



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Generación, esmerilado y pulido de superficies ópticas con el método de pulido tradicional.

Dr. Pedro Cebrian Xochihuila

Dra. Martha Rosete Aguilar

Dr. Neil C. Bruce Davidson

22 de febrero del 2018

Desarrollo

Centro de Ciencias Aplicadas y desarrollo Tecnológico CCADET-UNAM

Interno, PAPIIT

Título: Generación, esmerilado y pulido de superficies ópticas

Autores: Dr. Pedro Cebrian Xochihuila, Dra. Martha Rosete Aguilar y Dr. Neil C. Bruce Davidson

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Resumen

De manera general, se describen los procesos que principalmente deben desarrollarse en un taller de óptica para la fabricación de superficies o componentes ópticas mediante el método tradicional de pulido, así como también los diferentes tipos de materiales que se utilizan para desarrollar dicho trabajo. Cabe mencionar que para fabricar óptica de alta calidad o alta precisión, no basta solo con desarrollar adecuadamente los procedimientos descritos, de manera que depende fuertemente de la experiencia adquirida a través del tiempo, del trabajo continuo y de la destreza del técnico que realiza dicha labor.

Índice

Introducción

1	Capítulo 1. Consideraciones generales.....	5
1.1	Procesos de fabricación.....	5
1.2	Medidas de seguridad.....	5
2	Capítulo 2. Corte del vidrio.....	6
2.1	Preparación del vidrio.....	6
2.2	Uso de la sierra eléctrica.....	6
3	Capítulo 3. Redondeado del vidrio.....	7
3.1	Fijación del vidrio.....	7
3.2	Devastado de las esquinas del hexágono.....	8
4	Capítulo 4. Generación de radios de curvatura.....	9
4.1	Determinación del ángulo de inclinación de la broca.....	10
4.2	Medición del radio de curvatura.....	10
5	Capítulo 5. Esmerilado de la superficie.....	10
5.1	Preparación del abrasivo.....	10
5.2	Procedimiento del esmerilado.....	11
5.3	Máquina del esmerilado.....	11
6	Capítulo 6. Pulido de la superficie.....	12
6.1	Interferómetro de Newton.....	13
6.2	Prueba de Ronchi.....	14
6.3	Interferómetro de Fizeau.....	16

Conclusiones.....17

Agradecimientos.....17

Anexo A.....18

Referencias bibliográficas.....19

Introducción

El trabajo que se describe en este reporte, es el resultado de la capacitación que realicé en el Laboratorio de Manufactura de Componentes Ópticas del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), y tiene la finalidad de servir como un texto de apoyo para el lector en el tema de fabricación de superficies o sistemas ópticos, mismo que se desarrolla en el Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos (LUFABEO) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico CCADET de la UNAM.

Actualmente no existe bibliografía que describa a detalle cada uno de los procedimientos que deben desarrollarse paso a paso para la fabricación de superficies ópticas de alta calidad, esto se debe en gran parte a que existen muchas variables a lo largo de todo el proceso, y que el control de cada una de ellas depende principalmente de la experiencia y destreza del técnico que realiza dicho trabajo. A medida que la exigencia de la calidad óptica de las superficies aumenta, también es necesario tomar en cuenta los factores ambientales como la temperatura y la humedad principalmente, ya que estas influyen fuertemente en la precisión alcanzada en la fabricación de superficies o sistemas ópticos.

1 Consideraciones generales

Uno de los primeros aspectos que se deben considerar y revisar antes de comenzar a fabricar cualquier elemento o sistema óptico son los parámetros del diseño y las tolerancias de dichos parámetros. Por ejemplo, en la Figura 1 se muestra una lente simple bicóncava, donde los parámetros son: los radios de curvatura R_1 y R_2 de cada superficie, el grosor del centro de la lente L_1 y el grosor de la orilla L_2 y el diámetro D de la superficie, la tolerancia se refiere en la precisión de los valores de estos parámetros. Entonces, dados estos parámetros, el técnico debe considerar cada uno de los procesos de fabricación por los que debe pasar la superficie o elemento óptico con el propósito para que al fin de la producción cumpla con los requerimientos del diseño y con la calidad óptica requerida.

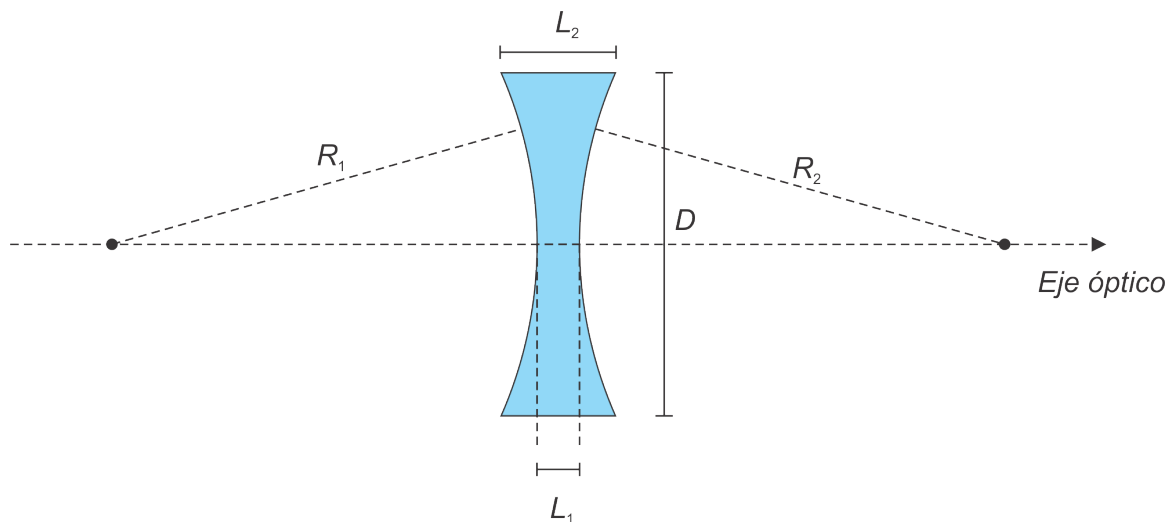


Figura 1. Esquema de una lente simple bicóncava y los parámetros que la definen.

