



Informe técnico

Fabricación de un espejo primario para un telescopio Newtoniano

Autores

Cebrian Xochihuila Pedro

Rosete Aguilar Martha

Bruce Davidson Neil Charles

Moreno Alvarez Alejandro

Díaz Cruz Mario Alberto

10 de marzo 2025

Título: Fabricación de un espejo primario para un telescopio Newtoniano.

Autores: Cebrian Xochihuila Pedro¹, Rosete Aguilar Martha¹, Bruce

Davidson Neil Charles¹, Moreno Alvarez Alejadro², Díaz Cruz Mario

Alberto³.

Afiliación 1: Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología ICAT-UNAM,

Departamento de Óptica, Microondas y Acústica, Instrumentación Óptica

Afiliación 2: Facultad de Ciencias UNAM, Licenciatura en Física

Afiliación 3: Instituto de Geofísica UNAM, Departamento de Vulcanología

Resumen

El telescopio es un sistema óptico que sirve para observar objetos lejanos con más detalle de lo que podría verse a simple vista. Existen tres tipos de telescopios: los refractores que están compuestos por un sistema de lentes, los reflectores que están constituidos por un sistema de espejos y los Catadióptricos que son sistemas combinados por lentes y espejos. En este trabajo se describe el proceso de fabricación del espejo primario de un telescopio Newtoniano que tiene un radio de curvatura $R_C = 2.323$ m y un diámetro de 15 cm. Para evaluar la calidad óptica de la superficie se utiliza la prueba de Ronchi dando como resultado un patrón de franjas brillantes y oscuras (Ronchigram) del que se puede extraer información cualitativa y cuantitativa de las deformaciones presentes en el espejo para determinar su calidad óptica.

Índice

1. Introducción	4
1.1. Telescopios refractores	4
1.2. Telescopios reflectores	5
1.3. Telescopios catadiópticos	7
2. Consideraciones teóricas	9
2.1. Poder de Aumento PA	9
2.2. Poder de aumento del telescopio	9
3. Fabricación del espejo: proceso de esmerilado y pulido	14
3.1. Generación del radio de curvatura	14
3.2. Proceso de esmerilado	16
3.3. Pulido de la Superficie	20
3.3.1. Fabricación de la herramienta para el pulido	20
4. Prueba de la calidad óptica del espejo	22
4.1. Prueba de Ronchi	22
4.2. Arreglo experimental para la prueba del espejo	24
5. Resultados	26
6. Conclusiones	28

Nomenclatura	
Símbolo	Descripción
in	pulgadas
m	metros
mm	milímetros
nm	nanómetros
μ m	micras
λ	lambda en nanómetros

1. Introducción

El telescopio es un instrumento óptico compuesto por un sistema lentes, espejos o una combinación de ambos elementos y sirve para observar a detalle características de objetos muy lejanos que a simple vista sería imposible de ver, esto se logra recolectando la luz que emiten los cuerpos en observación. Este instrumento es la herramienta principal que se utiliza en la Astronomía para observar cuerpos celestes tal como las estrellas, la luna, los planetas, las galaxias, etc., su desarrollo y perfeccionamiento a través del tiempo ha contribuido a la comprensión y conocimiento que actualmente tenemos del universo. Históricamente su invención se atribuye a Hans Lippershey en el año de 1608, sin embargo, investigaciones más recientes (Pelling, 2008), muestran que el primero en construirlo fue Juan Roget en el año de 1590 y que posteriormente su invento fue copiado por Zacharias Janssen quien lo patentó el 17 de octubre de 1608. De acuerdo con el sistema óptico que los constituyen, estos instrumentos pueden clasificarse en tres tipos: *telescopios refractores*, *telescopios reflectores* y *telescopios catadióptricos*.

1.1. Telescopios refractores

Están constituidos por una combinación de lentes, que bien pueden ser dos lentes biconvexas tal como es el caso del *Telescopio de Lippershey* (1608). El sistema se construye de manera que los focos f_1 y f_2 de las lentes L_1 y L_2 coincidan en un mismo punto tal como se muestra en la figura 1.

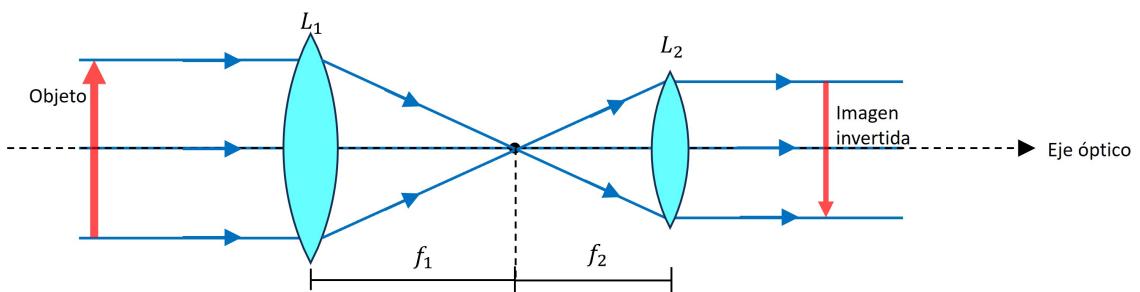


Figura 1: *Telescopio refractor de Lippershey*, (Edición propia).

Otra combinación de lentes, es el uso de una lente biconvexa y una bicóncava,

este tipo de sistema óptico se puede encontrar en el *Telescopio de Galileo* (1609) y la disposición de estas lentes se muestra en la figura 2, al igual que en el caso anterior, los focos f_1 y f_2 de las lentes L_1 y L_2 coinciden en un mismo punto, sólo que esta vez, se considera el foco posterior de la lente bicóncava.

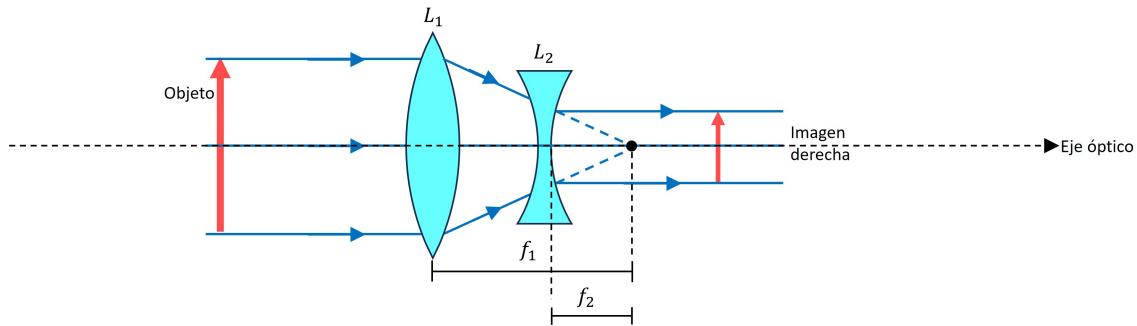


Figura 2: *Telescopio refractor de Galileo*, (imagen de edición propia).

