lente se localiza fuera de la cintura del haz.

Para este análisis se emplea la distancia de Rayleigh :

$$z_0 = \frac{\pi r(0)^2}{\lambda}. \quad (2.10)$$

siendo λ la longitud de onda de la iluminación Calculando la propagación del haz en el eje x, en el plano $z=z_0$, la distribución de amplitud compleja sobre el frente de onda a una distancia z_0 es:

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

$$\Psi(\xi) = A(z) \exp \left\{ i \left[\varphi(z) + \frac{\pi \xi^2}{\lambda z_0} \right] \right\} \sqrt{\frac{4 f^2 \pi r^2(z) + i 2 k r^4(z) f \left[\frac{\pi f}{P(z)} - 1 \right]}{4 f^2 + k^2 r^4(z) \left[\frac{f}{P(z)} - 1 \right]^2}} \times \exp \left\{ \frac{-4 f^2 \pi^2 r^2(z) - i 2 \pi^2 k f r^4(z) \left[\frac{f}{P(z)} - 1 \right]}{4 f^2 \lambda^2 z_0^2 + k^2 r^4(z) \lambda^2 z_0^2 \left[\frac{f}{P(z)} - 1 \right]^2} \right\} \xi^2 \quad (2.11)$$

donde $\varphi(z)$ la distribución de fase del frente de onda, $\varphi(z) = \tan^{-1}(z/a_0)$; $r(0)$, la cintura del haz en $z = 0$; y $r(z)$, el semi-ancho del haz, $r(z) = r(0) \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}}$;

Como en el caso previo, R_0^2 , es,

$$R_0^2 = \frac{4 z_0^2 \lambda^2 f^2 + k^2 r^4(z) \lambda^2 z_0^2 \left[\frac{f}{P(z)} - 1 \right]^2}{-4 \pi^2 r^2(z) f^2} \quad (2.12)$$

Al determinar el efecto de un error del posicionamiento de la lente bajo inspección, se obtiene:

$$\frac{dR_0}{dz} = \frac{2 z \left\{ z_0^2 r(0)^2 \left[- (z^2 + a_0^2)^2 + a_0^2 f^2 \right] \right\}}{2 R_0 \left\{ a_0^2 f^2 \left[z^2 + a_0^2 \right]^2 \right\}} \quad (2.13)$$

Tomando en cuenta los valores típicos involucrados, se puede concluir que

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

$$\frac{dR_o}{dz} \approx 0. \quad (2.14)$$

Por lo que un pequeño desplazamiento en el eje de la microlente no afecta la medición de su distancia focal.

II.1.2 Rotación de la lente.

Si suponemos que existe un error en la posición de la lente que corresponde a una rotación como se muestra en la Fig. 2.3 el patrón de difracción transmitido es estacionario y está centrado sobre la pantalla. Después que el haz Gaussiano pasa por la lente se presenta la modulación en fase. El perfil de amplitud $\Psi_o(x,y)$ después de la lente localizada en la cintura del haz está dado por la Ec. (2.1).

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

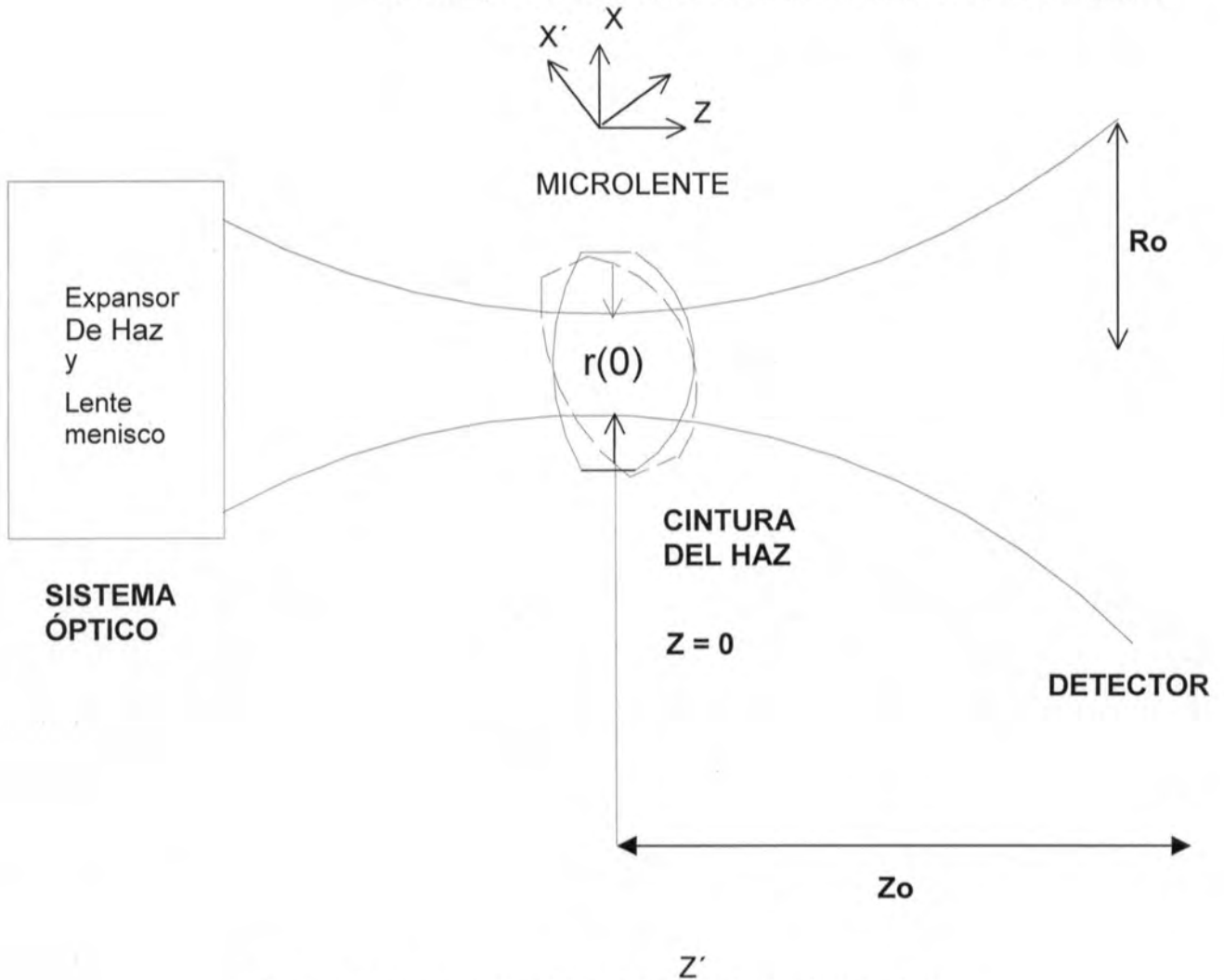


Fig. 2.3 Arreglo esquemático del movimiento de rotación.

En este caso es necesario utilizar las coordenadas polares siendo $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$, $\theta = \tan^{-1} (y/x)$ y ρ_0 es el semi-ancho de la cintura del haz. Además el perfil de amplitud de la cintura del haz $\Psi_0(x,y)$ localizado en el plano $x-y$ puede escribirse como

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

$$\Psi_0(r, \theta, z) = A(z) \exp\left[-\frac{r^2}{\rho_0^2}\right] \exp\left[-\frac{i k (r \cos \theta)^2}{2f}\right]. \quad (2.15)$$

En el plano $z=z_0$, la distribución de la amplitud es

$$\Psi_0(r', \theta', z = z_0) = A(z) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{r^2}{\rho_0^2}\right] x \exp\left[-\frac{i k (r \cos \theta)^2}{2f}\right] x \exp\left[-\frac{i k \left[(r \cos \theta - r' \cos \theta')^2 + (r \sin \theta - r' \sin \theta')^2 \right]}{2z_0}\right] r dr d\theta. \quad (2.16)$$

Donde θ' es el ángulo y r' es el radio vector $z = z_0$. Por lo que puede reescribirse como,

$$\Psi_0(r', \theta', z) = A(z) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\left[\frac{r^2}{\rho_0^2} + i k \left(\frac{r^2 + r'^2}{2z_0}\right)\right]\right\} \int_0^{2\pi} \exp\left\{-\left[\frac{(r \cos \theta)^2}{2f} - \frac{2rr' \cos(\theta - \theta')}{2z_0}\right]\right\} r d\theta dr. \quad (2.17)$$

Integrando encontramos que la distribución de amplitud en el plano de observación

$$\Psi_0(r', \theta, z) = \frac{\frac{-i\pi^2 r^2}{\lambda f} \left\{ \rho \sqrt{f\pi z_0} \left[-\operatorname{Erfi} \left[\frac{\pi^2 \rho^2 r_1^4}{\lambda G \sqrt{f z_0}} \right] + \operatorname{Erfi} \left[\frac{4\pi^2 \rho^2 [a + r_1^2] + b I \left(\frac{2\pi^2}{\lambda} \right) z_0}{4\rho G \sqrt{f z_0}} \right] \right\}}{2 \exp \left[\frac{\pi^2 \rho^2 r_1^4}{8\lambda f \left[2 \left(\frac{\pi \rho^2}{\lambda} + I z_0 \right) \right]} \right] G}. \quad (2.18)$$

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes donde $a = 7.938 \times 10^{-5}$ y $b = 1.5876 \times 10^{-4}$ son los coeficientes que se obtuvieron cuando evaluamos el radio de la lente de prueba y G está definido como

$$G = \sqrt{\frac{2 \pi^2}{\lambda} \left[2 \left(\frac{\pi \rho^2}{\lambda} + I z_o \right) \right]}$$

con el propósito de simplificar la expresión (2.18)

En la Fig. 2.4 se graficó la Ec. (2.18), para una distancia focal fija y un ángulo de rotación de (15°). Se puede ver que esta curva es similar a la curva Gaussiana, lo cual corresponde a la observación experimental.

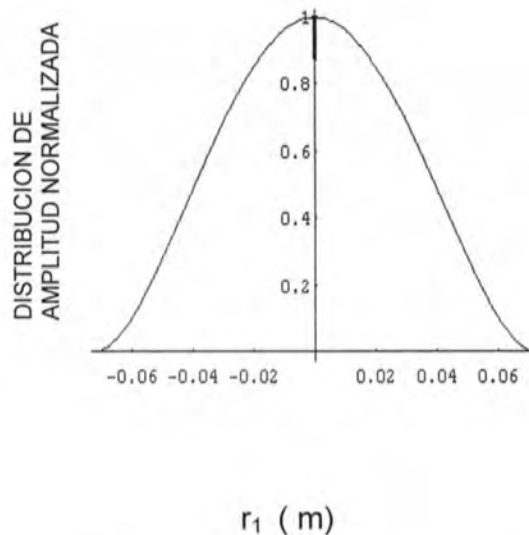


Fig. 2.4 Gráfica de la Ec. (2.18) en el caso de $f = 5.32 \text{ mm}$, $\theta = 15^\circ$. Se graficó la distancia en el movimiento de rotación $r_1 = \xi$ contra la distribución de amplitud normalizada.

Para probar estos resultados se calculó la distancia focal de la lente para diferentes ángulos de rotación. Los parámetros utilizados fueron $z_o = 4.65 \pm 0.05 \text{ cm}$, $\rho_o = 27 \pm 1.35 \text{ }\mu\text{m}$. La Fig. 2.5 muestra los resultados que se obtuvieron en el caso de la preforma cilíndrica

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

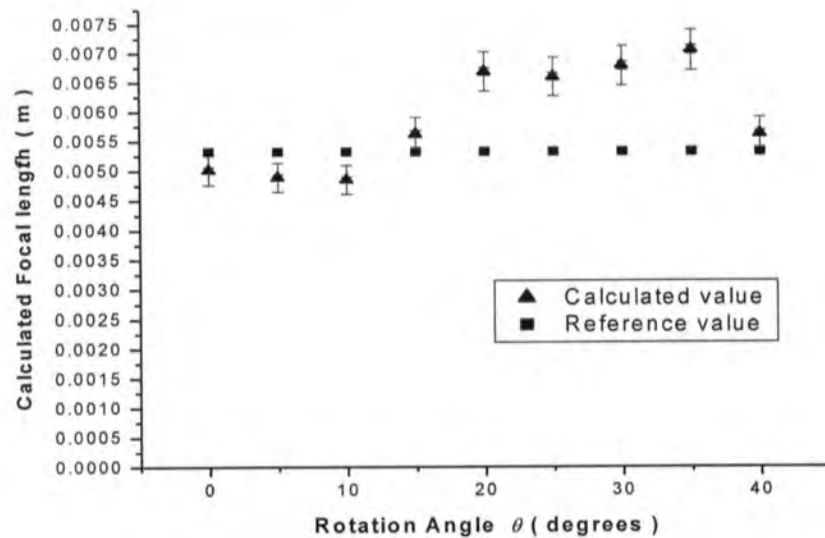


Fig.2.5 Variaciones de la distancia focal (m) con respecto al ángulo de rotación θ (grados).