1.1 Procesos de fabricación.

Cuando un elemento óptico es fabricado, básicamente debe pasar por los siguientes procesos:

- Corte del vidrio.
- Redondeado del vidrio.
- Generado del radio de curvatura.
- Esmerilado de la superficie.
- Pulido y pruebas ópticas de la superficie.

1.2 Medidas de seguridad.

Para realizar los procesos descritos anteriormente, es importante tomar en cuenta todas las medidas de seguridad como: mantener limpia y despejada el área de trabajo, saber el funcionamiento de las máquinas que se van a operar o en caso contrario contar con la supervisión de una persona que tenga experiencia en el uso de estas, además, el usuario deberá trabajar con el equipo de protección necesario, como lo es el uso de gafas, guantes, mascarilla, bata y botas de casquillo, todo esto es con la finalidad de prevenir cualquier accidente en el trabajo.

2 Corte del vidrio

Una vez que se tiene el tipo de vidrio requerido y se conoce el diámetro D de la *superficie* que se desea fabricar, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones.

- i. El grosor del vidrio deberá ser al menos del 10% del valor de D para evitar que pueda romperse debido a esfuerzos en el proceso de fabricación.
- ii. Se necesita una segunda superficie frecuentemente llamada *herramienta*, que será utilizada para el proceso de esmerilado, esta debe tener un diámetro del 90% del valor de D y un radio de curvatura con el mismo valor que el de la superficie pero opuesto (Karow, 1993), es decir, si la *superficie* es cóncava entonces la *herramienta* deberá ser convexa y viceversa. Si la *superficie* es plana entonces su *herramienta* también deberá serlo.

2.1 Preparación del vidrio.

Dado el valor del diámetro D de la superficie que se desea fabricar, con un marcador de cera o un plumón, se traza una circunferencia sobre el vidrio con dicho diámetro. Con el propósito de no desperdiciar vidrio y anticipadamente facilitar el proceso de redondeado que se realizará en una etapa posterior, se traza un hexágono (aproximadamente) de manera que la circunferencia quede dentro de este (ver Figura 2), de esta manera se tendrán las líneas guía para el corte del vidrio con la sierra eléctrica.

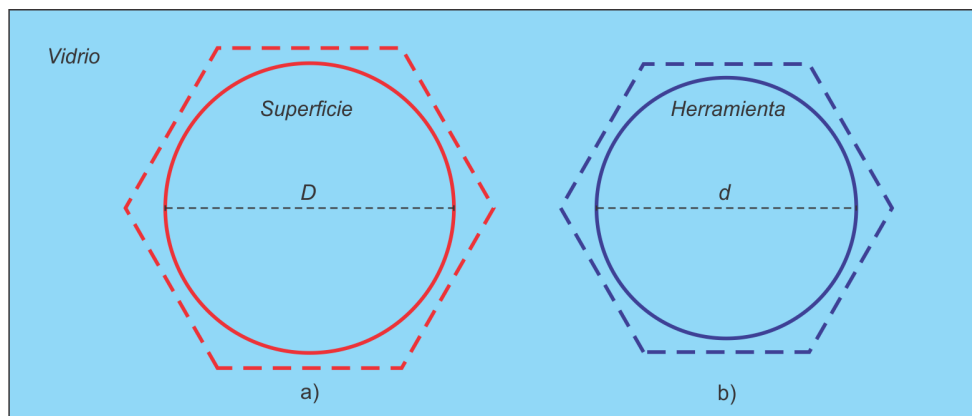


Figura 2. Trazo de las líneas guía para el corte del vidrio: a) Superficie óptica con diámetro D que se desea fabricar, b) Herramienta con diámetro $d = 90\%$ del valor D , que será utilizada para el proceso de esmerilado.

2.2 Uso de la sierra eléctrica

Sin duda, este es el proceso más peligroso, de manera que debemos poner mucho cuidado y utilizar el equipo de protección descrito en el capítulo anterior para evitar algún accidente. Antes de comenzar con el corte, es recomendable apoyarse con unas mordazas para sujetar el vidrio, esto es con el propósito de evitar que se mueva o salga disparado cuando el disco de la sierra comience a cortarlo. Al mismo tiempo se debe ir aplicando refrigerante en la zona que se está cortando para evitar sobrecalentamiento del vidrio. En la Figura 3, se muestra la imagen de una sierra eléctrica utilizada para el corte del vidrio mediante un disco de diamante, la velocidad del disco puede variar de 1000 a 3000 rpm.

El corte hexagonal del vidrio se hace de manera aproximada, ya que la superficie de interés se obtendrá a partir de este y tendrá una geometría circular (ver Figura 4).



Figura 3. Imagen de la sierra eléctrica utilizada para el corte del vidrio en el Laboratorio de Manufactura de Componentes Ópticas del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE)

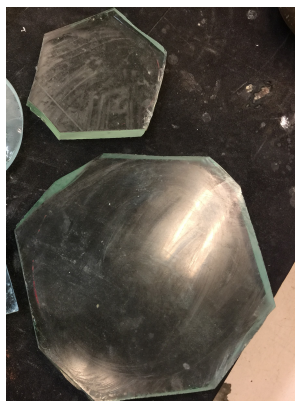


Figura 4. Imagen del vidrio que ya ha sido cortado con la sierra eléctrica.