La ventaja principal que tiene el telescopio de *Galileo* respecto al de *Lippershey* es que el sistema óptico es más compacto y además se tiene una imagen no invertida (imagen derecha) del objeto en observación. Es importante que las lentes de estos telescopios estén bien corregidas en sus aberraciones para proporcionar una imagen de buena calidad óptica.

1.2. Telescopios reflectores

El sistema óptico de este tipo de telescopios está constituido por un sistema de espejos, uno de los más comunes es el de Newton que consta de un espejo primario con geometría parabólica y un espejo plano que desvía los rayos a 90° del eje óptico del espejo primario tal como se muestra en la figura 3.

Otros telescopios reflectores son el Gregory y el Cassegrain, en caso del Gregory el espejo primario es un praboloide y se caracteriza por tener una abertura en su centro para que la imagen formada por el espejo elipsoidal cóncavo secundario pueda salir del telescopio y ser observada sobre el mismo eje óptico tal como se muestra en la figura 4. En el caso del Cassegrain, el espejo primario también tiene una abertura en su centro y el espejo secundario es un hiperboloide convexo (Malacara, 2004) tal como se muestra en la figura 5.

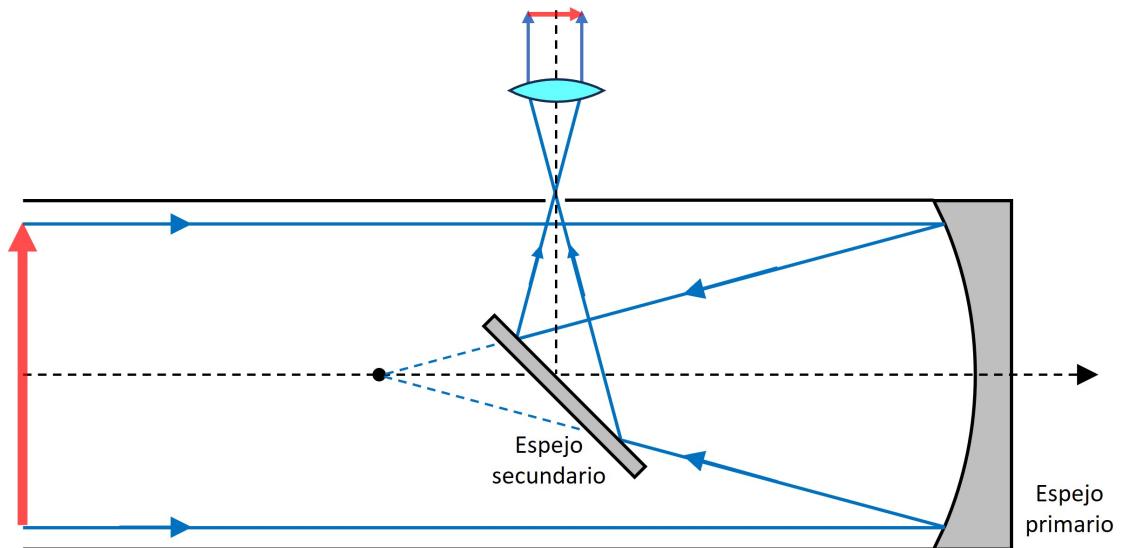


Figura 3: *Telescopio reflector de Newton, (Edición propia).*

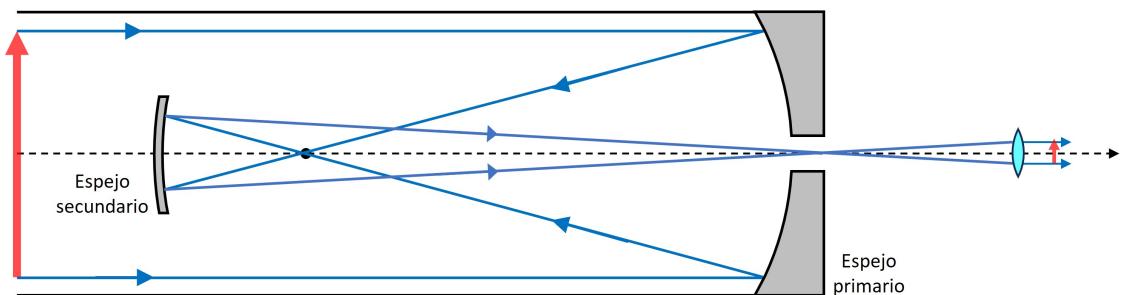


Figura 4: *Telescopio reflector Gregory, (Edición propia).*

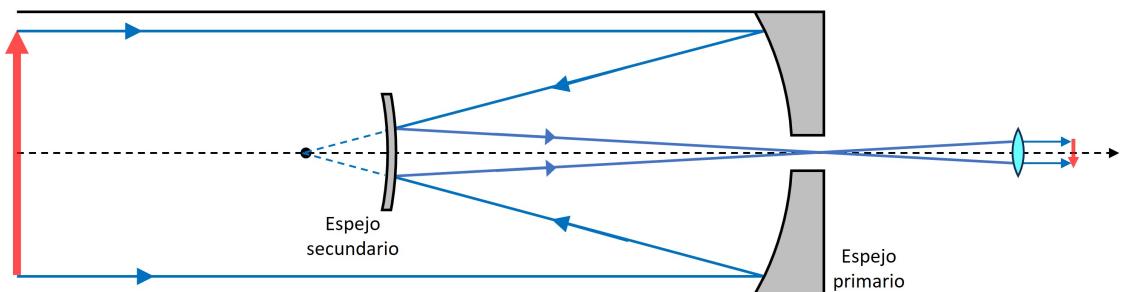


Figura 5: *Telescopio reflector Cassegrain, (Edición propia).*

1.3. Telescopios catadióptricos

Este tipo de telescopios tienen un sistema óptico formado por una combinación de lentes y espejos, o bien, pueden ser una combinación de los telescopios anteriormente mencionados, tal es el caso del telescopio Schmidt-Cassegrain y el Maksutov-Cassegrain que se ilustran en las figuras 6 y 7, las principales ventajas que tienen estos telescopios son:

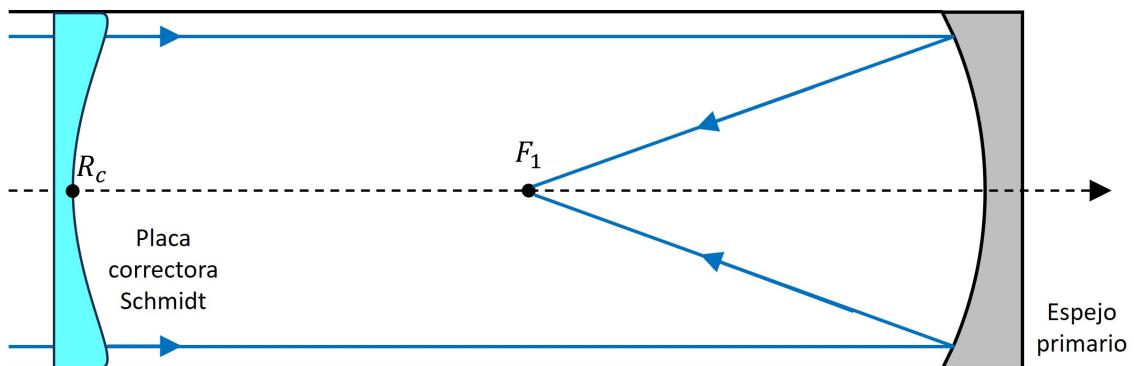


Figura 6: *Telescopio catadióptrico Schmidt-Cassegrain, (Edición propia).*

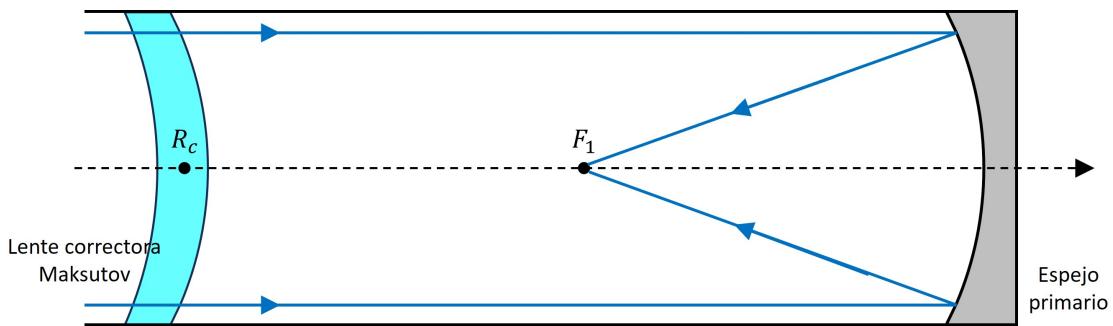


Figura 7: *Telescopio catadióptrico Schmidt-Cassegrain, (Edición propia).*

- En el telescopio Cassegrain las superficies ópticas utilizadas son cónicas, mientras que en los sistemas catadióptricos son esféricas con la excepción de la placa correctora Schmidt, por tanto, refiriéndonos al tema de fabricación de las superficies, es menos complicado fabricar esferas que cónicas.
- En los sistemas catadióptricos las aberraciones de *Coma* y *Astigmatismo* son corregidas y en Cassegrain no lo están.
- El utilizar la placa correctora en los sistemas catadióptricos también sirve para conseguir que el sistema sea hermético, esto quiere decir, que evita

que las superficies ópticas se ensucien de polvo.

El objetivo en este trabajo es destacar el proceso de fabricación y de evaluación del espejo primario de un telescopio Newtoniano utilizando únicamente las máquinas y herramientas con las que cuenta el *Laboratorio Universitario de Fabricación de Equipos Ópticos* (LUFABEO) del ICAT-UNAM y se ha elegido este tipo de telescopio porque es sencillo de construir y no se requiere alta calidad óptica en el espejo ya que será un telescopio de aficionado.

2. Consideraciones teóricas

2.1. Poder de Aumento PA

Para un instrumento visual, el poder de aumento *PA*, o de manera equivalente, el aumento angular *MA*, se define como *la relación entre el tamaño de la imagen en la retina cuando el ojo ve a través del instrumento y el tamaño de la imagen en la retina cuando se mira con el ojo desnudo a la distancia de visión normal* (Hecht, 2017).

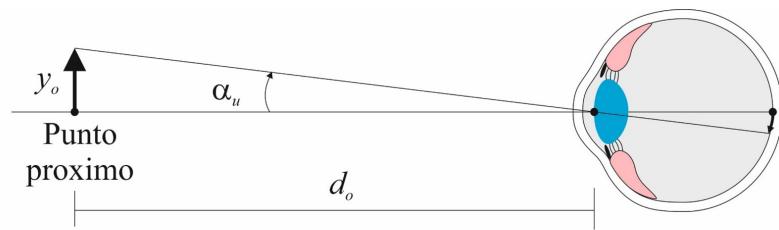
$$PA = \frac{\alpha_a}{\alpha_u}, \quad (1)$$

donde α_a y α_u son los ángulos formados entre el eje óptico y los rayos principales de la parte superior del objeto cuando el ojo observa a través del instrumento y a simple vista respectivamente como se muestra en la figura 8.

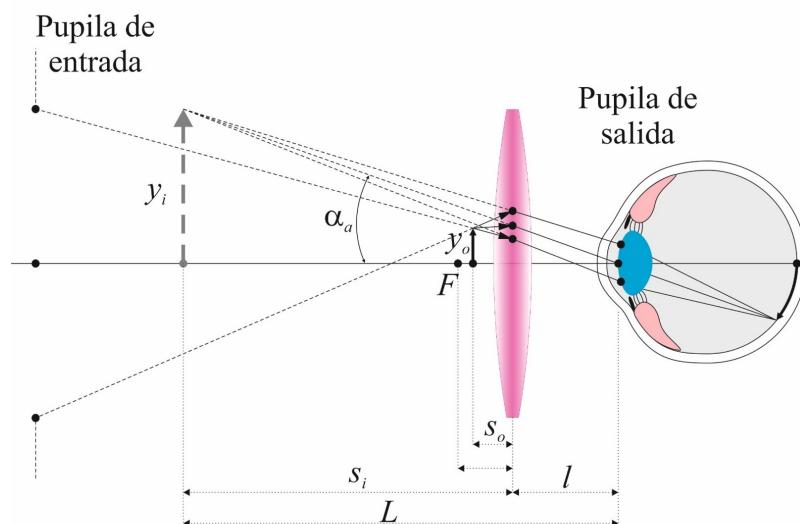
2.2. Poder de aumento del telescopio

Ahora hagamos el mismo análisis de los ángulos descritos en la sección anterior aplicados al telescopio. Considerando que el objeto se encuentra a una distancia infinita, entonces el ángulo α_u que se forma entre el eje óptico y el rayo que se observa con el ojo desnudo será aproximadamente igual al ángulo α que subtende entre el eje óptico y el rayo que se observa cuando se utiliza una lente de por medio tal como se muestra en la figura 9.

Teniendo en cuenta esta aproximación, ahora la aplicamos para el caso del telescopio sabiendo que está compuesto por un objetivo y un ocular, entonces, considerando que α es la mitad del cono de rayos de luz que provienen del objeto que está en infinito y llegan al objetivo del telescopio tal como se muestra en la figura 10 y tomando en cuenta que la distancia objeto es muy grande, entonces $\alpha \approx \alpha_u$. Por tanto, el aumento angular para el telescopio es:



(a)



(b)

Figura 8: *Observación de un objeto, (a) ojo desnudo (b) utilizando una lente positiva, (Edición propia).*

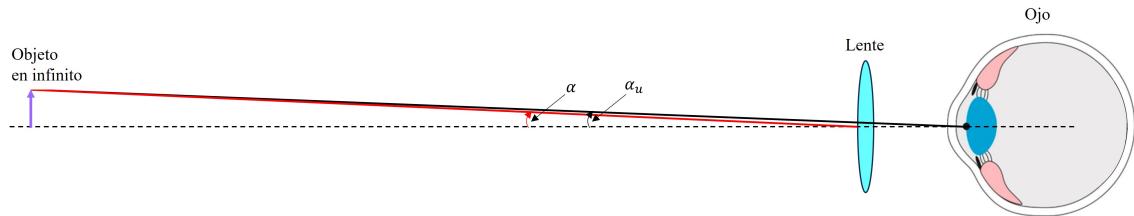


Figura 9: *Ángulos que se forman entre el eje óptico y el rayo de luz que emerge de un objeto que se encuentra en infinito y es observado con el ojo desnudo y utilizando una lente, (Edición propia).*