En estos resultados se observa que después de los 15° la diferencia entre el valor teórico y el experimental es de aproximadamente del 25% con respecto a los obtenidos con diferentes métodos [Welford 1986, Horst 1994, Sturm 1997, Malacara 1994]. Además el movimiento de rotación no introduce error en la medición de la distancia focal utilizando nuestro método.

Lo que implica un rango de tolerancia muy alta en la posición de la lente y permite la medición de la microlente en la que es difícil saber si estas componentes están bien colocadas.

II.2 Arreglo Experimental

Para verificar el análisis usamos el arreglo básico mostrado en la Fig. 2.6

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes

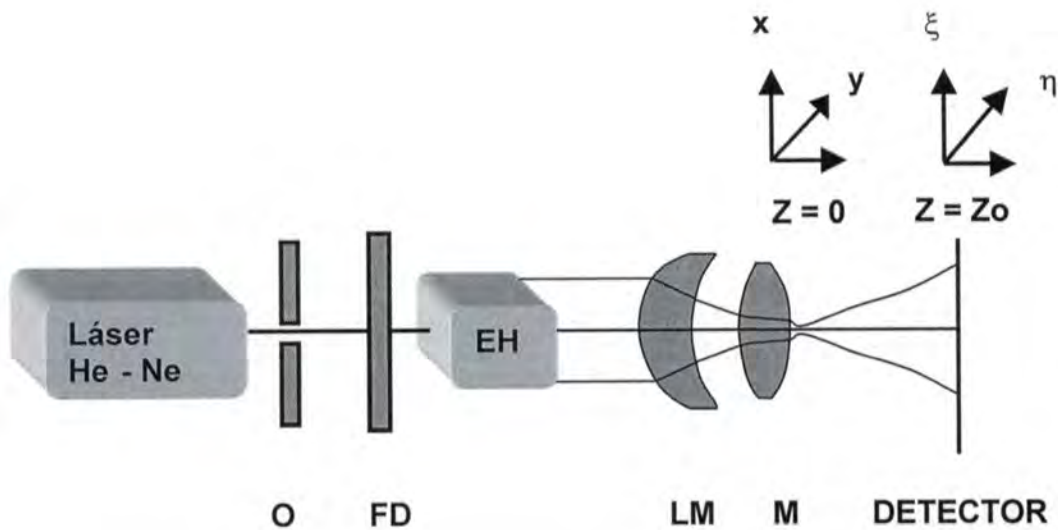


Fig. 2.6 Arreglo básico para medir la distancia focal. O = obturador, FD= Filtro de densidad, EH = expansor de haz, LM= lente menisco y M= microlente.

Empleamos una microlente con un diámetro de $208 \mu\text{m}$ y espesor de $121 \mu\text{m}$ diseñado para acoplar una barra de diodo láser con una fibra de doble recubrimiento.[Zenteno, 1994] como lente de prueba.

Utilizamos un láser He-Ne de 10 mW, linealmente polarizado ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) para las mediciones. Se verificó el perfil Gaussiano utilizando un osciloscopio digital de doble canal Tektronix TDS 520/@ 500 MHz y un analizador de espectros (ver Fig. 2.7). La intensidad del haz láser no afecta los resultados experimentales, pero si se utiliza un haz de muy alta potencia, esto provoca que se midan ondas espurias lo que dificulta las mediciones. Por el contrario, si la potencia es muy baja, la señal cae a un nivel no detectable. Así que se recomienda una potencia moderada. Para este propósito la potencia fue de 0.9 mW .

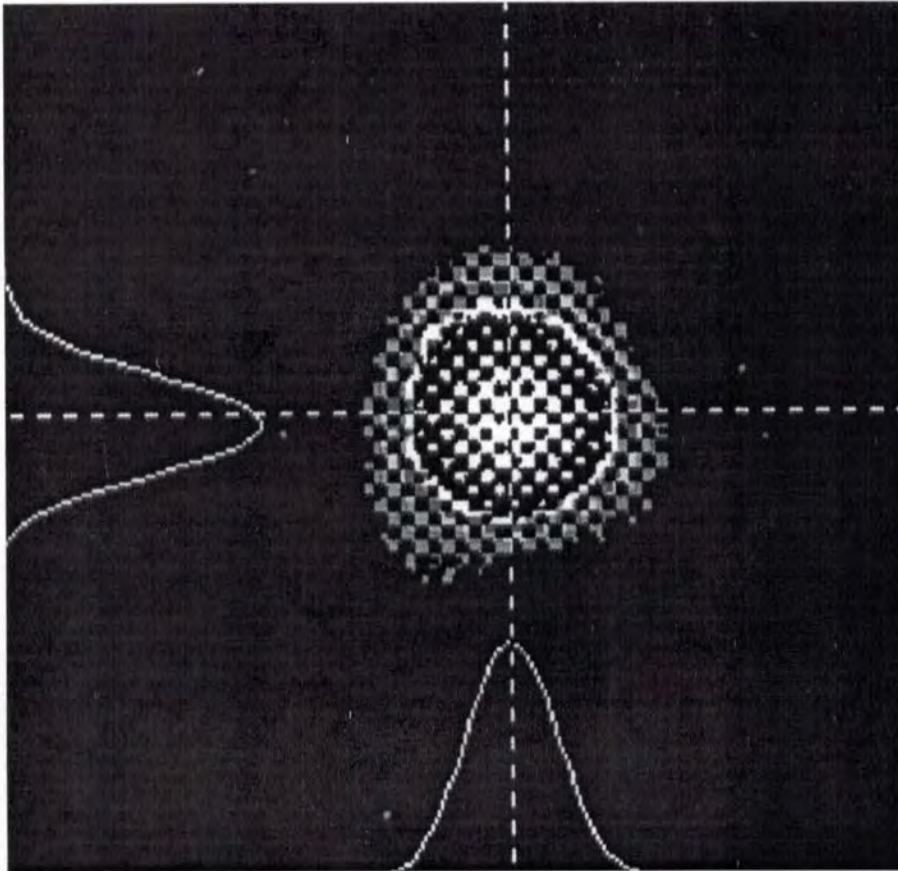


Fig. 2.7 Perfil del Láser He- Ne

El diámetro del haz se redujo utilizando un expansor de haz de 10X (Melles Griot 1995-1996) y una lente menisco de distancia focal $f = 31.8 \pm 0.05$ cm. El valor del radio del haz se redujo a $r_0 = 51 \pm 5 \mu\text{m}$. Esto nos permitió medir la distancia focal efectiva de la zona paraxial de la microlente.

Nuestro método depende de tres parámetros para las mediciones: la cintura del haz, el semiancho del haz y la distancia al plano de detección z_0 . Además la precisión se determinará por estas mediciones. El semiancho de los haces Gaussianos se puede

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes determinar por diferentes métodos [Horst 1994, Sturm 1997, Cohen 1984, Firester 1977, Stuns 1980, Taylor 1997] . El semiancho del haz de la mancha enfocada se registró con una cámara de CCD colocada en el plano (x, y) . Este método es fácil y rápido y tiene la ventaja que muestra la mancha entera enfocada en este plano. Sin embargo tiene la desventaja que depende de la calidad de la cámara de CCD. Cuando utilizamos la luz coherente, el tamaño de la mancha se obtiene al efectuar la transformada del producto de las transformadas de la función del punto extendido de la mancha a medir y la función del punto extendido de la cámara de CCD. Esta técnica puede utilizarse solamente para la medición de sistemas de bajas aberturas numéricas. Una segunda desventaja es que no hay calibración *in situ*. Esta calibración se hace comparando la imagen de un objeto de tamaño conocido con el de la mancha enfocada a medirse. Para obtener resultados numéricos confiables, se utilizó por su simplicidad el método de la navaja, el cual fue descrito por [Sturm, 1997].

Al introducir la microlente en la cintura del haz, se observó un incremento en la divergencia del haz .

Midiendo el semiancho del haz a una distancia arbitraria $z_o = 4 - 400 \pm 0.5$ mm y usando la Ec. (2. 4) la distancia focal de la microlente fue $f = 127 \pm 9$ μm .

Para probar el método con lentes macroscópicas, se midió una de las preformas que se ocuparon para generar las microlentes. Esta se fabricó con vidrio LASF-N-09 utilizando una herramienta de diamante, como se muestra en la Fig. 2.8. El resultado de la distancia focal de la preforma fue de $f = 3.48 \pm 0.12$ mm.

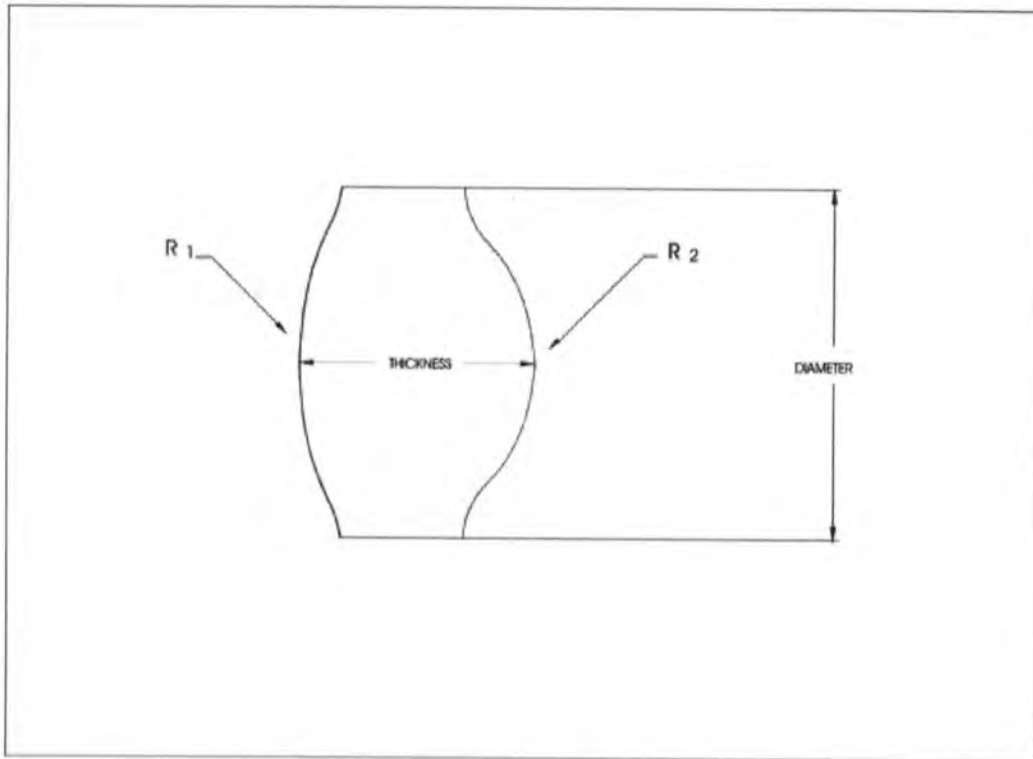


Fig. 2.7 Sección transversal de la lente cilíndrica. Para la microlente cilíndrica, el diámetro es $208 \mu\text{m}$ y el espesor es $121 \mu\text{m}$. Para la preforma cilíndrica del diámetro = 12.6 mm y el espesor = 7.6 mm .

II.3 MÉTODOS ALTERNATIVOS

Para verificar este método se digitalizó la imagen de la sección transversal de la microlente, lo que permitió obtener sus coordenadas [Mathcad 1997]. De esta forma utilizando la sagita [Born 1975, Bass 1995] y un procedimiento de ajuste de datos [Mathcad 1997] se obtuvo una aproximación del perfil de la microlente. El radio de curvatura de la lente fue $R_1 = 310.1 \mu\text{m}$ y $R_2 = -144.1 \mu\text{m}$. Usando el valor del índice de refracción, $n = 1.83$ y el espesor = $121 \mu\text{m}$ en la ecuación de las lentes [Bass 1995] se encontró la distancia efectiva la cual fue de $f = 134.8 \mu\text{m}$. Comparando este resultado

Método para la determinación de la distancia focal en microlentes con el valor obtenido con nuestro método la diferencia observada fue del 5%. Se midió la distancia focal de la preforma usando el método descrito [Díaz-Uribe, 1986] dando un valor de $f = 3.15 \pm 0.53$ mm, por lo que se observa que es la misma diferencia con el resultado previo.

II.4 CONCLUSIONES

Se describió un método para medir la distancia focal de microlentes. Para probar el método se utilizó la región paraxial de una microlente cilíndrica. El método involucra la determinación de los siguientes tres parámetros: la cintura del haz incidente (r_0), los semianchos del haz propagado (R_0), a una distancia propagada (z) de la microlente.