3 Redondeado del vidrio

En este proceso el vidrio que fue recortado en forma de hexágono en la etapa anterior, ahora se fija en una base metálica que servirá de apoyo para montarlo en la máquina redondeadora donde serán devastadas las esquinas del hexágono hasta llevarlo a una forma circular con el diámetro requerido.

3.1 Fijación del vidrio.

Comúnmente se utiliza cera como adherente para fijar el vidrio a la base metálica, como primer paso, se depositan pequeñas porciones de cera sobre la base metálica, después se coloca el vidrio lo más centrado posible a la base, el siguiente paso es calentar la base-cera-vidrio en una parrilla hasta alcanzar una temperatura suficiente para que la cera se derrita, posteriormente debemos cerciorarnos que la cera líquida recubra toda la superficie de la base y que el vidrio este centrado, finalmente se dejan enfriar a temperatura ambiente, de manera que la cera líquida pasará a un estado sólido fijando el vidrio a la

base. Es importante que la base metálica y el vidrio se calienten a la par, pues una diferencia considerable de temperatura entre estos podría fracturar el vidrio dejándolo inservible.

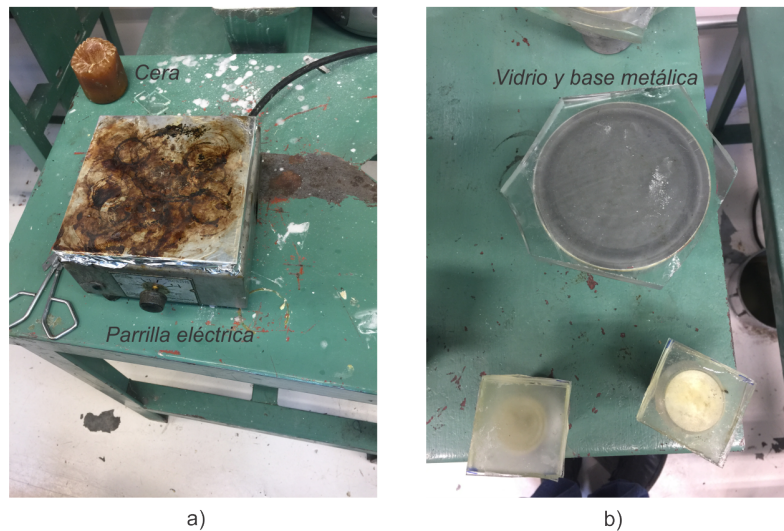


Figura 5. Pegado del vidrio a la base metálica, a) se muestra la parrilla eléctrica y cera utilizada como adherente, b) imágenes de algunos vidrios adheridos a su base metálica.

3.2 Devastado de las esquinas del hexágono.

Después de que el vidrio ha sido pegado a la base metálica y enfriado, ahora este se monta en la máquina redondeadora, que básicamente consiste en dos ejes rotatorios, uno de estos consiste de un esmeril de disco y en el otro se coloca el vidrio, de esta manera las esquinas del vidrio serán devastadas hasta lograr una geometría completamente circular como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Redondeado del vidrio, en este proceso el esmeril avanza lentamente constantemente hacia el vidrio para devastar las esquinas hasta llevarlo a una geometría perfectamente redonda.

El mismo proceso se realiza también para la superficie que será la herramienta en el proceso de esmerilado (ver Figura 7). Por último, ambas superficies son biseladas, es decir, cuidadosamente con un esmeril muy fino se elimina el filo de toda la orilla de la superficie con el propósito de evitar que pueda despostillarse en el proceso de esmerilado.

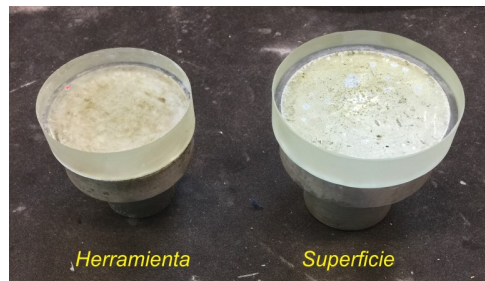


Figura 7. Se muestra los vidrios redondeados y biselados a partir del cual se obtendrá la superficie y su herramienta para el esmerilado.

4 Generación de radios de curvatura.

Después de que los vidrios han sido cortados y redondeados, ahora se debe generar el radio de curvatura en la superficie. Para esta tarea se utiliza la máquina *Generadora*, que consiste de dos ejes rotatorios verticales inferior y superior, en el eje inferior se monta el vidrio junto con su base y en el eje superior se coloca una broca de copa de diamante con un diámetro interno para general superficies convexas y un diámetro externo para generar superficies cóncavas, además, este último tiene movimiento angular, es decir, puede inclinarse formando un ángulo con la vertical tanto como sea necesario para generar el radio de curvatura requerido en el vidrio.

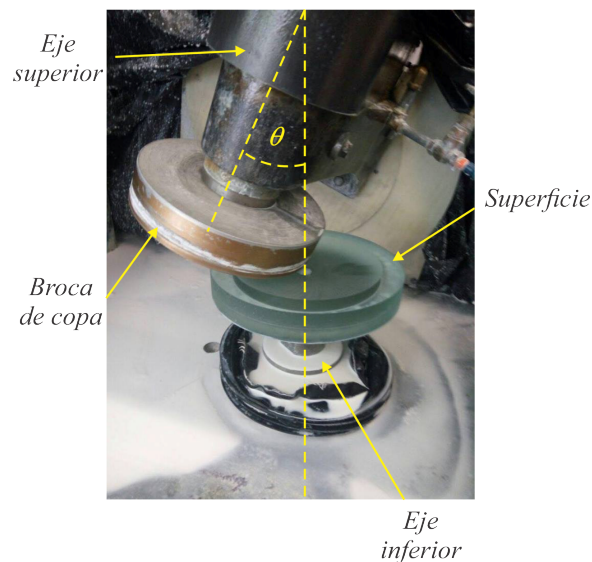


Figura 8. Fotografía de la máquina generadora utilizada en Laboratorio de Manufactura de Equipos Ópticos del INAOE.