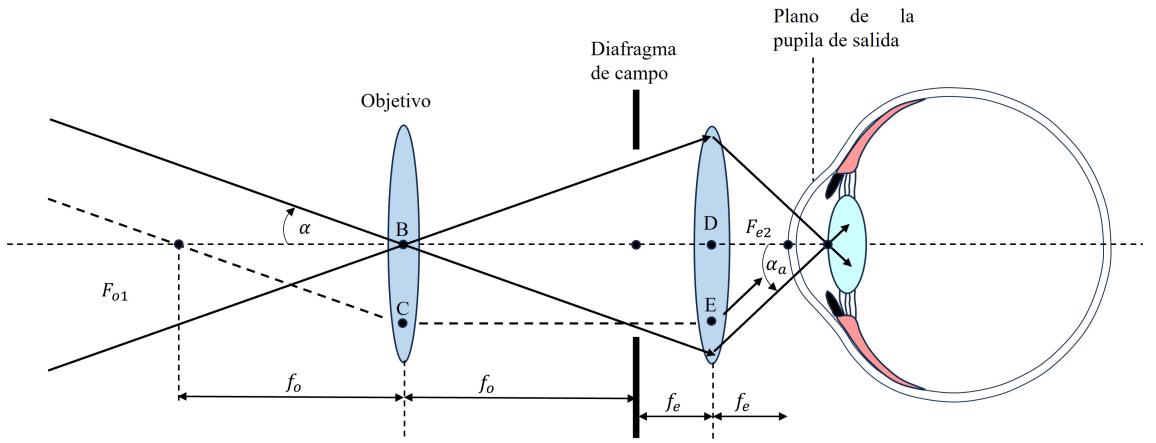


Figura 10: Esquema de los ángulos de los rayos para un telescopio, (Edición propia).

$$PA = \frac{\alpha_a}{\alpha}, \quad (2)$$

donde α y α_a son medidas del campo de visión en los espacios objeto e imagen respectivamente para este caso. Entonces α representa la mitad del cono de rayos de luz que provienen del objeto y son captados por el *objetivo* del telescopio y α_a es la mitad del cono de rayos de luz aparente captado por nuestro ojo con la ayuda del *ocular* del telescopio.

De figura 10 puede observarse que el rayo de luz que pasa por el primer foco F_{o1} del objetivo, posteriormente pasará por el segundo foco F_{e2} del ocular, de manera que entonces F_{o1} y F_{e2} son puntos conjugados.

Considerando la aproximación paraxial (Hecht, 2017), se tiene que $\alpha \approx \alpha_u \approx \tan \alpha_u$ y de manera similar $\alpha_a \approx \tan \alpha_a$. De la figura 10, también se puede ver que el cono de rayos que provienen del objeto llena el campo del diafragma, de manera que la mitad de su extensión es igual a la distancia $\overline{BC} = \overline{DE}$ y en consecuencia los triángulos $F_{o1}BC$ y $F_{e2}DE$ son correspondientes, por tanto, analizando la relación de las tangentes se tiene que el poder de aumento del telescopio es:

$$PA = -\frac{f_o}{f_e}. \quad (3)$$

De acuerdo con la literatura, los primeros telescopios refractores tenían objetivos casi planos, es decir, con distancias focales muy grandes lo cual implicaba que los tubos que contenían la óptica debían ser muy largos, tal como es el caso del telescopio de Johannes Hevelius que tenía una longitud de 50 m, sin embargo, tienen la ventaja de que entre más plano sea el objetivo, menor será la aberración esférica y cromática asociada a la lente.

Otra conveniente manera de obtener el poder de aumento del telescopio es considerando el aumento transversal del ocular. De la figura 10 se puede observar que la pupila de salida es la imagen del objetivo, de manera que se tiene que

$$M_{Te} = -\frac{f_e}{x_o} = -\frac{f_e}{f_o}. \quad (4)$$

Por otra parte, si D_o es diámetro del objetivo y D_{ep} es el diámetro de su imagen (la pupila de salida), entonces

$$M_{Te} = \frac{D_{ep}}{D_o}. \quad (5)$$

Entonces, comparando estas dos expresiones de la M_{Te} con la ecu.3 tenemos que

$$PA = \frac{D_o}{D_{ep}}, \quad (6)$$

esto quiere decir, que el haz de luz que entra al telescopio a través del diámetro del objetivo se comprime al diámetro del haz de luz que sale del ocular por un factor igual a la amplificación del instrumento tal como se muestra en la geometría de la figura 11

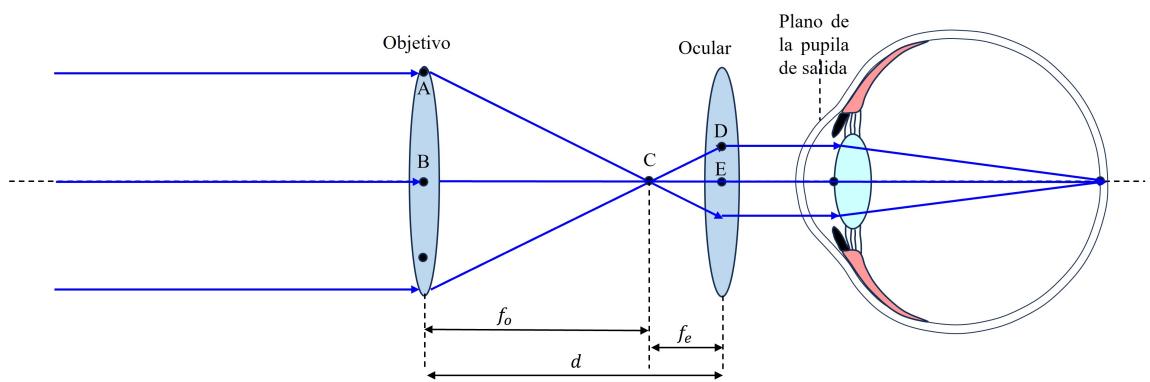


Figura 11: Telescopio astronómico con infinitos conjugados y considerando que el ojo del observador está relajado, (Edición propia).

3. Fabricación del espejo: proceso de esmerilado y pulido

Tal como se describió antes, el telescopio de Newton es un telescopio reflector que usa como objetivo un espejo parabólico que redirige los rayos de luz hacia un espejo plano para que estos sean finalmente desviados a 90° con dirección hacia el ocular y poder ver la imagen del objeto tal como se describió en la figura 3. La principal ventaja que tiene el telescopio Newtoniano es que al utilizar un espejo como objetivo, se logra disminuir en gran medida la aberración esférica y cromática, además de que es más sencillo de construir en comparación con otros telescopios. El radio de curvatura R_c , es el parámetro principal que determinará la longitud del tubo que contendrá las componentes ópticas del telescopio. Considerando que el objeto que se desea observar se encuentra en infinito, los rayos que llegan al espejo serán paralelos entre sí y en consecuencia se concentrarán en el foco del espejo $f = R_c/2$. Comúnmente en los telescopios de aficionados es recomendable que $R_c \leq 2.4$ m para que la longitud del tubo del telescopio no sea mayor a 1.5 m y pueda manipularse sin dificultad.