Este método tiene las siguientes ventajas. 1) El arreglo óptico es extremadamente simple para las evaluaciones cuantitativas de la distancia focal. 2) Se demostró la posición de la microlente no es crítica. 3) También nos permite usar las diferentes longitudes de onda que son convenientes para muchas aplicaciones.

Este método se aplica para medir diferentes regiones de la lente y analizar su funcionamiento óptico.

CAPÍTULO 3

MÉTODO SIMPLE PARA MEDIR LA DISTANCIA FOCAL DE LENTES

INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se describió un método para medir la distancia focal de las lentes de cualquier tamaño, el cual está basado en las propiedades de propagación del haz Gaussiano [Camacho, 2000]. Se analizó la variación de los parámetros de entrada del haz gaussiano involucrados en la medición de la distancia focal. Estos son el semi-ancho del haz $r(z)$, la distancia de la lente al plano de observación z_0 y el semi-ancho de la imagen de la mancha transmitida, R_0 .

De acuerdo con los resultados obtenidos se encontró un método más simple para medir la distancia focal de las lentes en la que solamente es necesario desplazar la lente una distancia Δx perpendicular al eje óptico y medir el desplazamiento de la mancha luminosa por la lente, $\Delta \xi$, a una distancia z_0 . Este método puede aplicarse para verificar la distancia focal de la lente en su proceso de fabricación.

Las lentes que utilizamos para probar el método fueron microlentes de $100 \mu\text{m}$ de ancho y lentes macroscópicas de distancia focal de hasta 54.40 mm . El error de medición encontrado es del orden de 2% .

III.1 TEORIA

El diagrama del arreglo óptico se muestra en la Fig. 3.1. La fuente de luz es un láser con un perfil de amplitud Gaussiana $\Psi_0(\xi, \eta)$. El diámetro del haz láser se redujo utilizando un sistema óptico, el cual consiste de un expansor de haz y una lente menisco. Si una lente de prueba se coloca en la cintura del haz, de semiancho $r(0)$, la

Método Simple Para Medir la Distancia Focal de Lentes
 amplitud de la luz en la segunda superficie de una lente con distancia focal f , está
 dada por

$$\Psi_0(x,y) = A(z) \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{r(0)^2}\right] \exp\left\{-\frac{ik(x^2+y^2)}{2f}\right\}. \quad (3.1)$$

Sin embargo como se demostró (Ec. 2.9), un pequeño desplazamiento en el eje de la lente en la dirección z , Fig. 3.2a, no afecta la medición de su distancia focal. En lo siguiente, se analizarán los casos cuando la lente se coloca por translación transversal.

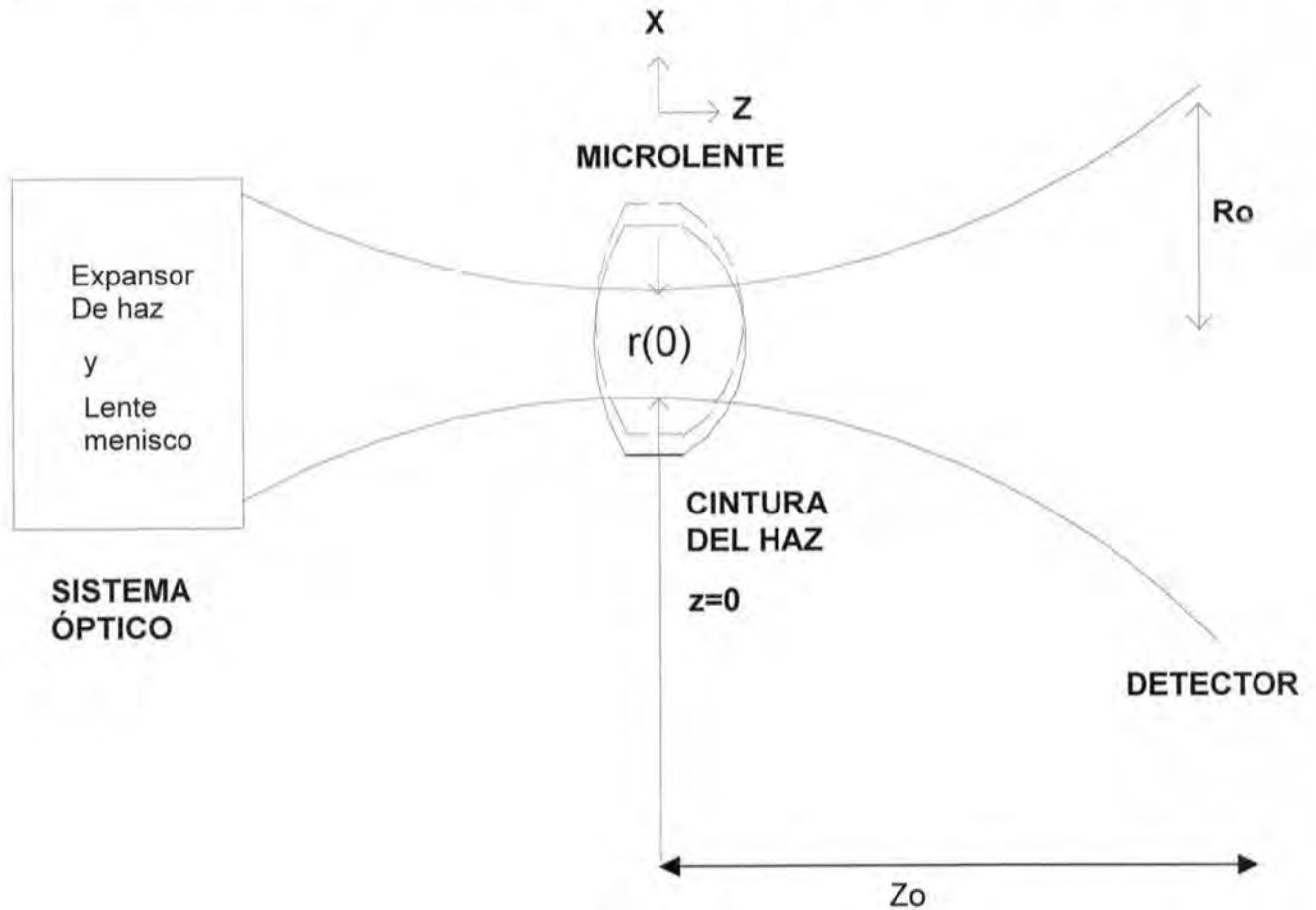


Fig. 3.1. Diagrama del arreglo óptico. La lente con líneas punteadas muestra la translación de la lente.

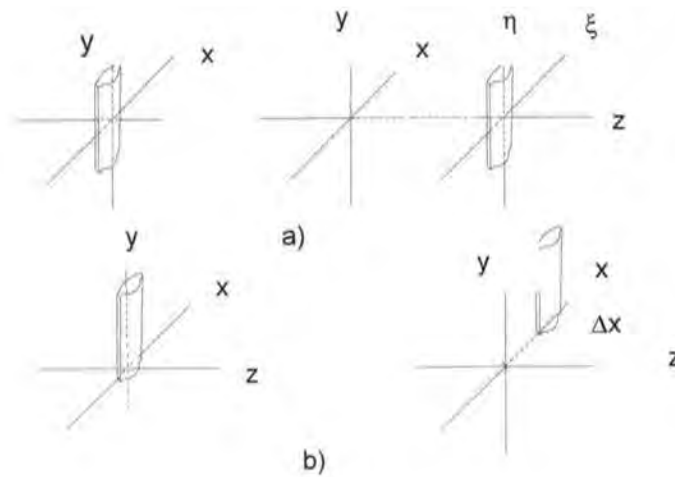


Fig 3.2. Diferentes movimientos de translación con la lente (preforma) en posición vertical.
 a) La lente está en la cintura del haz y su desplazamiento se lleva a cabo a lo largo de la dirección z.
 b) La lente está en la cintura del haz y su desplazamiento se realiza a lo largo del eje x.

III.2 MOVIMIENTO DE TRANSLACIÓN TRANSVERSAL

Consideremos que la lente se colocó en la cintura del haz y se desplazó una pequeña distancia transversal Δx a lo largo del eje x , Fig. 3.2b. Sin restar la generalidad, se usará solamente un eje coordinado en la Ec. (3.1). Esto es equivalente a analizar una lente cilíndrica centrada en $(x + \Delta x, y)$. La fase del haz

Gaussiano se modifica por un factor $\exp\left[\frac{-ik(x + \Delta x)^2}{2f}\right]$.

La distribución de amplitud de una lente cilíndrica (considerando por simplicidad $\eta = 0$) en el plano $z = z_0$ es

$$\Psi(\xi, z_o) = A(z) \exp \left\{ \frac{-\pi^2 r(0)^2 f^2 \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{\xi}{z_o} \right]^2}{\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4} \right\} \times \exp \left\{ \frac{i\pi^3 f r(0)^4 \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{\xi}{z_o} \right]^2}{[\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4] \lambda} \right\}. \quad (3.2)$$

Una vez más, el argumento del exponencial es inversamente proporcional al semi-ancho del haz Gaussiano propagado. De la Ec. (3.2) donde ξ se obtiene el semi-ancho del haz Gaussiano propagado en z_o como

$$\frac{R_o^2}{(\xi')^2} = \frac{[\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4] z_o^2}{\pi^2 r(0)^2 f^2 \left[\frac{\Delta x z_o}{f} + \xi \right]^2}, \quad (3.3)$$

Comparando la Ec. (3.3) con la obtenida sin translación [Camacho, 2000] obtenemos

$$\frac{R_o^2}{(\xi')^2} = \frac{[\lambda^2 f^2 + \pi^2 r(0)^4] z_o^2}{\pi^2 r(0)^2 f^2 \xi^2}. \quad (3.4)$$

Se puede observar que la coordenada de origen se translada a ξ' , el nuevo eje de coordenadas.

La distancia focal de la lente está en función de su desplazamiento Δx en el plano (x,y) como,

$$f = \frac{z_o \Delta x}{\Delta \xi} \quad (3.5)$$

midiendo el desplazamiento de la mancha transmitida $\Delta \xi$ en el plano ($\xi, z=z_o$) como se muestra en la Fig. (3.3).

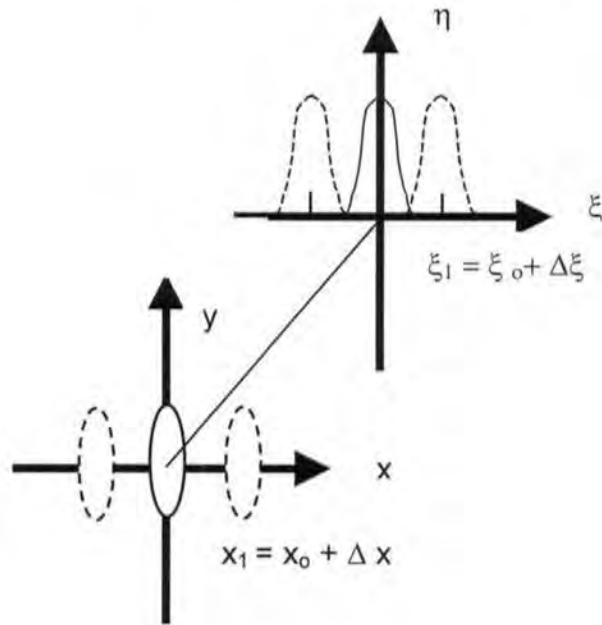


Fig. 3.3 Esta figura muestra la lente de prueba y el desplazamiento lateral de la mancha imagen (mancha transmitida).

Un caso más general, es cuando la lente está colocada fuera de la cintura del haz, la distribución de amplitud en el plano \$x,y\$ de una lente cilíndrica es

$$\Psi_0(x,y) = A(z) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r^2}\right] \exp\left[-\frac{ik(x + \Delta x)^2 + y^2}{2f}\right] \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2P(z)}\right], \quad (3.6)$$

donde \$P(z)\$ es el radio de curvatura del haz Gaussiano cuando la lente está colocada fuera de la cintura del haz

En el plano \$(\xi, \eta, z = z_0)\$, se encuentra que el valor del semiancho del haz Gaussiano es

$$\Psi(\xi, z_o) = A(z) \exp \left\{ \frac{-\pi^3 r^2(z) z_o^2 f^2 P^2(z) \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{\xi}{z_o} \right]^2}{\lambda^2 z_o^2 f^2 P^2(z) + r^4(z) \pi^2 [f P(z) - z_o P(z) - f z_o]^2} \right\}$$

$$\times \exp \left\{ \frac{-i \pi [f P(z) - z_o P(z) - f z_o] [r^4(z) \pi^2 z_o f P(z)] \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{\xi}{z_o} \right]^2}{\lambda^3 z_o^2 f^2 P^2(z) + r^4(z) \pi^2 [f P(z) - z_o P(z) - f z_o]^2} \right\}. \quad (3.7)$$

En el plano $(\xi, \eta, z=z_o)$ se encuentra que el valor del semiancho del haz Gaussiano es

$$\frac{R_o^2}{(\xi')^2} = \frac{\lambda^2 f^2 z_o^2 P^2(z) + \pi^2 r(z)^4 (f P(z) - z_o P(z) - z_o f)^2}{\pi^3 r(z)^2 z_o^2 f^2 P^2(z) \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{\xi}{z_o} \right]^2} \quad (3.8)$$

en donde se encuentra el mismo factor $\left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{\xi}{z_o} \right]^2$ de la Ec. (3.2), Por lo que es posible usar la Ec. 3.5 para encontrar la distancia focal de la lente.