4.1 Determinación del ángulo de inclinación de la broca.

El valor del radio de curvatura R que generará la broca sobre la superficie, está determinado por el ángulo de inclinación de la broca respecto a la vertical mediante la siguiente ecuación (Karow, 1993),

$$\sin \theta = \frac{\sigma}{2R} \quad (1)$$

donde θ es el ángulo de inclinación del eje de la broca, σ es el diámetro de la broca y R es el radio de curvatura que se desea generar.

4.2 Medición del radio de curvatura.

Después de haber generado las curvaturas en las superficies, estas deberán medirse con un esferómetro (ver Anexo A) para corroborar que corresponden al radio de curvatura del diseño. Finalmente, a la herramienta se le hace un acanalado con la sierra (ver Figura 9) con el propósito de que el pulidor tenga flujo entre la *superficie* y la *herramienta* cuando estas pasen al proceso de esmerilado.

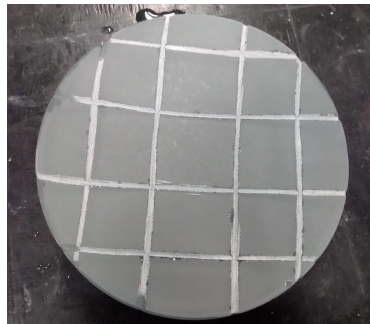


Figura 9. Acanalado de la herramienta para el flujo del pulidor entre la superficie y la herramienta en el proceso de esmerilado.

5 Esmerilado de la superficie.

El objetivo principal en este proceso, es suavizar la rugosidad de la textura de la superficie, en palabras técnicas significa disminuir el diámetro y profundidad del *poro* (pequeño orificios) de la superficie. Esta tarea se lleva a cabo mediante el uso de una máquina pulidora en donde la *herramienta* gira y al mismo tiempo oscila sobre la *superficie* con un abrasivo de por medio entre ellas. Los abrasivos básicamente, son óxidos de aluminio, en este caso se usó *Microgrit WCA* con un diámetro de las partículas que va de 40 a 5 micras.

5.1 Preparación del abrasivo.

Desde hace tiempo y actualmente se sigue utilizando el agua como agente líquido para mezclar los abrasivos. En la literatura, no existe alguna proporción específica de esta mezcla, sin embargo, a

experiencia de los técnicos en esta área, un término ligeramente espeso ha resultado ser una buena mezcla para el desarrollo de este trabajo.

5.2 Procedimiento del esmerilado.

El esmerilado de la superficie se debe hacer básicamente en 5 etapas, donde el diámetro de la partícula del abrasivo debe ir disminuyendo de 40, 25, 15, 10 y 5 micras, el tiempo estimado en cada etapa es de media a una hora según lo requiera la superficie. Es importante ir midiendo el radio de curvatura de la superficie en cada etapa del esmerilado para garantizar que al final de este proceso, la superficie cumpla con el radio de curvatura requerido. Es muy importante que al pasar de una etapa a otra, la superficie y la herramienta se laven perfectamente con agua para eliminar las partículas del abrasivo que se ha utilizado anteriormente, de lo contrario, en la nueva etapa la superficie podría rayarse echando a perder el avance en el trabajo del esmerilado.

5.3 Máquina de esmerilado.

Consiste básicamente de un eje vertical rotante con velocidad controlada que soporta a la *superficie* que va a ser esmerilada, sobre la *superficie* se coloca la *herramienta* de tal manera que en la hendidura de su base metálica descansa el extremo de una varilla o aguja que proviene de un brazo mecánico que proporciona movimientos excéntricos con diferentes longitudes de desplazamiento que se ajustan de acuerdo a la zona que se quiere “atacar” sobre la *superficie*, (ver Figura 10).



Figura 10. Imagen de una maquina utilizada para el esmerilado y pulido óptico tradicional.

Comúnmente se colocan pesas sobre la *herramienta* para hacer presión sobre la *superficie* con el propósito de avanzar el devastado y reducir los tiempos en las etapas de esmerilado. Sin embargo, debe tenerse cierta experiencia en el desarrollo de esta tarea para poder controlar el desgaste sobre la *superficie* sin cambiar su radio de curvatura.

Otro aspecto importante es que continuamente se debe ir poniendo abrasivo sobre la *superficie* para lograr un acabado homogéneo de la misma, también se debe ir midiendo el radio de curvatura de la *superficie* en cada etapa del esmerilado para garantizar que llegará a buen término con los parámetros de diseño y con la calidad óptica requerida. Al final del proceso de esmerilado, la superficie deberá tener el radio de curvatura requerido, sin embargo, la superficie aún permanece opaca como se muestra en la Figura 11.