Con el fin de minimizar el costo del telescopio, elegimos que el espejo primario sea de vidrio común de ventana, el grosor máximo que se puede conseguir de este vidrio sin tanta dificultad es de 19 mm de manera que el diámetro no debe ser mayor a 15 cm. Por tanto, los parámetros del espejo primario que se va a fabricar, quedan determinados de la siguiente manera: el diámetro sera igual a $D = 15$ cm, el grosor del vidrio de $d = 19$ mm y el radio de curvatura $R_c = 2.4$ m.

3.1. Generación del radio de curvatura

Actualmente el LUFABEO no cuenta con una máquina generadora de radios de curvatura, entonces utilizamos la máquina de pulido tradicional para realizar esta tarea. La máquina de pulido tradicional está conformada por dos ejes verticales como se muestra en la figura 12, el eje inferior tiene movimiento rotacional y en él se coloca la *Superficie* que se va a esmerilar o pulir. El eje superior tiene

movimiento excéntrico mediante un brazo mecánico y este puede ajustarse para acortar o alargar la trayectoria o *carrera* como usualmente suelen llamarle los técnicos en fabricación. En este eje se coloca el vidrio que será la *Herramienta* para el esmerilado y además de tener movimiento excéntrico también rotará libremente debido a la fricción que tiene con la superficie a través de abrasivo que está de por medio.



Figura 12: *Máquina de pulido tradicional, (Edición propia).*

Ya que vamos a partir de un vidrio plano, será necesario comenzar el proceso de esmerilado utilizando abrasivos gruesos para alcanzar el R_c en un tiempo no tan prolongado. Para esta tarea, iniciamos con abrasivo de Carburo de Silicio del número 80 (el tamaño de partícula es de 266 micras aproximadamente), posteriormente del número 180 (de 86 micras) y finalmente del número 220 (66

micras). Al finalizar este proceso, el R_c deberá ser medido con un esferómetro (Fig. 13b) para garantizar que se encuentra cerca del valor requerido, es recomendable que esté un par de micras por arriba de su valor ya que en el proceso de esmerilado se continuará desbastando el vidrio.

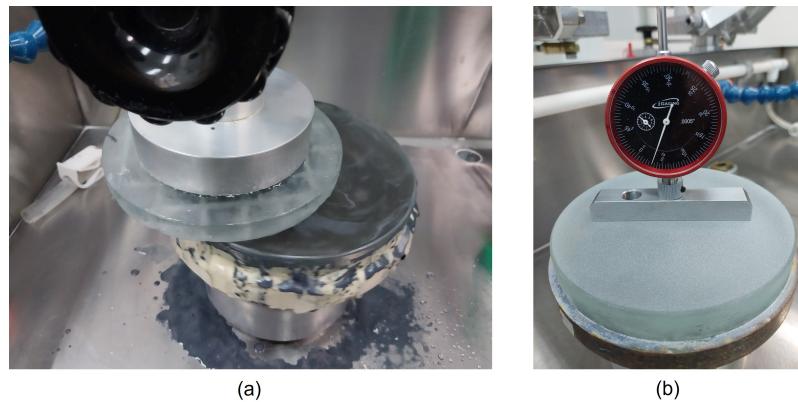


Figura 13: *Proceso de esmerilado (a) Generación del radio de curvatura (b) Medición del radio de curvatura, (Edición propia).*

El esferómetro es un instrumento mecánico que consiste de un trípode que forma un plano y un pistón central que permite medir la sagita (en mecánica conocida como flecha) directamente sobre la superficie cóncava o convexa (Fig.14). Una vez conocido el valor de la sagita el R_c se obtiene a través de la siguiente ecuación

$$R_c = -\frac{z}{2} + \frac{y^2}{2z} \pm r, \quad (7)$$

donde z es el valor de la sagita que depende de y que es la distancia del centro a cualquier brazo del trípode y r es el radio de las pequeñas esferas que se encuentran al final de los brazos del trípode.

3.2. Proceso de esmerilado

Al igual que el proceso anterior, este también se desarrolla empleando la misma máquina pulidora utilizando abrasivos con menor tamaño de partícula, comúnmente son óxidos de aluminio, se comienza con un abrasivo de 40 micras y se va

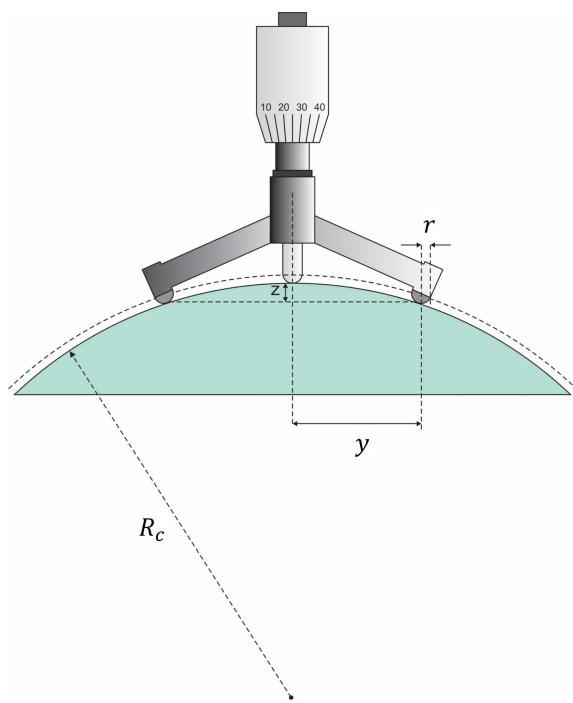


Figura 14: *Esferómetro mecánico, (Edición propia).*

disminuyendo a 25, 15, 9 y finalmente 5 micras (Cebrian, et al., 2018). El tipo de carrera que se usa en la máquina, se elige de acuerdo al desgaste que se desea realizar sobre superficie.

Existen tres tipos de carreras fundamentales que se utilizan en el proceso de esmerilado y el pulido de las superficies ópticas, estas carreras se describen a continuación:

- *Carrera normal.* Una cuarta parte del diámetro de la *Herramienta* sobresale de la *Superficie* y a su regreso coincide orilla con orilla tal como se muestra en la figura 15. Con este tipo de carrera se produce un desgaste uniforme sobre toda la superficie logrando mantener el R_c en el proceso.
- *Carrera larga.* Una tercera parte del diámetro de la *Herramienta* sobresale de la *Superficie* y a su regreso coincide orilla con orilla tal como se muestra en la figura 16. Con esta carrera se produce mayor desgaste en la orilla de la *Superficie* logrando al final una *Superficie* convexa.
- *Carrera dos veces por el centro.* La *Herramienta* se mantiene oscilando

sobre la *Superficie* sin sobresalir coincidiendo orilla con orilla tal como se muestra en la figura 17. Con este tipo de carrera se produce mayor desgaste en el centro de la *Superficie* logrando al final una *Superficie* cóncava.