Nuestro análisis muestra que es posible calcular la distancia focal de la lente, midiendo el desplazamiento del centroide de la mancha con respecto al centroide de la mancha transmitida cuando la lente está alineada con el haz Gaussiano.

Revisando la literatura se encontró un resultado similar reportado anteriormente [Bouchaud 1982] utilizando trazo de rayos. No obstante, nuestro método muestra ventajas adicionales pues toma en cuenta el perfil de intensidad del haz. Por ejemplo es posible predecir o encontrar las variaciones del semi-ancho del haz incidente en función de diferentes distancias focales como se muestra en la figura 3.4.

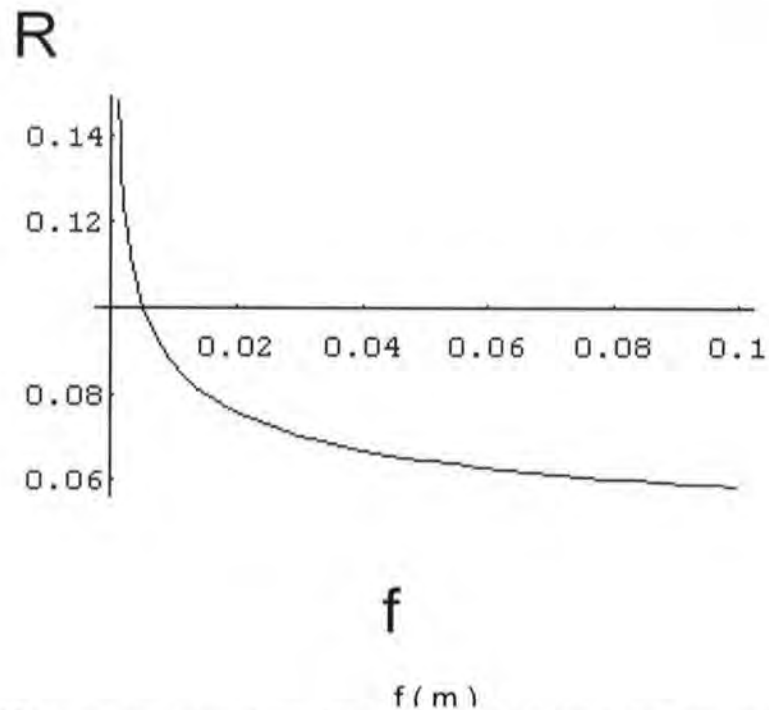


Fig. 3.4 Gráfica que muestra el cambio de los semi-anchos del haz gaussiano (R) para diferentes distancias focales f (m).

Como puede observarse, el semi-ancho del haz tiende a un valor constante cuando la distancia focal supera cierto valor. Lo anterior limita la aplicación de la aproximación de la Ec. (3.5). Sin embargo, con base en el análisis de la propagación del haz Gaussiano, es posible inferir que mediante la traslación axial del plano del detector esta aproximación puede aplicarse nuevamente. También se puede observar de la misma figura que cuando la distancia focal del elemento bajo prueba es muy pequeña es posible exceder las dimensiones físicas del detector. La solución al problema anterior también se infiere del análisis propuesto y consiste, una vez más, en la traslación axial del plano del detector.

III.3 Resultados Experimentales

Se utilizó un diodo láser polarizado linealmente de 5 mW, ($\lambda = 635\text{nm}$). El perfil del haz fue Gaussiano y se verificó usando un osciloscopio digital de doble canal

Método Simple Para Medir la Distancia Focal de Lentes
 Tektronix TDS 200-210 a una frecuencia de 500 MHz y un perfilómetro de haz Thorlabs
 omega meter Se recomienda utilizar una potencia moderada, para este caso la
 potencia fue de $P=4.48 \text{ mW}$ para evitar la saturación del detector. Se redujo el
 diámetro del haz usando un expansor del haz de 10X y una lente menisco de distancia
 focal de $f = 38.45 \pm 0.05 \text{ cm}$, a $r_0 = 19 \pm 0.95 \mu\text{m}$.

Se utilizó la ecuación (3.5) para medir la distancia focal de varias lentes con
 diferentes características. Las lentes fueron colocadas en la cintura del haz y el
 detector a $z_0 = 10.6 \pm 0.05 \text{ cm}$. La lente se desplazó lateralmente por
 $\Delta x = 0.1 \pm 0.0005 \text{ cm}$. En el caso de la microlente el desplazamiento fue de
 $\Delta x = 0.02 \pm 0.005 \text{ cm}$. La incertidumbre del parámetro $\Delta \xi$ fue de $\pm 0.001 \text{ mm}$. Los
 resultados se muestran en la Tabla 3.1.

	z_0 (mm)	Δx (mm)	$\Delta \xi$ (mm)	$f_{\text{experimental}}$ (mm)	f (otro método) (mm)	Error
Doble Convexa	106.00	1.00	3.00	35.30	36.00	1.86 %
Cilindrica	106.00	1.00	2.50	42.40	44.00	3.60 %
Esférica	106.00	1.00	1.95	54.40	55.00	1.00 %
Preforma	106.00	1.00	20.50	5.17	5.32	2.80 %
Lente Ball	80.00	1.00	14.00	5.71	5.87	2.70 %
Microlente	80.00	1.00	126.00	0.125	0.127	1.50 %

Tabla 3.1 Comparación de resultados experimentales de la distancia focal de diferentes lentes
 utilizando el método simplificado de la Ec. (3.5) con los resultados experimentales obtenidos
 con otros métodos.

Las distancias focales de las lentes que se emplearon se midieron por varios
 métodos [Malacara 1992, Malacara 1994, Optics 2000, Preston 1991, Smith 2000, Díaz
 Uribe 1986, Dickey 2000]. Los valores se muestran en la tabla 3.1 en la columna $f_{\text{(otro$
 método)}}. Se demostró que nuestro método proporciona resultados consistentes con un
 arreglo óptico simple.

Este método puede utilizarse para medir la distancia focal de macrolentes y microlentes.

III.4 CONCLUSIONES

Se describió un método para medir la distancia focal de lentes de cualquier tamaño. La distancia focal se calcula en función del desplazamiento de la mancha transmitida cuando la lente se ha trasladado transversalmente el eje óptico con respecto a la mancha transmitida cuando la lente se encuentra alineada con el sistema de coordenadas. Además se establece en forma analítica que el rango de medición del sistema propuesto puede ser extendido mediante el traslado axial del plano del detector. Lo anterior es resultado del análisis de la distribución de intensidad del haz gaussiano y los cambios en su valor en el rango de traslación para cada uno de los casos (macro o microlentes)

Este método tiene las siguientes ventajas. El arreglo óptico es extremadamente simple para las evaluaciones cuantitativas de la distancia focal. Además, es posible aplicarlo para la medición de la distancia focal de lentes macroscópicas y microscópicas. En la medición de estos parámetros, se utilizaron instrumentos de precisión. Como se demostró la posición de la lente en el eje z no es crítica (microlente). Sin embargo, este método se puede aplicar como un control de posición debido a su alta sensibilidad lateral.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO

IV.1 CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo de la tesis fue proponer un método para determinar la distancia focal para microlentes, Del cual se derivó un segundo método para determinar el valor de este parámetro. Este último método es más simple y se puede aplicar a lentes macroscópicas como microscópicas.

El trabajo se dividió en las siguientes etapas : consideraciones preliminares de la fabricación y caracterización de las componentes ópticas. Se detalló las especificaciones para determinar la distancia focal a este tipo de componentes. Posteriormente se desarrollaron los métodos para calcular la distancia focal.

En la primera etapa se describió la aplicación para la cual fue diseñada la microlente cilíndrica, detallando que se utilizó la región paraxial de esta componente. En esta región se presenta la aberración esférica por lo que se compensó con fabricar las superficies de la lente de forma asférica [Zenteno 1994, Zajac 1986]..

Con respecto a la caracterización de las preformas, las gráficas de ajuste de datos mostraron una correlación aceptable con los resultados teóricos en la zona paraxial que es la de mayor interés. De la misma forma se realizó un proceso igual con la microlente. En este caso se puede observar que los resultados tienen una correlación menor con respecto al teórico esperado. Esto puede ser debido a los esfuerzos mecánicos ocurridos en el proceso de estiramiento de las preformas. De acuerdo con los resultados obtenidos es posible afirmar que se cumplió con el objetivo del trabajo.

En el capítulo 2 se describió un método para medir la distancia focal de microlentes. En el método nuestro objetivo fue reducir el haz del láser para trabajar en la región paraxial de la lente de tal manera que simplificáramos el análisis matemático.

El método involucra la determinación de los siguientes tres parámetros: el semi

ancho de la cintura del haz incidente (r_o), el semi ancho del haz propagado (R_o), a una distancia propagada (z) de la microlente

Este método tiene las siguientes ventajas. El arreglo óptico es extremadamente simple para las evaluaciones cuantitativas de la distancia focal. Como se demostró la posición de la microlente no es crítica. También nos permite usar las diferentes longitudes de onda que son convenientes para muchas aplicaciones como son: colimación de láser de diodo, conexiones de barras de diodo a fibra para aplicaciones en el bombeo de láseres de estado sólido con barras de semiconductores, como componente de facsimil, como colector de energía solar, en computación óptica y comunicación óptica.

En el capítulo 3 se describió un método para medir la distancia focal de lentes de cualquier tamaño. La distancia focal se calcula en función del desplazamiento de la mancha transmitida cuando la lente se ha trasladado transversalmente al eje óptico con respecto a la mancha transmitida cuando la lente se encuentra alineada con el sistema de coordenadas. Además se establece en forma analítica que el rango de medición del sistema propuesto puede extenderse mediante el traslado axial del plano del detector. Lo anterior se deduce del análisis de la distribución de intensidad del haz gaussiano y los cambios en su valor en el rango de traslación para cada uno de los casos (macro o microlentes)

IV. 2 TRABAJO A FUTURO

Sin lugar a dudas la micro-óptica está tomando un gran empuje en la investigación y en la industria óptica. El paso siguiente de nuestro trabajo será continuar con el estudio de analizar las aberraciones en este tipo de componentes. De los métodos presentados se pueden aplicar para medir diferentes regiones de la lente y analizar el funcionamiento completo de la misma.

Se considera la automatización y control del sistema, así como también las aplicaciones industriales como control de posicionamiento de las lentes. Así como también se continuará estudiando los diferentes procesos de fabricación y caracterización de microelementos.

APÉNDICE A

CONSIDERACIONES PRELIMINARES PARA LA FABRICACIÓN DE MICROLENTE

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los diodos láser y la óptica integrada han incrementado el interés en las lentes cilíndricas de alto desempeño, utilizadas para acoplar la luz dentro y fuera de estos dispositivos. Estas lentes son necesarias para colimar el eje óptico de la luz emitida por diodos láser, 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 (Diodo Láser de abertura numérica de aproximadamente 0.5) y debieran estar limitadas por difracción para acoplar la luz de manera óptima dentro y fuera del sistema. 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 tiene las ventajas de que es posible colocar muy cerca del dispositivo óptico integrado debido a su estabilidad y su conveniencia además tiene potencialmente un costo menor que el de las lentes macroscópicas, en particular cuando se contempla su producción a gran escala.

La micro – óptica se está convirtiendo en una parte importante de muchos sistemas ópticos; principalmente, en sistemas que demandan diseño compacto y adecuado factor de forma [Bass, 1995]. Algunas aplicaciones basadas en fibras ópticas incluyen el acoplamiento fibra a fibra, conexiones diodo láser a fibra, conexiones barra de diodos láser a fibras para aplicaciones en el bombeo de láseres de estado sólido con barras de semiconductores, acoplamiento LED a fibra y acoplamiento fibra a detector. En estos casos los arreglos de microlentes son útiles para dar eficiencia radiométrica en arreglos plano-focal, donde la alta abertura numérica (A.N.) de las microlentes enfoca la luz dentro de los elementos detectores individuales. Los arreglos para microlentes pueden usarse también

para sensores de frente de onda, donde se requiere A.N baja. Cada lente se diseña para muestrear el frente de onda de entrada y dar una desviación sobre el plano del detector que es proporcional a la pendiente del frente de onda sobre el área de la microlente. La micro-óptica se emplea para acoplar diodos láser a guías de onda y arreglos colimadores de diodos láser. Un ejemplo de aplicación de gran volumen de la micro-óptica está en el área de almacenamiento de datos, donde el objetivo y lentes colimadores tienen solamente unos pocos milímetros de diámetro [Jenkins-White, 1976].