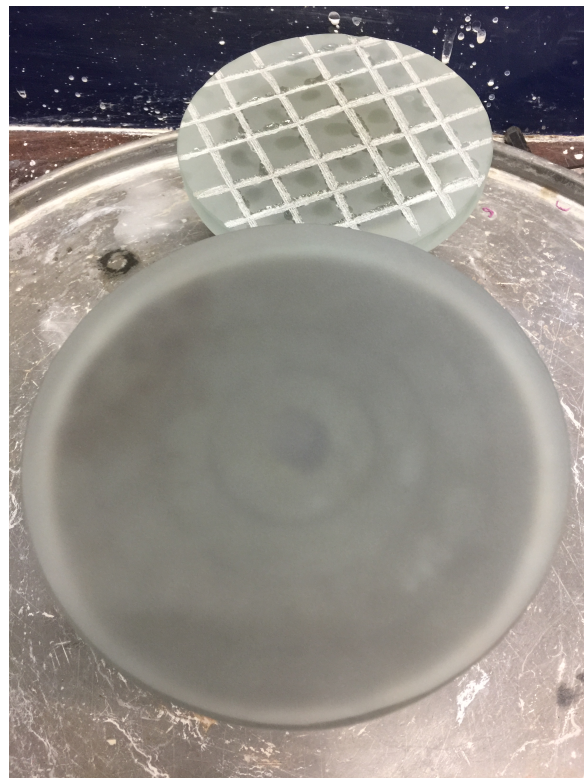


Figura 11. Imagen del acabado de la superficie óptica al final del proceso de esmerilado.

6 Pulido de la superficie.

En este proceso la *superficie* adquiere su transparencia total y su calidad óptica debe alcanzar la precisión requerida que puede ir de 2λ hasta $\lambda/20$ o menor. De igual manera que en el proceso

anterior, la *herramienta* debe cumplir las mismas características, a excepción de que ahora esta se hace a base de una mezcla de chapopote y brea con proporciones de 4 a 1 respectivamente (Izazaga, 2015), la mezcla se obtiene calentando los materiales en un recipiente hasta que adquieran una consistencia líquida, posteriormente esta mezcla se vierte en una base metálica y finalmente se prensa contra la superficie que se desea pulir para que adquiera el mismo radio de curvatura y por último se le hace el acanalado.

Para el pulido se usan abrasivos con un tamaño de partícula que van de 8 a 1 micra y son básicamente óxidos de aluminio, de serio y barnesita (Cornejo, 1991). Para la prueba de la calidad óptica de la *superficie* en este proceso, se deben usar métodos no invasivos para evitar que la superficie sufra algún daño o ralladura, por tal motivo, las pruebas interferométricas son la mejor opción. Las pruebas interferométricas que comúnmente se utilizan en un taller de óptica para la evaluación de la calidad de las superficies son: Interferómetro de Newton, Prueba de Ronchi e interferómetro de Fizeau, las cuales serán descritas de manera muy breve en la siguiente sección.

6.1 Interferómetro de Newton.

Uno de los métodos comúnmente utilizados en un taller de óptica, es el interferómetro de Newton (ver Figura 12), dos superficies en contacto, son iluminadas por una fuente de luz monocromática, la diferencia que existe entre la superficie de prueba y la superficie de referencia da lugar a una delgada capa de aire entre las dos superficies en contacto dando como resultado un patrón de franjas brillantes y oscuras llamado interferograma.

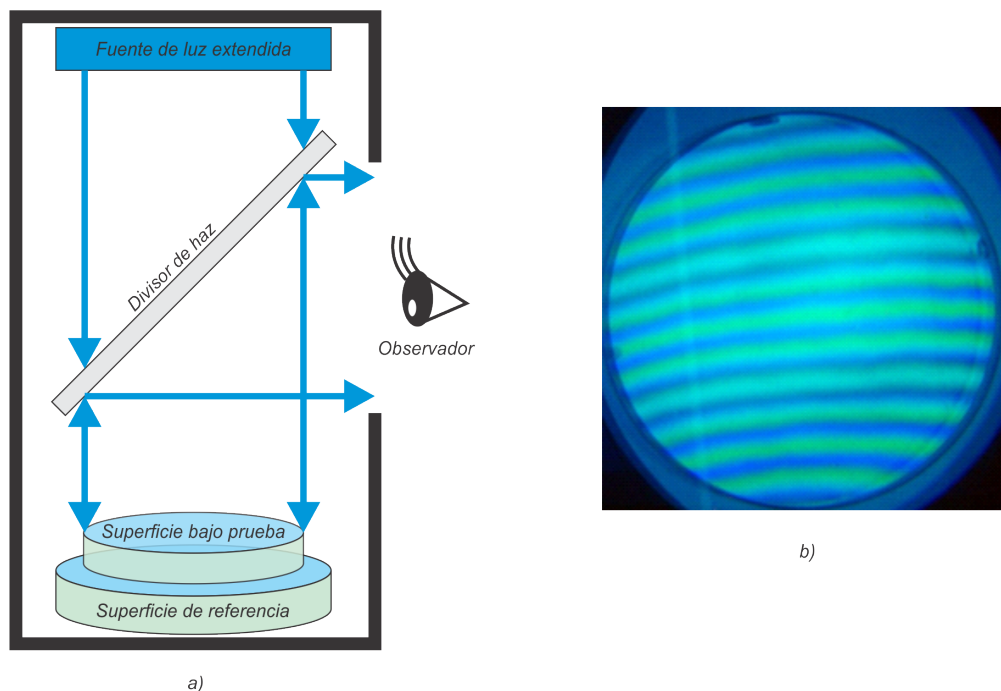


Figura 12. Interferómetro de Newton para la prueba de superficies, a) Esquema del interferómetro, b) Interferograma observado.

A partir del interferograma se puede tener información cualitativa y cuantitativa de la superficie de prueba. Idealmente uno esperaría no observar franjas, o bien, obtener franjas rectas, paralelas y de igual espesor si la superficie de prueba es exactamente igual a la superficie de referencia. Para un técnico muy experimentado solo basta observar el patrón de franjas para saber la precisión de la superficie de prueba. La Tabla 1 (Mantravadi and Malacara, 2007), muestra los interferogramas que se obtienen cuando se comparan diferentes tipos de superficies con respecto a una superficie idealmente plana.