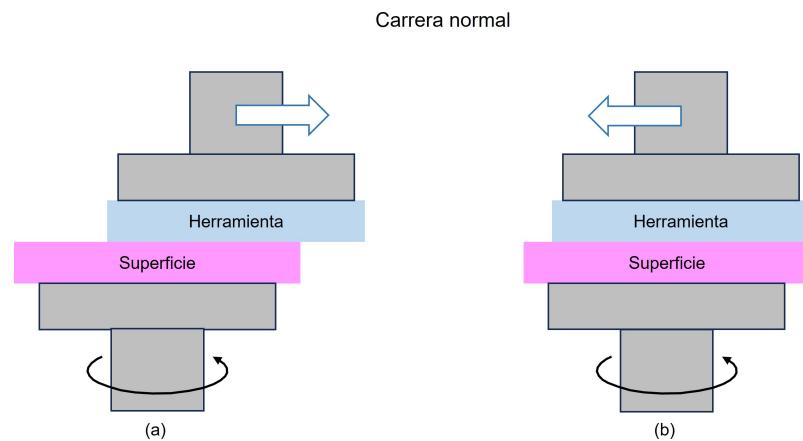


Figura 15: *Carrera normal*, (a) La Herramienta sobresale una cuarta parte de su diámetro respecto de la orilla de la Superficie, (b) A su regreso la orilla de la Herramienta debe coincidir con orilla de la Superficie, (Edición propia).

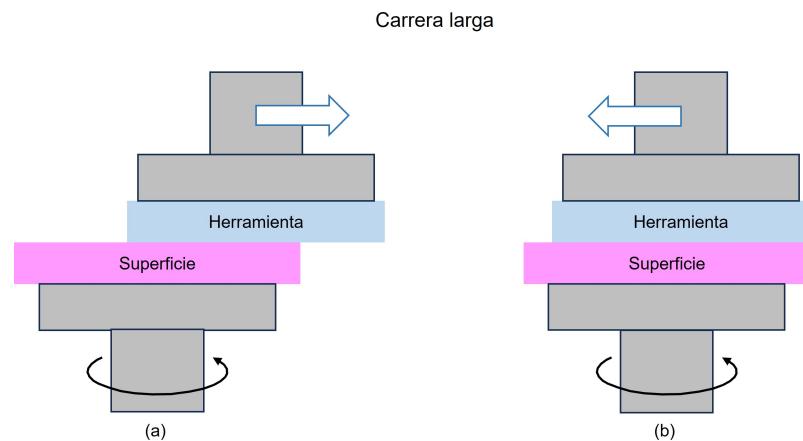


Figura 16: *Carrera larga*, (a) La Herramienta sobresale una tercera parte de su diámetro respecto de la orilla de la Superficie, (b) A su regreso la orilla de la Herramienta debe coincidir con orilla de la Superficie, (Edición propia).

De acuerdo con la experiencia del técnico, se puede hacer una modificación a las carreras, o bien, una combinación de estas para esmerilar o pulir alguna zona en particular sobre la *Superficie*. Por otra parte el tiempo de esmerilado o pulido también juega un papel importante, de este depende la cantidad de material que se desbasta sobre la *Superficie*, así como también la presión que ejerce la *Herramienta* sobre la *Superficie*, se recomienda que el proceso de esmerilado y

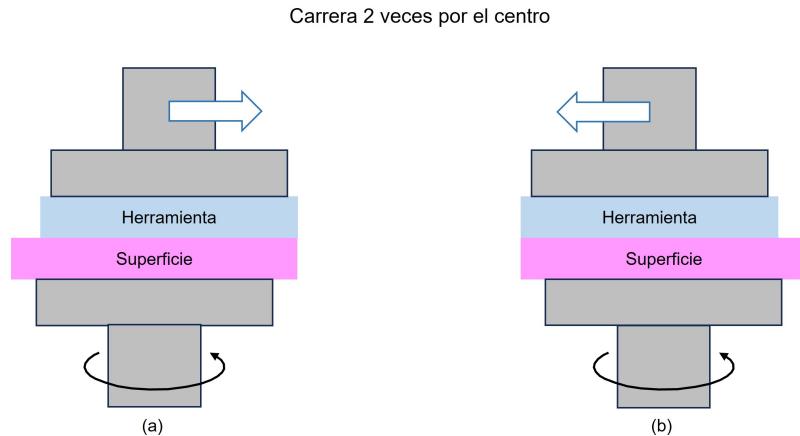


Figura 17: Carrera dos veces por el centro, (a) La Herramienta no sobresale, en su movimiento de ida, sólo debe desplazarse hasta que su orilla coincida con la orilla de la Superficie (b) A su regreso la orilla contraria de la Herramienta debe coincidir con orilla contraria Superficie, (Edición propia).

pulado se desarrolle en intervalos de 10 a 30 minutos. Al término de cada intervalo de esmerilado se debe limpiar adecuadamente la *Superficie* y medir el R_c para verificar que se mantenga en el valor requerido. Al finalizar el proceso de esmerilado, la superficie tendrá el R_c requerido y la rugosidad de la superficie se habrá minimizado en gran medida, pero aún, tendrá una apariencia opaca casi transparente como se muestra en la figura 18, misma que desaparecerá en el siguiente proceso.

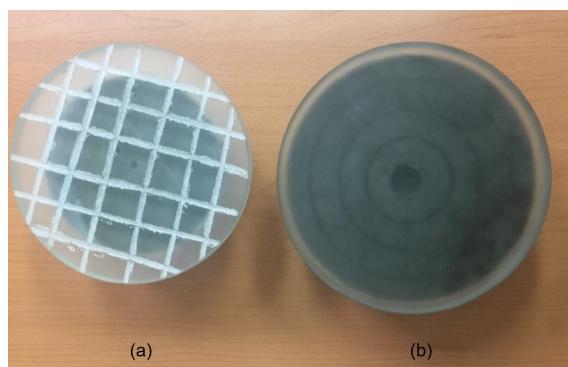


Figura 18: Apariencia de los vidrios al finalizar el proceso de esmerilado, (a) Herramienta de esmerilado, (b) Superficie que será el espejo, (Edición propia).

3.3. Pulido de la Superficie

Este proceso es muy similar al de esmerilado con principal diferencia de que la *Herramienta* de vidrio es sustituida por una *Herramienta* de Chapopote con el mismo diámetro y radio de curvatura, por otra parte, el abrasivo que se utiliza para el pulido es óxido de circonio con un tamaño de partícula promedio de una micra. En este proceso la *Superficie* adquiere transparencia total y el R_c ya no cambia (en el orden de micras). Para medir la forma de la superficie, se deberán emplear pruebas ópticas que permitan medir con precisiones del orden de nanómetros y que de preferencia no sean pruebas de contacto para evitar rayar la *Superficie*.