En este apéndice se reporta las consideraciones preliminares para la fabricación de microlentes con dimensiones transversales del orden de 200 micrómetros y distancia focal del orden de 125 μm . el perfil de estas lentes cilíndricas es hiperbólico por lo que en este trabajo se denominará "lente cilíndrica con perfil hiperbólico".

AI.1 DISEÑO ÓPTICO UTILIZADO

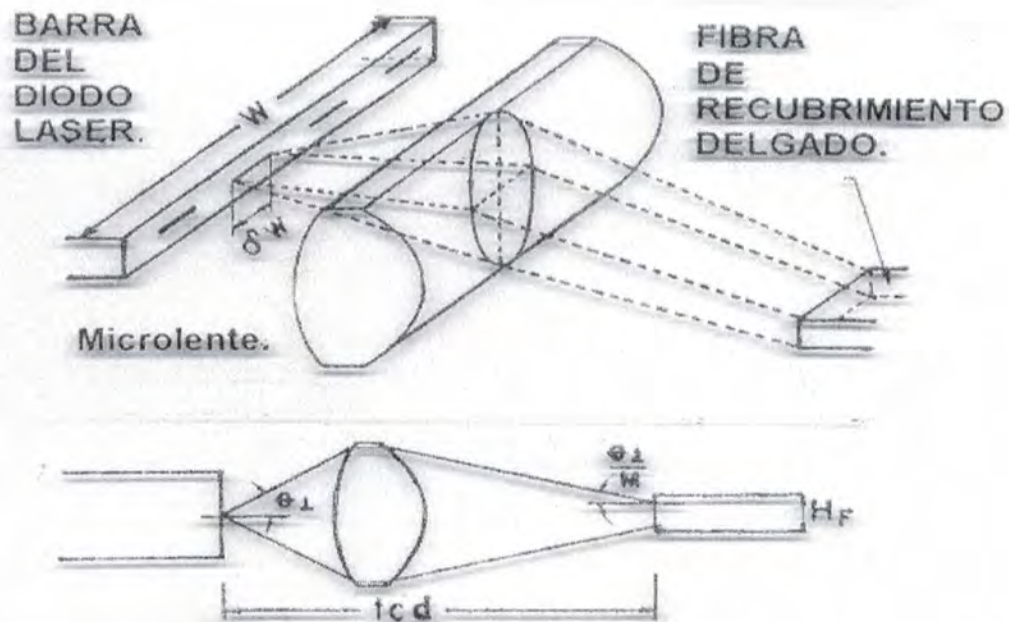
La microlente fue diseñada para colimar un diodo láser o barras de diodo láser con AN del orden de 0.6. Uno de los requisitos que debía cumplir es que fuese cilíndrica, debido a que la fuente luminosa propuesta está constituida por varios diodos láser dirigidos hacia una fibra óptica. La función de la lente es enfocar la luz en un punto dentro de la fibra (Fig. AI.1). Se ha reportado que para un trabajo preciso es esencial que las lentes montadas sean cilíndricas [Begunov, 1976] y que tengan curvaturas muy bien delimitadas (Tabla AI.2). En este diseño la primera curvatura es plana para aplicar el principio de lente de inmersión y acoplar los índices de refracción a la salida del diodo láser y al medio de la microlente. La segunda curvatura debe ser parabólica, elipsoide o hiperboloide para compensar la aberración esférica en el eje. Este hecho es importante también en el momento de estirar la preforma en la torre de extensión, pues así es posible compensar los esfuerzos mecánicos y conservar la forma que se desea obtener del diseño.

Otro aspecto importante es que la lente microscópica tenga una potencia alta y apertura numérica grande para acoplar las geometrías del diodo láser, de la

microlente y de la fibra óptica [Twyman, 1991].

Para la realización de la preforma se utilizó el diseño óptico por Zenteno [Zenteno, 1991]. La Tabla A1.1 muestra las principales características de esta lente.

Los detalles de este diseño se encuentran en el reporte técnico "Descripción del diseño de la microlente", CIO 1998 [Camacho, 1998].



A1.1 Esquema del transformador geométrico. El dibujo muestra la fuente, la cual es una barra de diodo láser, la microlente cilíndrica colecta la luz de la barra del diodo láser y la fibra rectangular, el recubrimiento delgado recibe la luz.

NOMBRE DEL PARAMETRO	VALOR NUMÉRICO
Radio de curvatura para la superficie 1.	0.21 mm
Constante de conicidad para R_1 (K_1)	-13.79
Radio de curvatura para la superficie 2.	-0.09 mm
Constante de conicidad para R_2 (K_2)	-1.83
Índice de refracción del vidrio LASF-N-09	1.84
Distancia focal efectiva	0.09 mm
Foco posterior	0.33 mm
Espesor	0.10 mm
Distancia objeto – primera superficie de la lente	0.07 mm
Distancia imagen	0.33 mm
Distancia imagen – objeto	0.50 mm
Amplificación transversal	-3.03
Abertura numérica	0.64
Altura de la lente	0.19 mm
#f	0.78

TABLA AI.1 Parámetros del diseño de la microlente.

De acuerdo con la Tabla AI.1, el valor de la constante de conicidad de la primera y segunda superficie indica que las superficies tienen forma hiperbólica. El vidrio sugerido en el diseño es el LASF-N-09 de la marca Schott, con índice de refracción $n_c = 1.8425$ [Schott, 1989]. Esta lente se considera gruesa ya que la distancia entre los vértices de las dos superficies refractoras (0.10 mm) no es despreciable comparada con el diámetro (0.19 mm).

Para calcular la distancia focal (f) puede utilizarse la expresión para los puntos conjugados [Zajac, 1986],

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f}, \quad (\text{A1.1})$$

donde las distancias entre la lente y el objeto (S_o) y la imagen (S_i) se miden desde el primero y segundo plano principal del elemento óptico respectivamente. En esta ecuación la distancia focal efectiva (f) se mide con respecto a los planos principales. Esta se puede determinar utilizando la ecuación, [Zajac, 1986],

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = (n_1 - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n_1 - 1)d}{n_1 R_1 R_2} \right], \quad (\text{A1.2})$$

donde S_o es la distancia objeto, S_i es la distancia imagen, n_1 es el índice de refracción del vidrio, d es el espesor, R_1 es el radio de curvatura de superficie 1 y R_2 es el radio de curvatura de superficie 2.

Sustituyendo valores en las Ecs. (A1.1) y (A1.2), se obtiene que la distancia focal efectiva, es $f = 0.09$ mm.

El diagrama de la microlente y su trazo de rayos de la lente cilíndrica con perfil hiperbólico se muestra en la Fig. A1.2. La Fig. A1.3 muestra el esquema obtenido del programa Eikonal [Eikonal, 1994], utilizando los valores de la Tabla A1.1.

La Fig. A1.4 (a) y (b) muestra la forma teórica de la superficie R_1 y R_2 de la microlente del diseño, incluyendo todos los términos de los coeficientes de asfericidad.

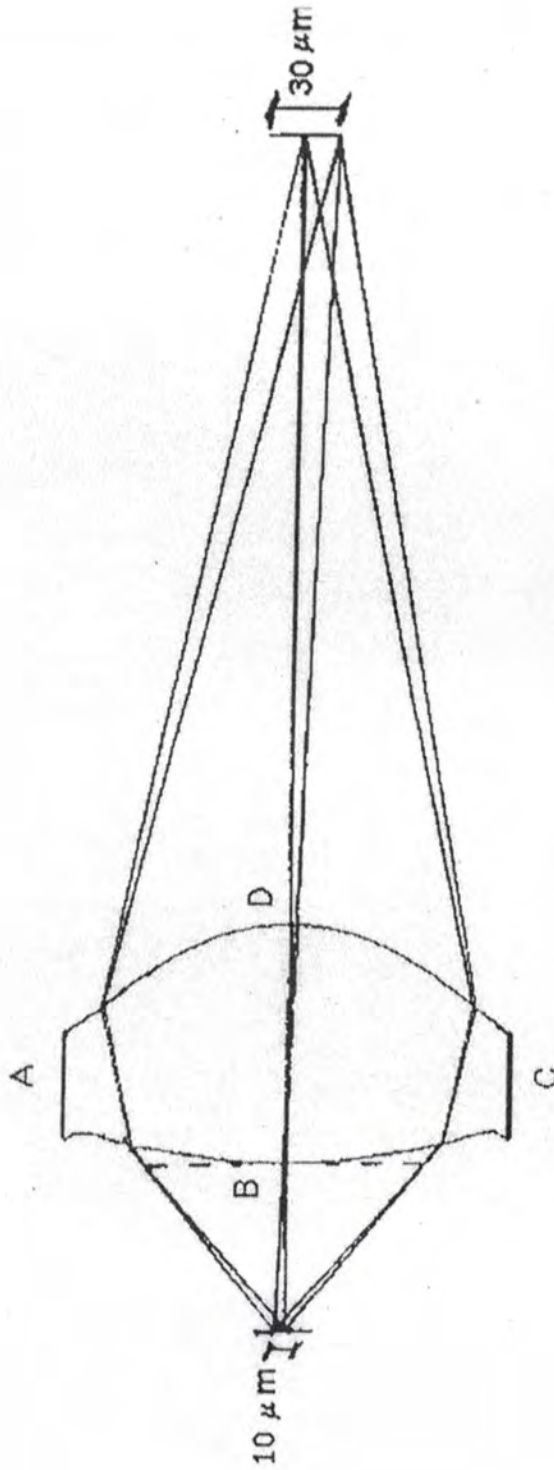


Fig.A1.2 Diseño y Trazo de Rayos de Lente Cilíndrica con Perfil Hiperbólico.

En la fig. A1.2 se muestra la escala que se utilizó, la cual fue de 0.05 cm para 2 cm. También se puede observar el tamaño de la fuente o campo de visión que fue de $10\ \mu\text{m}$ y el tamaño de la imagen la cual fue de $30\ \mu\text{m}$. Así también se determinó la altura o diámetro como AC y el ancho o espesor como BD.

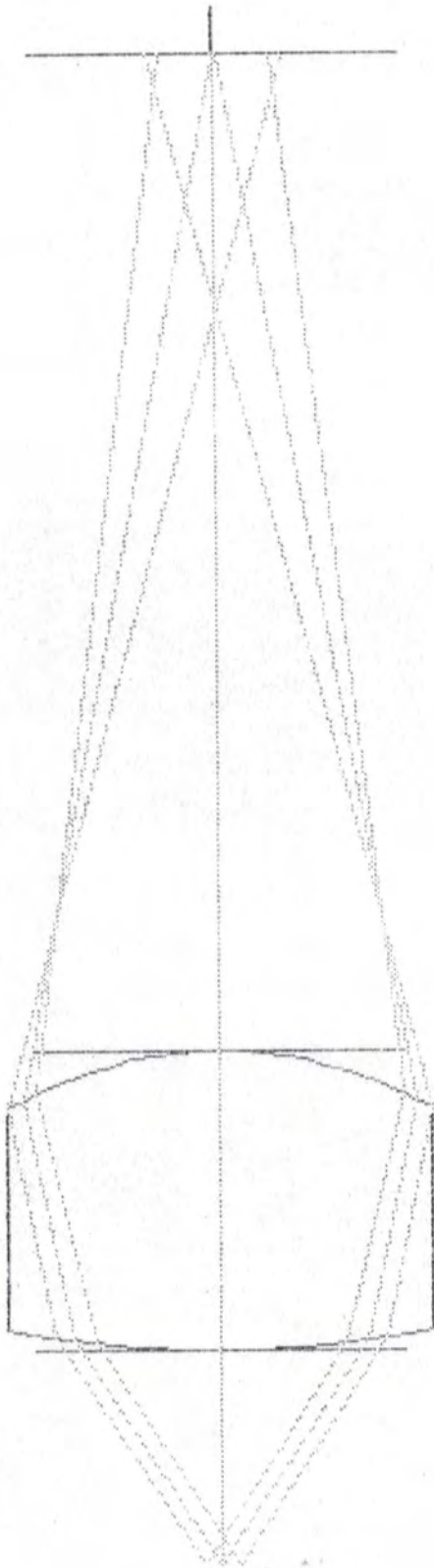


Fig A1.3 Diseño y trazo de Rayos de Lente Cilíndrica con Perfil Hiperbólico obtenido del programa Eikonol.