Tabla 1. Naturaleza de las franjas de Newton para diferentes superficies con referencia a un plano estándar

S. No.	Tipo de Superficie	Apariencia de las franjas de Newton	
		Sin inclinación	Con inclinación
1	Plano		
2	Aprox. plano		
3	Esférica		
4	Cónica		
5	Cilíndrica		
6	Astigmatismo (curvas de mismo signo)		
7	Astigmatismo (curvas de diferente signo)		
8	Altamente Irregular		

Una de las ventajas que se tiene con este método, es que obtenemos información directa de calidad de la superficie, sin embargo la desventaja es que se necesita una superficie de referencia (patrón) de alta calidad óptica y de diámetro mayor a la superficie de prueba, además estas superficies de referencia son de un costo muy elevado.

6.2 Prueba de Ronchi.

Esta prueba es muy usada en los talleres de óptica para la evaluación de las aberraciones de superficies o sistema ópticos, pues es un método simple y eficiente que proporciona información cualitativa y cuantitativa de la superficie que se evalúa. La prueba de Ronchi, consiste en colocar una rejilla cerca del radio de curvatura de la superficie de prueba, como resultado de esto, se tiene una imagen de la rejilla producida por la superficie, que se superpone sobre la misma rejilla, produciendo una combinación de franjas brillantes y oscuras. La forma de estas franjas en la imagen, depende de las aberraciones presentes en la superficie.

Con la prueba de Ronchi se mide la aberración transversal (TA) de forma directa como se muestra en la Figura 13. En el esquema la rejilla y la imagen de la misma, se encuentran sobre el eje óptico, de manera

que la TA se mide desde el eje, además se puede observar que existe defoco, así como otras aberraciones (Cornejo-Rodríguez, 2007).

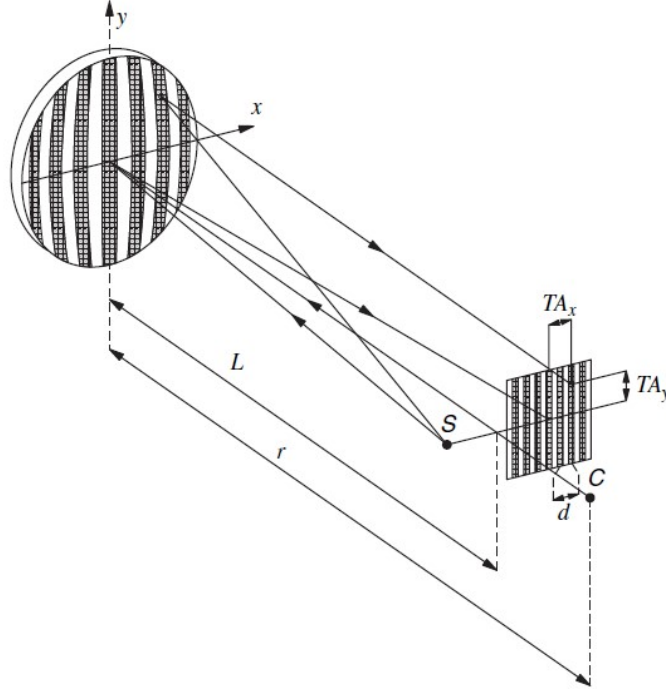


Figura 13. Geometría de la prueba de Ronchi.

La onda aberrada es definida en la pupila de salida de la superficie bajo prueba, usando las ecuaciones de Rayces (Rayces, 1964), como

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r-W}; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{TA_y}{r-W} \quad (2)$$

Para fines prácticos, se pueden obtener resultados muy precisos si rescribimos la Ecu. (2) igual a

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r}; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{TA_y}{r} \quad (3)$$

donde r es la distancia de la pupila de salida o superficie bajo prueba a la rejilla de Ronchi, TA_x la aberración transversal en la dirección x , TA_y la aberración transversal en la dirección y y W es el frente de onda. Si el defoco de la rejilla es pequeño, la distancia puede ser aproximada al radio de curvatura del frente de onda. De esta manera, si tenemos una rejilla de Ronchi con un espaciado d entre las franjas para un punto (x, y) en la m -ésima franja, podemos escribir de manera general

$$\frac{\partial W}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial W}{\partial y} \sin \varphi = -\frac{md}{r} \quad (4)$$

donde se asume que la franjas de la rejilla están inclinadas un ángulo ϕ con respecto al eje y tal como se muestra en la Figura 14. Esta es la fórmula básica para el modelo geométrico de la prueba de Ronchi.

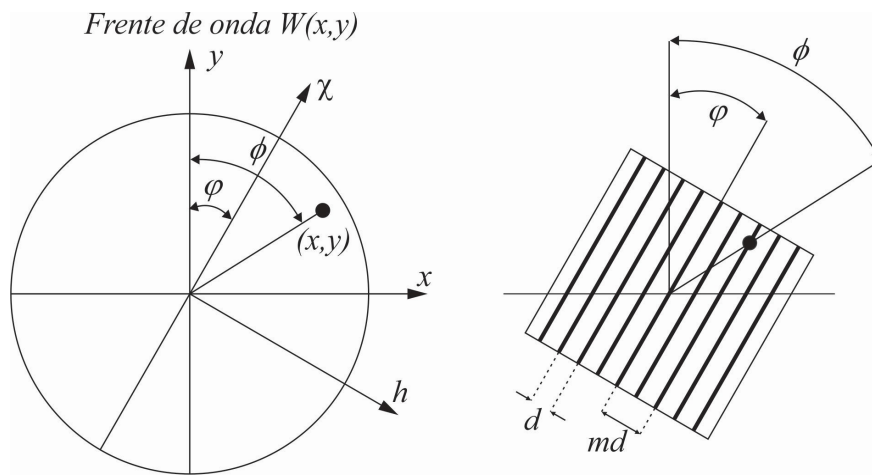


Figura 14. Frente de onda y orientación de la rejilla.