Las carreras utilizadas en este proceso son las misma que se describieron en el proceso de esmerilado. El tiempo del pulido, depende mucho de la experiencia del técnico, al finalizar cada intervalo de este proceso se deberá evaluar la forma de la superficie para determinar si se debe continuar puliendo y que carrera deberá usarse. Ya que en este proceso la *Superficie* adquiere la calidad óptica requerida, será necesario pulir tantas veces como sea necesario hasta conseguir la calidad requerida.

3.3.1. Fabricación de la herramienta para el pulido

Para fabricar la herramienta de pulido, se utiliza Chapopote (pitch) y Brea en una proporción 4 a 1 respectivamente, estos dos ingredientes se ponen juntos en un recipiente y se deben calentar hasta lograr que se fundan para poder revolverlos hasta conseguir una mezcla homogénea. Antes de que la mezcla se enfrie y endurezca, se vierte sobre el vidrio que fue la *Herramienta* en el proceso anterior, al que previamente se le debe colocar cinta *Masking Tape* en toda su periferia de manera que sirva como pared para que la mezcla no se derrame (Figura 19a). Posteriormente se deja enfriar y antes de que endurezca por completo se prensa contra la *Superficie* por un tiempo de alrededor de 20 minutos para que logre adquirir la misma curvatura y termine de enfriarse por completo (Figura 19c). Después de que se ha enfriado por completo, con una navaja (cuter o cuchillo) se le recorta el exceso en toda la orilla para que tenga el diámetro requerido y

se le hacen unos canales para que en el proceso de pulido, el abrasivo pueda fluir por toda la superficie (Figura 19d) y así finalmente estará lista la *Herramienta* para dar inicio al pulido

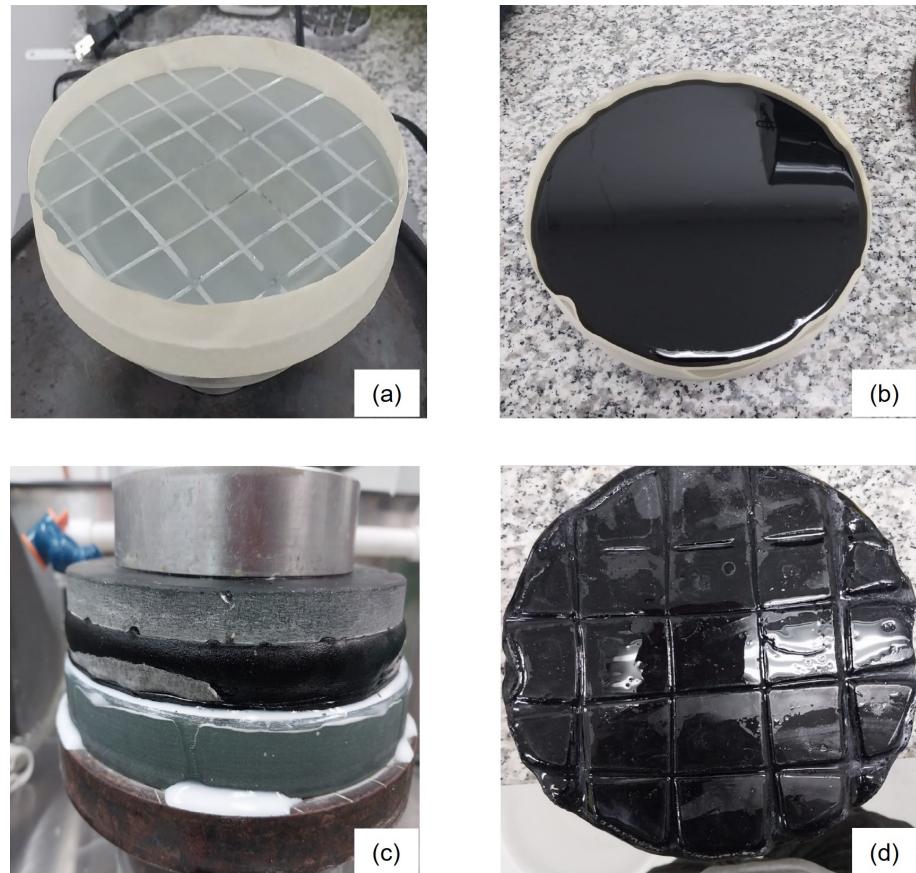


Figura 19: *Preparación de la herramienta de Chapopote*. (a) Colocación de cinta Masking Tape alrededor del vidrio, (b) Depósito de la mezcla caliente, (c) Prensado de la Herramienta sobre la Superficie y (d) Herramienta lista para el pulido, (Edición propia).

4. Prueba de la calidad óptica del espejo

Para evaluar la calidad óptica del espejo se puede recurrir a las pruebas geométricas tales como prueba de Foucault (J. Ojeda-Castañeda, 2007), Ronchi (A. Cornejo-Rodríguez, 2007), etc., o bien, a las pruebas interferométricas tal como el interferómetro de Newton, Fizeau (Mantravadi, Malacara, 2007), etc. La elección de la prueba dependerá particularmente de la geometría de la superficie a evaluar y con cuanta precisión se desea medir. Comúnmente las pruebas interferométricas son las más utilizadas debido a que son pruebas de alta precisión que permiten detectar deformaciones en la superficie del orden de nanómetros.

Para nuestro caso, nos limitaremos a evaluar el espejo de forma cualitativa utilizando la prueba geométrica de Ronchi, esta evaluación será suficiente ya que no requerimos alta precisión al tratarse de un espejo para telescopio de aficionado.

4.1. Prueba de Ronchi

La prueba de Ronchi es una prueba geométrica ampliamente utilizada para evaluar sistemas ópticos convergentes, es fácil de implementar y se pueden obtener mediciones de alta precisión. El principio de funcionamiento de esta prueba se muestra en la figura 20. Esencialmente la prueba de Ronchi consiste en colocar una rejilla sobrepuerta a una fuente puntual S que se coloca muy cerca del centro de curvatura C del espejo cóncavo que se desea evaluar, la imagen de la rejilla que es reflejada por el espejo se superpone sobre la rejilla misma y puede observarse a simple vista una serie de franjas brillantes y oscuras intercaladas proyectadas sobre la superficie del espejo.