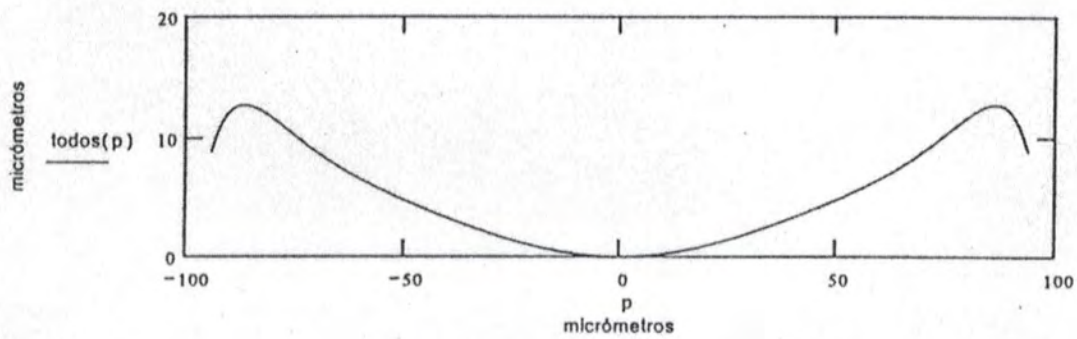


Fig. Al.4 (a) Gráfica que muestra la forma teórica de la primer superficie de la microlente.

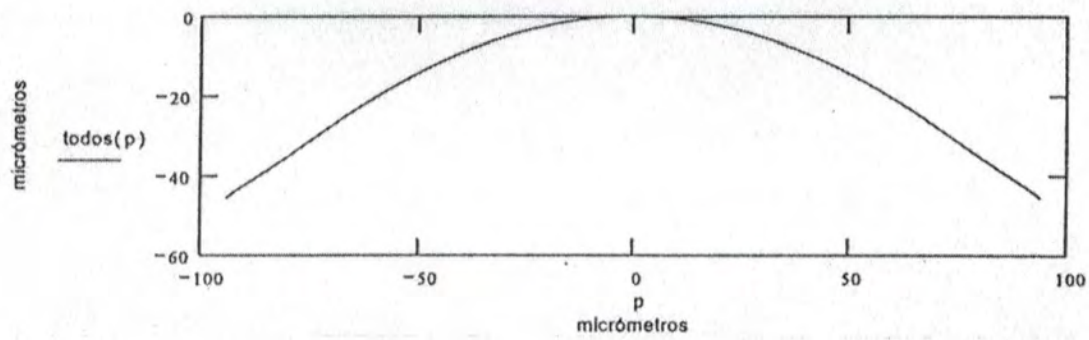


Fig. Al.4 (b) Gráfica que muestra la forma teórica de la segunda superficie de la microlente

APÉNDICE B

FABRICACIÓN DE PREFORMAS Y MICROLENTE CILÍNDRICAS [CON PERFIL HIPERBÓLICO]

INTRODUCCIÓN

La fabricación tradicional de componentes ópticas es el arte de producir superficies esféricas con una gran precisión usando materiales comunes y técnicas relativamente simples aplicadas de una manera consistente [Parks, 1990]. Las técnicas de fabricación desarrolladas recientemente pueden producir superficies esféricas y asféricas. Estas técnicas son costosas sin embargo con ellas es posible obtener precisiones similares.

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 computadora y kinoformas [Snyder, 1991]

En este apéndice se 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 μm . 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 μm .

Para fabricar la microlente descrita anteriormente se fabricó en primer lugar una preforma con la misma forma de la microlente escalada en un factor que en este caso particular y debido a la experiencia con este tipo de vidrios fue de 62 veces el tamaño de la microlente. Posteriormente esta preforma se estiró utilizando el método de fabricación de fibras ópticas para obtener la microlente

deseada. La Fig. B.1 muestra las dimensiones del corte transversal de la preforma cilíndrica.

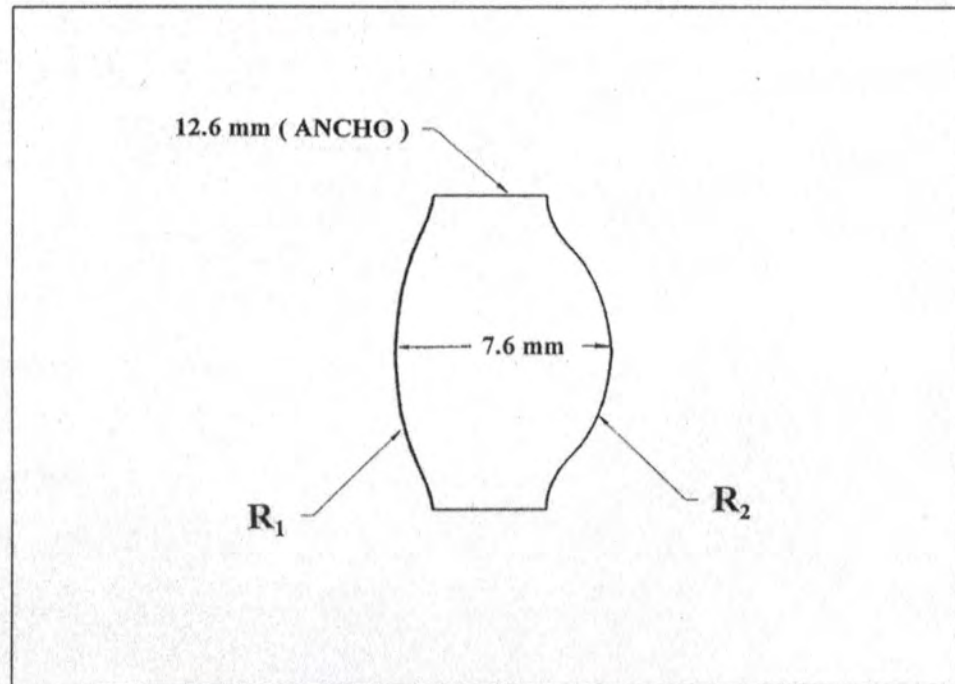


Fig. B.1 Sección transversal de la lente cilíndrica. Para la microlente cilíndrica, el diámetro es $208 \mu\text{m}$ y el espesor es $121 \mu\text{m}$. Para la preforma cilíndrica el diámetro es de 12.6 mm y el espesor es de 7.6 mm.

La tabla B.1 muestra los parámetros principales de la preforma (diseño).

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, del vidrio LASF-N-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	7.32 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

En este apéndice se describe el proceso para la fabricación de la preforma que se divide en las secciones siguientes: Descripción del material empleado,

generado de la superficie óptica y los procesos de esmerilado y pulido de preformas. 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 $8 \mu\text{m}$.

B.1 PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE PREFORMAS

Para la fabricación de las preformas (con vidrio LASF-N-09) y las herramientas necesarias (fabricadas con vidrio BK-7) [Schott, 1989] se cortaron bloques de vidrio con una sierra circular [Strasbaugh]. Para verificar la planicidad y el escuadramiento de estos bloques se utilizó la maquinaria generadora de planos ópticos [LOH]. Las dimensiones finales de los bloques fueron: ancho 12.6 mm X espesor 9.0 mm X longitud 250 mm , con una incertidumbre de ± 0.05 . (Fig. B.2)

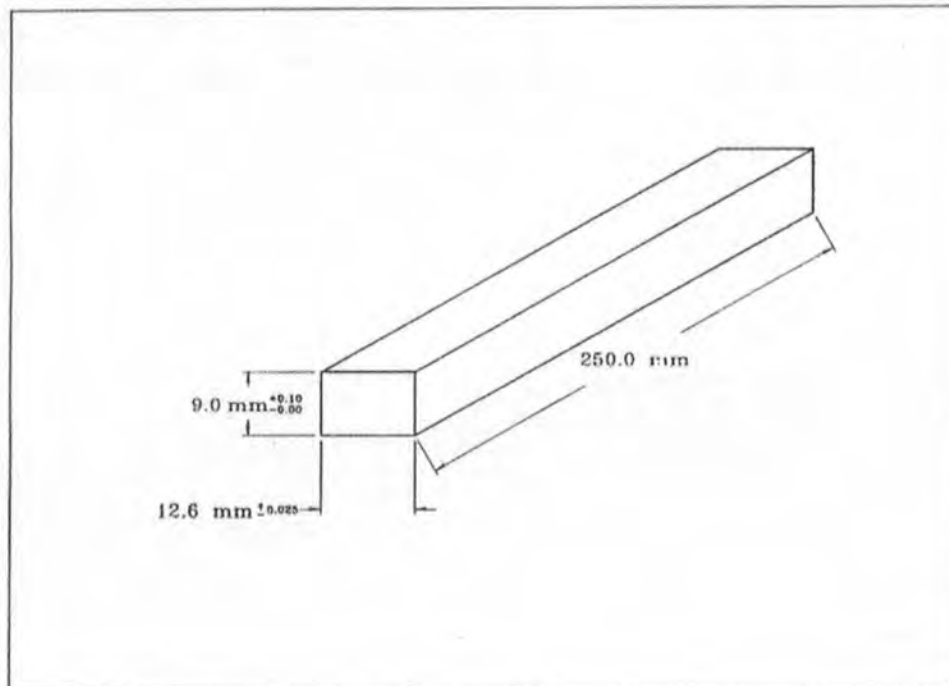


Fig. B.2 Especificación de los bloques para la Fabricación de Lentes. Estos bloques se utilizaron para herramientas ópticas de esmerilado y pulido. Además sirvieron como soporte y pieza auxiliar de alineación. Los vidrios empleados fueron LASF-N-09, SF-15 y BK-7.

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:

- a) Placa de acero rectificada, empleada para rectificar las dos primeras caras de los bloques de vidrio y rebajarlos al espesor requerido.
- b) Herramientas para escuadrar los bloques de vidrio. La Fig. B.3 muestra la colocación del bloque en esta herramienta así como de sus dimensiones.

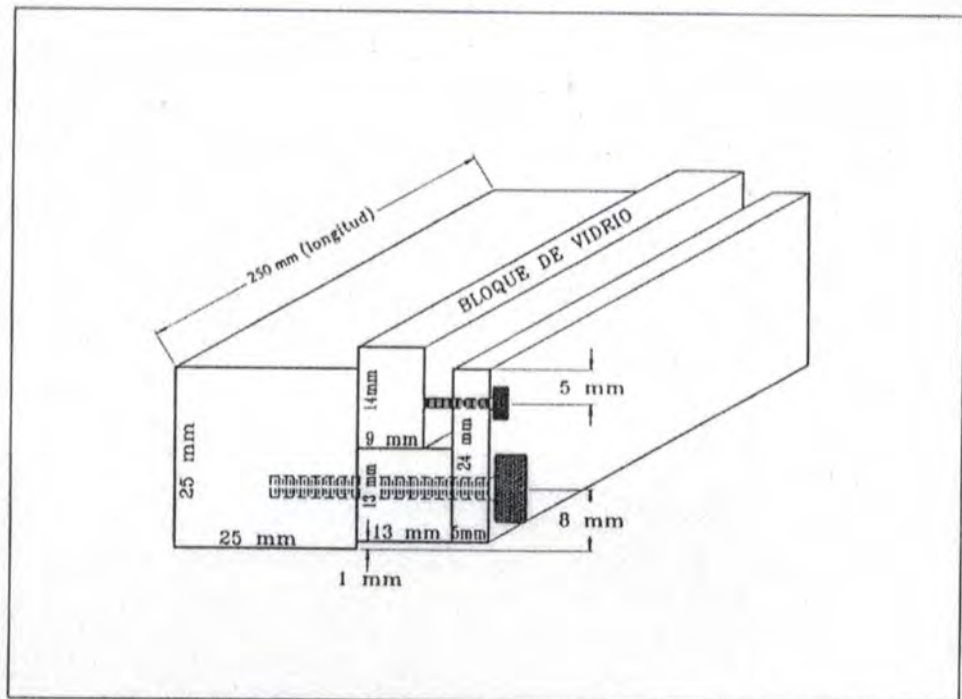


Fig. B.3 Aditamento para escuadrar el bloque de vidrio.

- c) Herramientas de aluminio con canales presentando sus paredes con ángulos de 30° , ver Fig. B.4a y B.4b. La finalidad de esta herramienta es la de eliminar el exceso de material en los bordes de los bloques de vidrio. La Fig. B.4b muestra la colocación del bloque de vidrio en esta herramienta.
- d) Sujetador metálico-óptico de la preforma utilizada para el generado óptico en la sierra [Strasbaugh]. Este sujetador está constituido por una barra de acero y barra sostenedora fabricada con el vidrio BK-7, como se muestra en la Fig. B.5
- e) Para realizar el esmerilado de las preformas, fue necesaria la fabricación de guías de acero, Fig. B.6a y B.6b. El objetivo de estas guías es el de mejorar el acoplamiento entre la preforma y la herramienta de esmerilado fabricada con vidrio BK-7.
- f) Herramientas fabricadas con vidrio BK-7 para el esmerilado y pulido de la preforma, soporte y auxiliar para su alineación.