Es importante hacer notar, por otra parte, que en el tema de fabricación y pulido de superficies ópticas, aún se tiene como reto el producir superficies esféricas y planas de referencia (o patrón) con calidad mayores a $\lambda/15$, así como también producir superficies cilíndricas.

También cabe mencionar que existe una amplia gama de pruebas geométricas e interferométricas para el análisis de la calidad óptica de superficies, todas con sus ventajas y desventajas. La elección de la prueba que se aplica, será en función de los objetivos particulares y de la precisión final que se desea alcanzar en la superficie que se fabrica

6.3 Interferómetro de Fizeau.

El interferómetro de Fizeau es uno de los instrumentos más utilizados en los talleres de óptica para para la prueba de elementos ópticos. La superficie de prueba se coloca frente a la superficie de referencia de manera que la capa de aire entre ellas sea la menor posible (ver Figura. 14), sin embargo, si esta resulta ser muy grande, entonces se observarán dos imágenes de la fuente puntual, una generada por la superficie de prueba y la otra por la superficie de referencia, de manera que se debe manipular la superficie de prueba hasta conseguir que las imágenes coincidan, así se habrá logrado minimizar el espesor de la capa de aire entre ambas superficies y entonces se podrá observar franjas de interferencia (Mantravadi y Malacara, 2007). La interpretación de las franjas es exactamente igual al interferómetro de Newton.

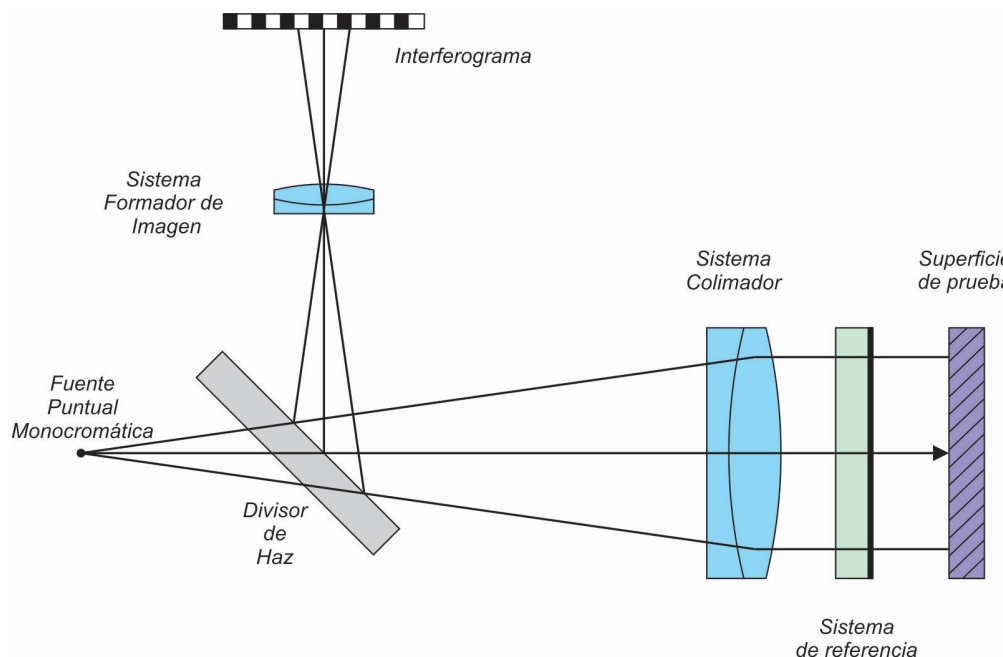


Figura 14. Esquema de un Interferómetro de Fizeau usando un sistema colimador.

Conclusiones

Sin duda alguna, la parte de esmerilado y pulido, son las etapas en las que se debe trabajar con el mayor cuidado posible, el éxito de obtener superficies de alta calidad óptica recae fuertemente en la experiencia del técnico que desarrolla dicha tarea, por tal motivo el trabajo deberá ser constante y repetitivo.

Actualmente en el LUFABEO del CCADET-UNAM, se cuenta con una máquina automática de pulido tradicional de marca comercial STRASBAUGH y una máquina de pulido de Control Numérico por Computadora (CNC) de marca comercial ZEEKO IRP 100, de manera que sólo se puede desarrollar la parte de pulido. Para desarrollar los procesos de Corte, Redondeado y Generado del vidrio, se buscará la colaboración con otras instituciones como el INAOE y la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Para la parte final de las pruebas ópticas de la superficie, se evaluará con un interferómetro de Newton ya que es el único instrumento con el que se cuenta por ahora en el laboratorio y se implementará un probador de Ronchi como otra alternativa de prueba.

Agradecimientos

A todo el personal del Laboratorio de Manufactura de Componentes Ópticas (LMCO) del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). Por brindar el apoyo y las facilidades para la capacitación, pero principalmente:

Al Dr. Rafael Izazaga Pérez (Jefe del LMCO-INAOE), por brindar todas las facilidades para poder ingresar y hacer uso de las máquinas del laboratorio.

A la Ing. Emilia Cruz Zavala por todo el apoyo brindado durante y después de mi capacitación.

Al Téc. Sup. Noé López Hernández por el apoyo principalmente en el proceso de esmerilado.

Ing. Claudia Carballo Manuel.