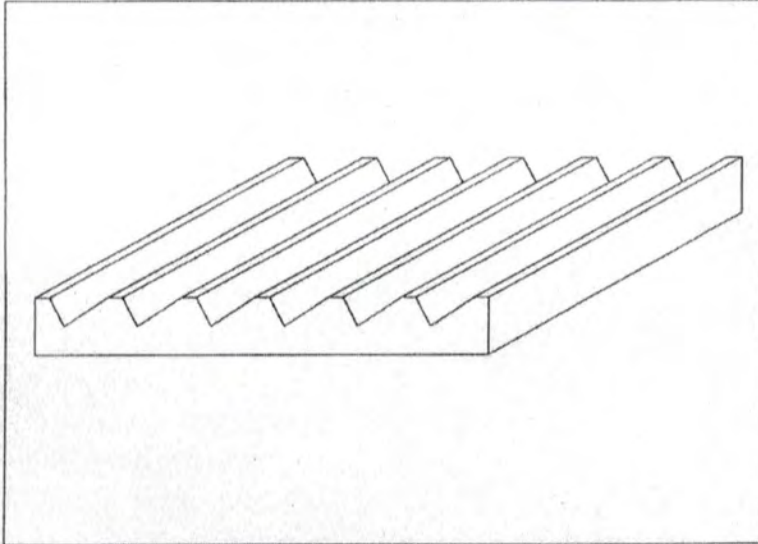


Fig. B.4a Herramienta de aluminio con canales con ángulos de 30° (herramienta de prismas)

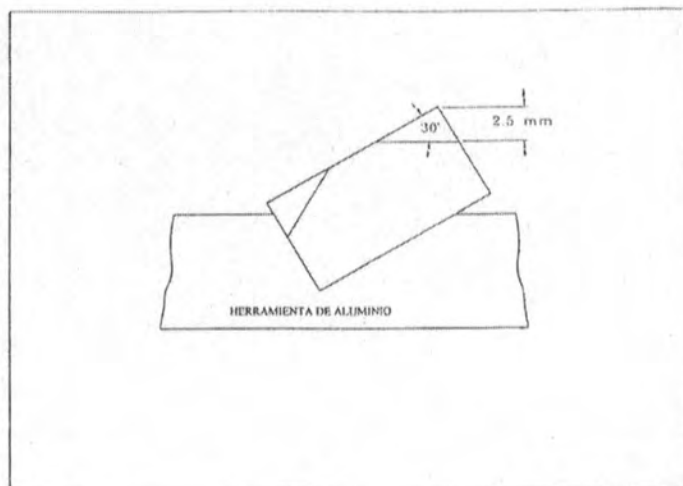


Fig. B4.b Colocación del bloque de vidrio en la placa de aluminio (herramienta de prismas)

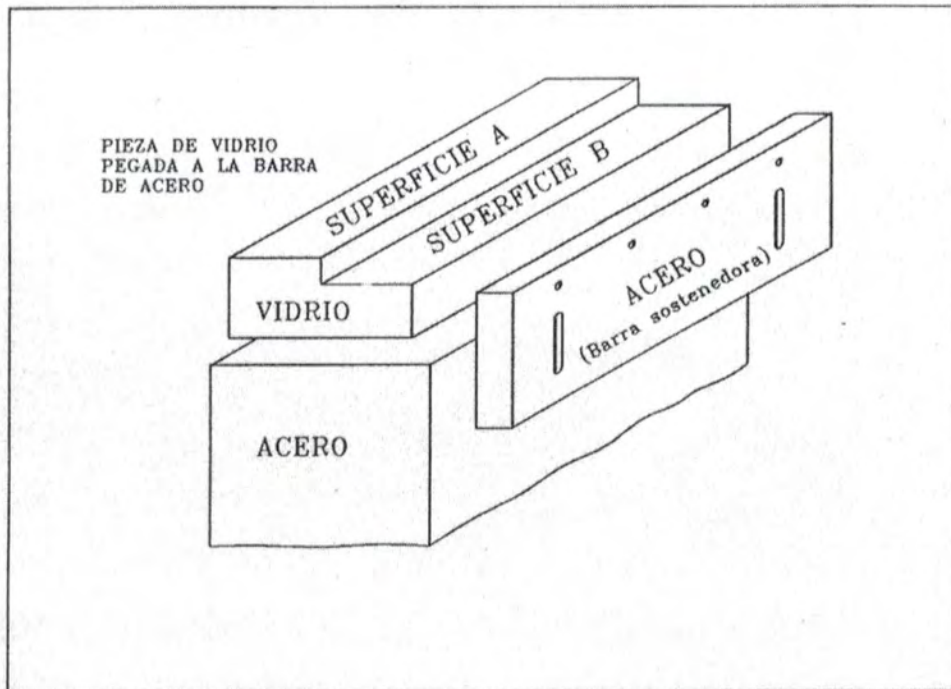


Fig. B.5 Aditamento para sostener y sujetar el bloque de vidrio

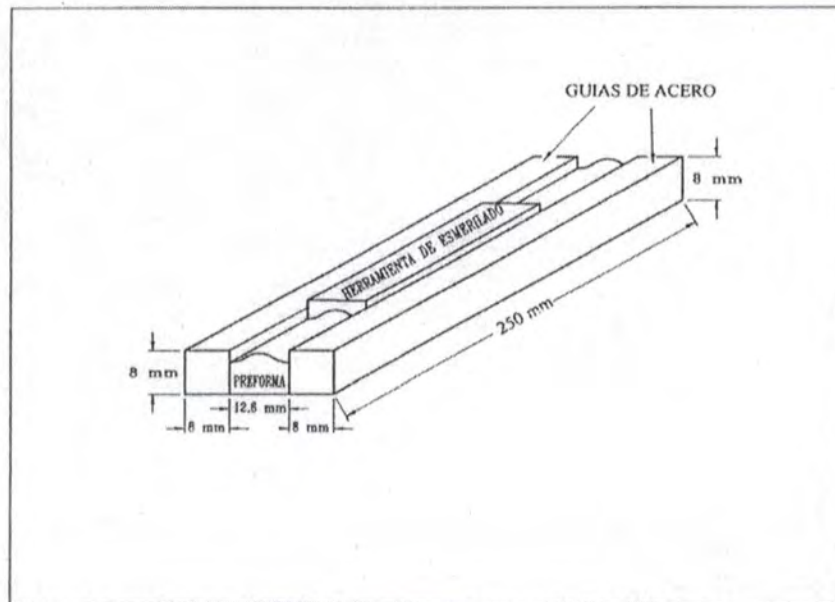


Fig. B.6 a Guías de acero para realizar el esmerilado de la preforma en la superficie R₁.

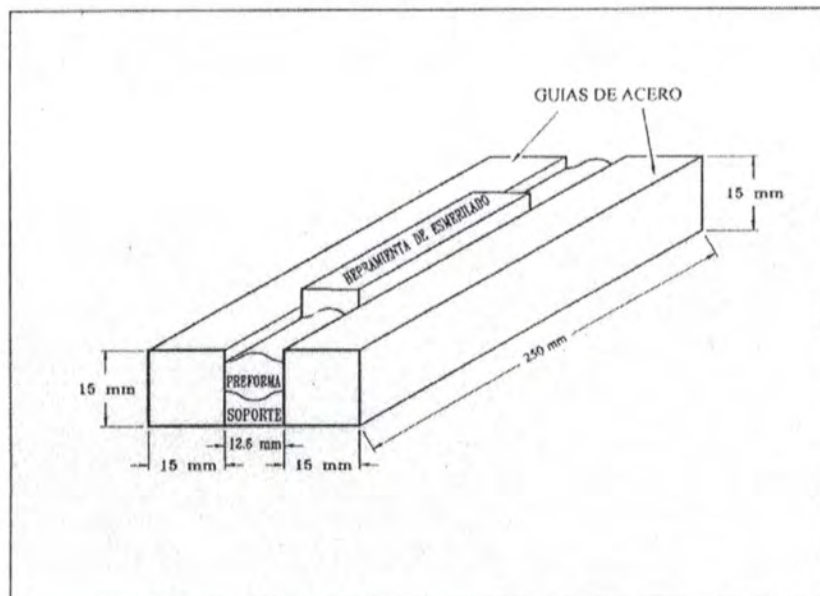


Fig. B.6 b Guías de acero para realizar el esmerilado de la preforma en la superficie R₂.

B.I.1 Ruedas o herramientas con película de diamante

La fabricación de superficies ópticas utilizando el método “torneado con diamante” es relativamente nueva comparada con los métodos tradicionales de pulido óptico. En términos de geometría y movimientos requeridos para este proceso, el proceso de torneado con diamante es similar a la etapa de generación utilizada en los métodos en la fabricación óptica tradicional. La diferencia principal está en que el método no requiere pulido tradicional.

Entre las ventajas del torneado con diamante están [Bass, 1995; Karow, 1993; Parks, 1990]:

- Reducción de tiempo de operación y el mejor acabado en la superficie [Bass, 1995].
- La 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
- Fabricación de formas dúctiles de hacer 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 de manera 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. 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:

- a) Herramienta cóncava para la superficie R_1 (lente).
- b) Herramienta convexa para la superficie R_1 .
- c) Herramienta cóncava para la superficie R_2 (lente).
- d) Herramienta convexa para la superficie R_2 .

La Fig. B.7 y B.8 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.

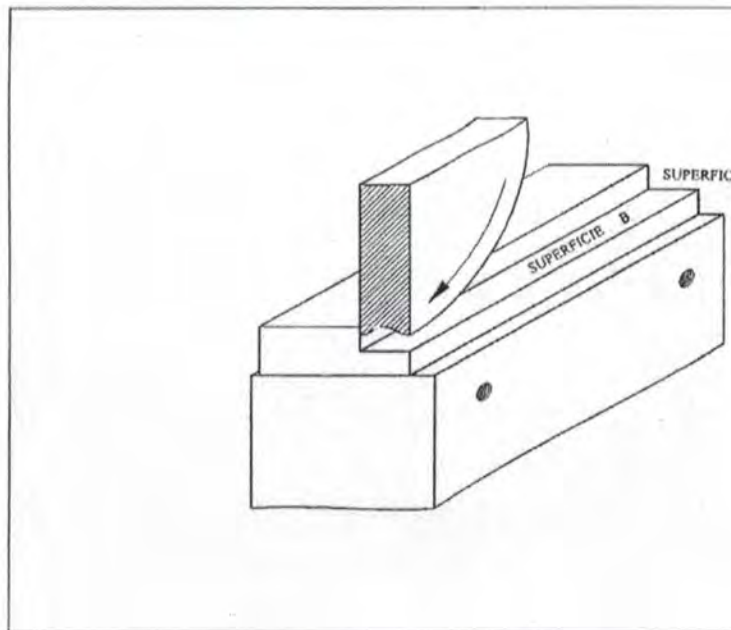


Fig. B.7 Alineación de la herramienta con película de diamante

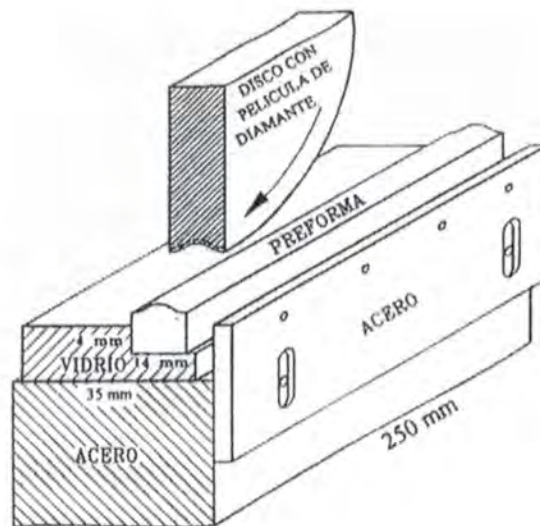


Fig. B.8 Aditamento o accesorio para generar la superficie en la primera cara de la preforma

B.2 PROCEDIMIENTOS DE ESMERILADO Y PULIDO DE LA PREFORMA

Las herramientas ópticas de esmerilado fueron fabricadas con el vidrio BK-7, se utilizó la herramienta convexa con película de diamante para generar la superficie cóncava R_1 y R_2 . La preforma se colocó entre las guías de acero (Fig. B.8a y B.8b) y con la herramienta cóncava, se esmeriló la superficie. Se utilizaron tres tipos diferentes de esmeriles con diferentes denominaciones. En primer lugar el WCA $25 \mu\text{m}$ (white calcined aluminum oxide), posteriormente el WCA $15 \mu\text{m}$ rebajando 0.08 mm del grosor. El esmerilado final se realizó con WCA $5 \mu\text{m}$ conservando la rotación de la herramienta y rebajando 0.04 mm . Después de esmerilar la primera cara, se procedió a trabajar la segunda, adhiriendo la cara esmerilada de la preforma sobre una herramienta óptica cóncava de esmerilado, asegurándose que no se formara una cuña entre las dos superficies. El espesor final de la preforma esmerilada fue de $7.62 \pm 0.01 \text{ mm}$.

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.

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

Observamos que es difícil pulir la superficie R_2 con una sola herramienta que es necesario realizar este procedimiento en tres pasos. La brea 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.

B. 3 FABRICACIÓN DE LAS MICROLENTES

El vidrio utilizado para la fabricación de la preformas es el LASF-N-09 de la marca Schott [Schott, 1989], 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 [Camacho, 1999]. 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 [Snyder, 1991; Nérou, 1991].

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 periodo 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 o 0.3 μm [Sterling, 1987]. Este proceso

se verificó continuamente con un microscopio. La Fig. B.9 muestra el esquema de la máquina para la formación de la microlente.

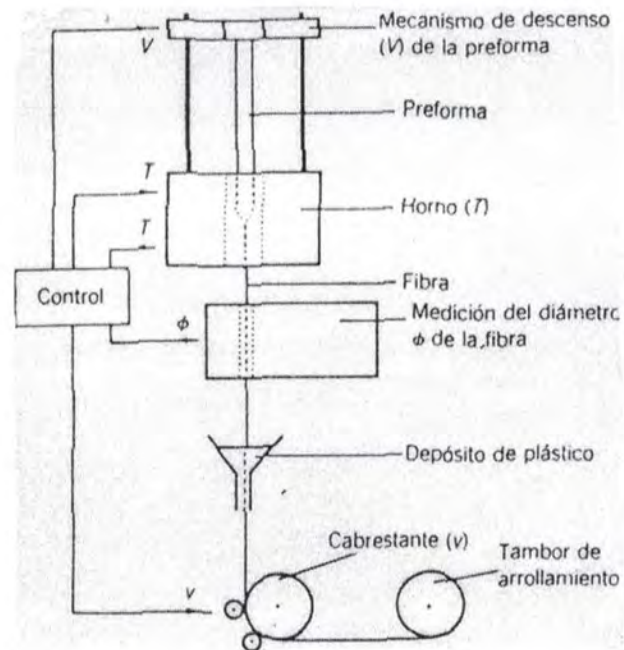


Fig. B.9 Esquema de la máquina para la formación de la microlente. El diámetro ϕ de la fibra se mantiene constante mediante el control de la velocidad de formación v , de la velocidad de descenso de la preforma V y de la temperatura del horno T . Las mediciones de T y de v se utilizan para este control.

B.4 CONCLUSIONES

En este apéndice se describió el proceso de fabricación de las preformas para la obtención de microlentes cilíndricas. Para este fin se presentan los mecanismos utilizados para la elaboración de la preforma, la cual después de un proceso de estiramiento da lugar a la elaboración de la microlente. Se presentaron también las pruebas para realizar la caracterización de las preformas y microlentes midiendo la forma de la curvatura y comparándolas con las del diseño original.

Con respecto a la fabricación de las preformas es posible señalar algunos puntos importantes para obtener preformas de buena calidad:

- a) En el corte de los bloques de vidrio para generar las preformas es necesario respetar escrupulosamente el escuadramiento y planicidad de éstos.
- b) Verificar la correcta alineación de la sierra "Strasbaugh" para la obtención del generador de las curvas esféricas de las preformas. Motivo por el cual se construyeron los aditamentos de vidrio BK-7.

El torneado con la herramienta con película de diamante nos facilitó la generación de estas formas esféricas, así como también el esmerilado y pulido de las preformas.

En el proceso de esmerilado se emplearon herramientas ópticas fabricadas con el vidrio BK-7. Este vidrio se utilizó debido a su bajo costo y a las propiedades físicas y mecánicas debido a que ofrece menor desgaste a la película de diamante.

Los materiales utilizados en el proceso de pulido fueron: el poliuretano, el pitch y el paño. Con cada uno se realizaron pruebas para obtener mejor rendimiento en tiempos y eficiencia. El paño mostró un mejor acabado en las superficies en menor tiempo.

Referencias

Abitbol M. Eisenberg N. "A New Process For Manufacturing Arrays of Microlenses on Various Substrates". SPIE 1334 , Current Developments in Optical Engineering IV pp. 110 (1990).

Autocad user´s , Release 13c4 (1996)(2001).

Bass Michael. Handbook of Optics /sponsored by the Optical Society of America; editor in chief, - 2nd ed. Vol. 1 Geometric Optics, General Principles Spherical Surfaces, New York (1995).

Bass Michael Handbook of Optics, Sponsored by the Optical Society of America; Editor in chief, - 2nd ed. Vol. II Devices, Measurements & Properties.pág. 7.1.(Ap.B)

Begunov B. N., Zakaznov P. N. Teoría De Sistemas Ópticos, Ed. Mir, pág. 16 - 17(1976).

Bevington R. Philip and Robinson D. Keith, Data Reduction Error Analysis for the Physical Science, Mc. Graw Hill. (1992).

Borrelli F. Nicholas, *Micro-Optics Technology Fabrication and Applications of Lens Arrays and Devices*, Marcel Dekker Inc (1999)

Born M. and Wolf E., Principles of Optics, Pergamon Press, New York (1975).

Bouchaud and J. A. Cogno "Automatic method for measuring simple lens power" Appl. Opt. 21, 17 (1982).

- Calixto S., Malacara Z. "Micromirror fabrication using dye-doped plastic" *Opt. Eng.* **37** 2320-2323 (1998).
- Camacho P. Alma A. "Análisis Del Diseño De La Microlente", Reporte Técnico del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., CIO, (1998).
- Camacho P. Alma A. y Solano C. "Fabricación y Caracterización de Microlente Cilíndricas con Perfil Hiperbólico", Reporte Técnico del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., CIO, (1999).
- Camacho P. A.A, Solano C., Cywiak M., Martínez G, and Baltazar R., "Method for the determination of the focal length of a microlens" *Opt. Eng.* **39**, pp. 2149 - 2152 (2000).
- Cohen D., Little B. and Lecke F., "Techniques for measuring 1 μ m diam Gaussian Beams", *Appl. Opt.* **23**, 637-640 (1984).
- Diaz-Uribe R., Pedraza-Contreras J., Cardona-Nuñez, O. Cordero-Davila A. and Cornejo-Rodriguez A., "Cylindrical lenses: testing and radius of curvature measurement" *Appl. Opt.* **25**, 1707-1709 (1986).
- Dickey M. Fred and Holswade C. Scott. *Laser Beam Shaping, Marcel Dekker Inc, "C (2000)*
- EIKONAL, Annotated Comand Codes, J.I. Rayces Consulting, Inc., (1994)
- Erdmann L. and Kowarschik R.. "Testing of refractive silicon microlenses by use of a lateral shearing interferometer in transmission" . *Appl. Opt.* **37**, 676 – 682, (1998).

- Firester A.H., Heller M.E. and Sheng P., "Knife-edge scanning measurements of subwavelength focused light beams", *Appl. Opt.*, **16**, 1971-1974 (1977).
- Fisher E. Robert & Tadic-Galeb Biljana "Optical System Design" SPIE press – Mc. Graw Hill Optical Engineering (1997)
- Goodman J. W., Introduction to Fourier Optics, second edition Mc. Graw Hill, New York (1994).
- Grubman R. and Potenza B., "Beam correction in laser diodes: efficiency is the key" *Photonics Spectra Design & Solutions*, Photonics February 135-138 (1999).
- Herzig Peter Hans, *Micro-Optics, Elements, systems and applications*, Taylor & Francis (1997).
- Horst, S., Falkenstörfer O., Lindlein N. and Schwider J., "Characterization of microlenses using a phase shifting shearing interferometer" *Opt. Eng.*, **33**, 2680-2686 (1994).
- Jenkins A. Francis, White E. Harvey, Fundamentals of Optics. Fourth Ed. Mc Graw Hill p.156 (1976)
- Juan Liu, Bi-Zhen Dong, Ben-Yuan Gu and Guo-Zhen Yang, "Entirely electromagnetic analysis of microlenses without a beam shaping aperture", *Appl. Opt.* Vol **40**, pp. 1686 – 1691 (2001).
- Karow H. Hank, Fabrication Methods for Precision Optics, Wiley - Interscience Publication 4.3 Diamond Tool Specifications pág 301 (1993).

Kubo M. and Hanabusa M. "Fabrication of Microlenses by laser chemical vapor deposition". Appl. Opt. **29**, 2755 – 2759 (1990).

Laures P., "Geometrical Approach to Gaussian Beam Propagation", Appl. Opt. ,**6**, 639 – 646 (1967).

Máquina generadora de planos ópticos, LOH, Spheromatic plano for generating plano surfaces, (LOH Optikmaschinen KG, Germantown, W.I USA) p.6

Malacara D. and Malacara Z. *Handbook of Lens Design*, Marcel Dekker Inc, "Optical Surfaces, Ray Tracing and Wavefront Shape calculation" 45, New York (1994).

Malacara D., *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc New York (1992).

Mathcad User's Guide, Mathcad 7 Professional, Mathcad 7 Standard (1997).

Melles Griot, Manual de Optica, Opto-mecánico, láseres e instrumentos (1995-96)

Milonni P.W, Eberly J.H LASERS, Chapter. 14 Lasers Resonators, 14.5 Gaussian beams, 484, New York (1988).

Nérou, Jean Pierre, Introducción a Las Telecomunicaciones por Fibras Ópticas, Trillas pág.105 (1991).

Optics and Optical Instruments Catalog, Edmund Industrial Optics (2000).

Parks E. Robert non Traditional Optical Fabrication Methods Univ. of Arizona Short Course Notes, SPIES.s 1990 Annual International Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science & Engineering San Diego, California, USA. (1990).

.Pfeil B.V, Messerschmidt B., Blümel V., Possner U. and Possner T.. "Making fast cylindrical gradient-index lenses diffraction limited by using a wave-front correction element". *Appl. Opt.* **37**, 5211-5215 (1998).

Preston D., Dietz E.R, *The Art of the Experimental Physics*, John Wiley, N.Y. (1991).

Schott Optical Glass, Throughout the world of Quality optics, Glass Technologies Inc. (1989).

Sierra circular marca Strasbaugh, modelo 100.

Smith J. Warren, "Component Choices: Avoiding Tolerancing Mistakes" Kaiser Electro-Optics Inc., *The Photonics Design and Applications Handbook* (2000).

Snyder J. James, Reichert Patrick, and Baer M. Thomas "Fast Diffraction Limited Cylindrical Microlenses." *Appl. Opt.* **30**, 2743, (1991).

Sterling, Jr. Donald J. Technician's Guide to Fiber Optics, Delmal Publishers, Inc, (1987).

Sturm V., Treusch H., and Loosen P., "Cylindrical microlenses for collimating high-power laser", *SPIE Proc.*, **3097**, 717-726 (1997).

Stuns E., "Measuring the Spot Size of a Gaussian Beam with an Oscillating Wire", *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-16**, 1298-1299 (1980).

Taylor J. R An Introduction to Error Analysis. The Study of Uncertainties in Physical Measurements Second Edition University Science Books . 77-79 New York (1997).

Twyman F. Optical Glassworking Hilger & Watts Ltd., 115 – 116 (1991).

Universal Photonics, INC, Advanced Surficing Products and Technology, Diamond Products, Diamond Wheels, pág 47.

Welford W.T., Aberrations of Optical Systems Adam Hilger, 241-246 Bristol, (1986).

Williams Thomas & Kelley Colin Gnuplot, An Interactive Plotting Program (1993).

Wuand H., Barnes F. , Eds. Microlenses, Coupling Light to Optical Fibers, Part 3 Fabrication, Techniques, IEEE Lasers and Electro-Optics Society Series, W.E. Smith Series Editor, (1991).

Zajac Alfred, Hecht Eugene, Óptica, Fondo Educativo Interamericano S.A., pág 177 (1986).

Zeiss Carl Inc, U-soft User's Guide IMT Division (1992).

Zeiss Carl Inc Máquina para la Medición de Coordenadas, IMT División modelo SYS DCC, C400 1518-12 Part # 126-6275, Serial # CMM 940102121.

Zeiss Carl Inc. Centro Nacional de Metrología (CENAM) Máquina de Medición por Coordenadas Curso (1995).

Zenteno L.A . "Design of a device for pumping a double-clad fiber laser with a laser-diode bar," Appl. Opt **33**, 7282-7287, (1994).

Zenteno S. Luis.A. "Lens Data Specification" pág. 6 – 19 (1991)