Téc. Sup. Magdalena Hernández Ríos.

Sec. Ejecutiva Araceli Huepa Cortes.

Al INAOE por facilitar el uso de la infraestructura del LMCO.

Al CCADET-UNAM por otorgar el apoyo para realizar la capacitación.

Anexo A

El esferómetro es un instrumento que consiste de un trípode (Tres patas igualmente espaciadas) fijo y un tornillo central con desplazamiento en la dirección vertical que permite medir la *sagita* z , es decir, la distancia que se desplaza el tornillo central respecto al plano formado por el trípode.

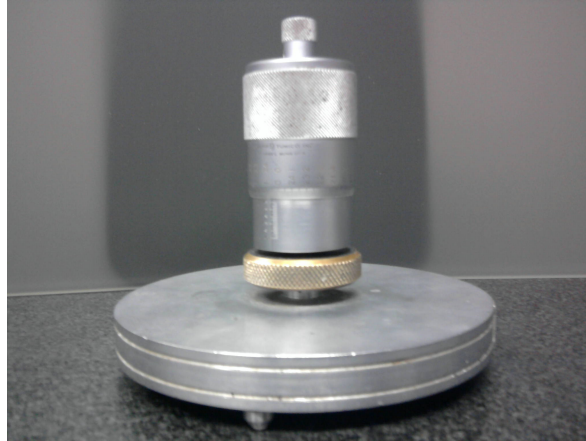


Figura A.1. Imagen de un esferómetro mecánico para medir la sagita.

De acuerdo con el esquema de la Figura A.2 si z es el valor de la *sagita*, entonces, el radio de curvatura R de la superficie está dado por (Cooke, 1964),

$$R = \frac{z}{2} + \frac{y^2}{2z} \pm r \quad (\text{A.1})$$

donde y es la distancia de centro al trípode del esferómetro y r es el radio de curvatura de los balines del trípode. El signo $+$ se usa para superficies cóncavas y el signo $-$ para las superficies convexas. La precisión del esferómetro se determina derivando la Ecu. (A-1), de manera que se tiene que

$$\frac{dR}{dz} = \frac{1}{2} + \frac{y^2}{2z^2} \quad (\text{A.2})$$

Y finalmente, se tiene que la precisión es,

$$\Delta R = \frac{\Delta z}{2} \left(1 - \frac{y^2}{z^2} \right) \quad (\text{A.3})$$

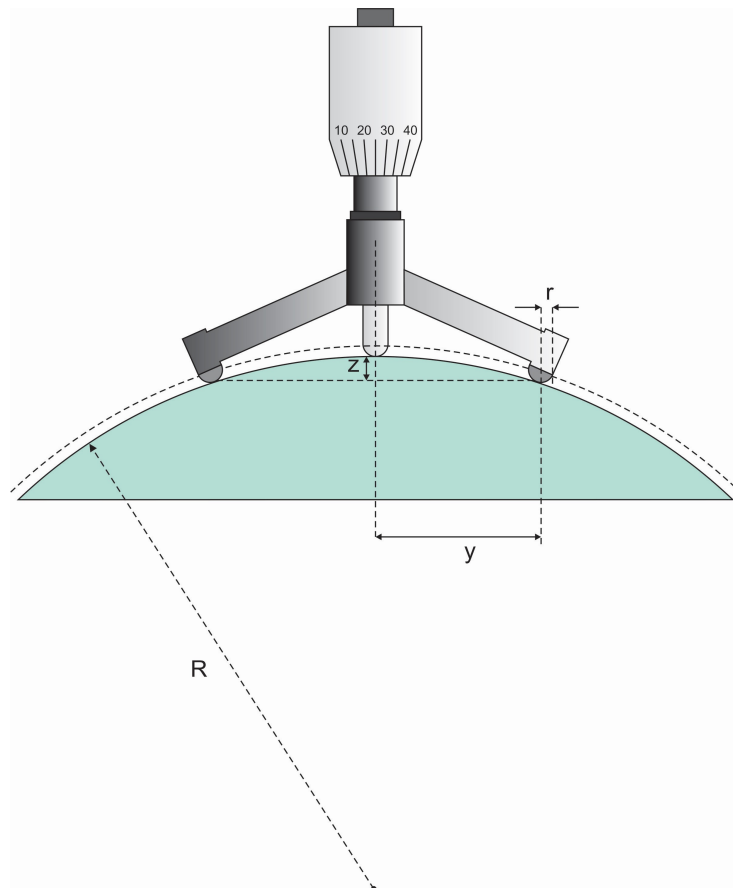


Figura A.2. Esquema del trípode para determinar R .

Referencias bibliográficas

Cooke F. (1964), **The Bar Spherometer**, *Appl. Opt.*, **3**, p. 87-88.

Cornejo, A. (1991). **Construcción y Prueba de superficies ópticas**, Memoria en extenso de la Sociedad Mexicana de Física, Primera Escuela Mexicana de Instrumentación y Metrología. San Luis Potosí, SLP, México.

Cornejo-Rodríguez, A. (2007). **Ronchi Test**. Optical Shop Testing, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., p. 317-360.

Karow, (1993). Fabrication Methods for Precision Optics, Wiley, New York.

Mantravadi M. V.; Malacara D. (2007). **Newton, Fizeau, and Haidinger Interferometers**. Optical Shop Testing, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., p.1-40.

Izazaga, R. (2015). Pulido de Superficies Ópticas Fuera de Eje a Partir de Superficies Esféricas, Tesis doctoral, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y electrónica (INAOE), Tonantzintla, Puebla.

Rayces. J. L., (1964). **Exact Relation Between Wave Aberration and Ray Aberration**. Opt. Acta, 11, p. 85-88.