La ideal principal en esta prueba es que si el espejo es perfectamente esférico, se deberán observar franjas rectas, paralelas y de igual espesor, cualquier otra forma de las franjas indicará que existen aberraciones (deformaciones), esta es una manera muy sencilla y rápida que utilizan los técnicos en fabricación para evaluar cualitativamente la superficie del espejo y mediante la interpretación de la forma de las franjas determinan si el espejo se debe seguir puliendo, que carrera

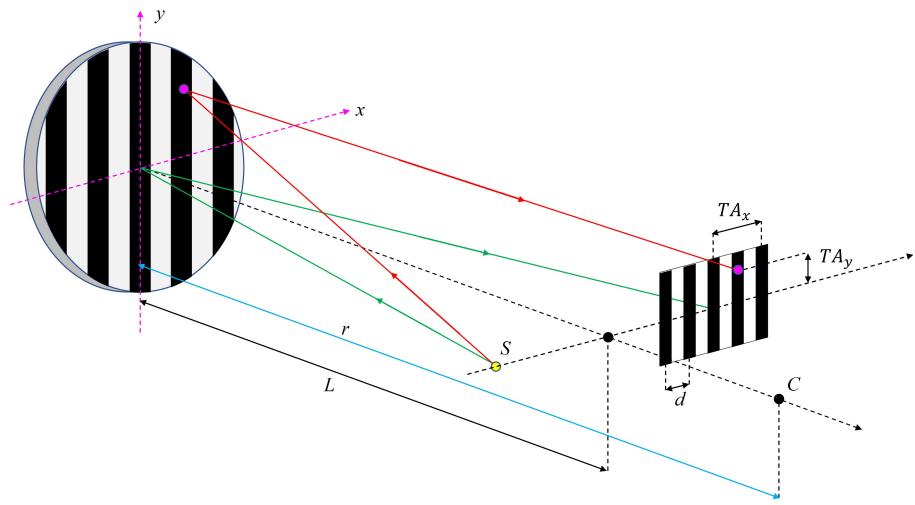


Figura 20: Esquema de la prueba de Ronchi, (Edición propia).

deberá usarse en la máquina de pulido y el tiempo aproximado. Posteriormente se deberá probar nuevamente el espejo para determinar si ya se ha alcanzado la calidad óptica requerida o se debe continuar puliendo.

En la figura 21 se muestran algunos casos particulares de los patrones de franjas (ronchigramas) (De la Herrán, 2012), que nos dan información acerca de la forma de la superficie del espejo, estas a su vez son la guía para determinar los parámetros de la siguiente etapa de pulido (si es que se requiere).

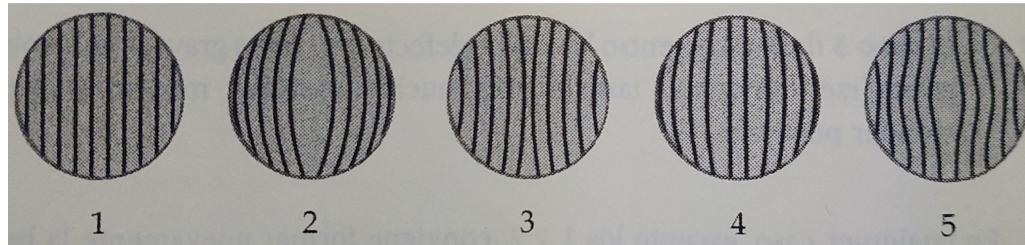


Figura 21: Patrones típicos de franjas que nos ayudan a conocer la forma de la superficie, (Figura copiada del libro *Construya su telescopio* del autor José de la Herran).

El caso (1) muestra el patrón de franjas que deberá observarse en la prueba de Ronchi cuando el espejo ya este listo. En el caso (2) muestra que el espejo es parabólico, si la curvatura de las franjas es muy ligera, el espejo puede ser aceptable y garantiza que el telescopio nos dará una buena imagen de los objetos observados a través de él. El caso (3) muestra que el espejo es una elipsoide y

se debe continuar con el pulido utilizando una carrera un poco larga por periodos de 15 minutos y a su vez se deberá de ir probando. El caso (4) indica que la orilla está más desgastada que el resto de la superficie del espejo, a este defecto también se le conoce como *orilla caída* y para corregirla se debe usar una carrera de dos veces por el centro en intervalos de 10 a 15 minutos y probar en cada intervalo el avance del espejo, por último el caso (5) significa que el centro del espejo está hundido y puede corregirse utilizando un carrera un poco larga de igual manera en intervalos de 10 a 15 minutos e ir probando el avance del espejo.

4.2. Arreglo experimental para la prueba del espejo

Haciendo uso del material disponible en el LUFABEO, se implementó la prueba de Ronchi utilizando dos rieles con longitud de un metro, en uno de ellos se montó el espejo de prueba y en el otro se colocaron el LED y la rejilla a una distancia aproximada igual al radio de curvatura del espejo ($R_c = 2.4$ m) como se muestra en la figura 22. Para garantizar la alineación del experimento, se utilizó un tercer riel de longitud de 2 metros, con este se alinean los rieles del espejo y de el LED con la rejilla. Como fuente de iluminación se utilizó un LED ultrabrilante en color rojo que trabaja con un voltaje de 3.5 volts, para lo cual se requirió construir un circuito de reducción de voltaje, mismo que estuvo a cargo por el Mtro. Mario Alberto Díaz Cruz del Instituto de Geofísica de la UNAM.



Figura 22: Arreglo experimental de la prueba de Ronchi, (Edición propia).

Después de localizar el radio de curvatura del espejo, el LED y la rejilla deben desplazarse unas decenas de milímetros dentro y fuera de foco para poder observar las franjas sobre el espejo (Ronchigramas).

5. Resultados

Después de que el espejo ha pasado por todos los procesos anteriores y se le han dedicado doce horas de pulido, se realizó la primera prueba para determinar el avance del pulido. Los primeros Ronchigramas obtenidos se muestran en la figura 23, para tres posiciones de la rejilla: (a) en foco, (b) desplazamiento dentro de foco de 35 mm y (c) 30 mm fuera de foco. Como puede observarse las franjas están muy distorsionadas lo que es indicativo de que nuestro espejo esta muy lejos de ser esférico y deberá continuarse con el proceso de pulido utilizando una carrera normal en la máquina de pulido. Posteriormente se fueron desarrollando un gran número de etapas pulido y al terminar cada una de ellas se fue probando el espejo y determinando los parámetros para la siguiente etapa y así sucesivamente.

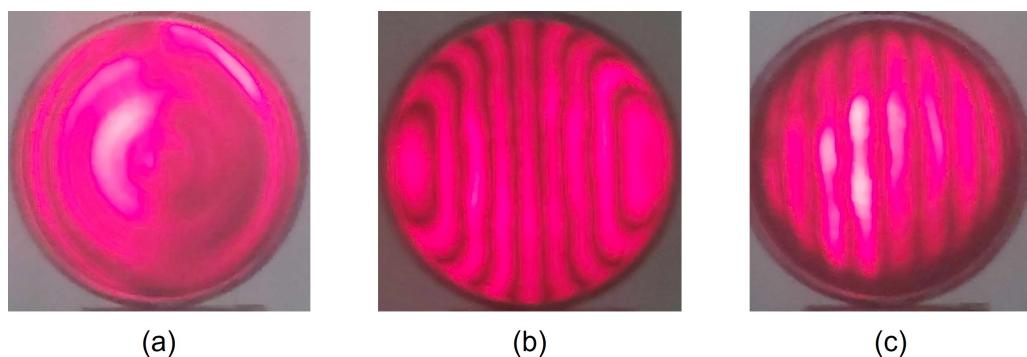


Figura 23: *Ronchigramas obtenidos en la primer etapa de pulido, (a) en foco, (b) dentro de foco 35 mm y (c) fuera de foco 30 mm, (Edición propia).*

En la figura 24 se muestran los Ronchigramas obtenidos en una etapa intermedia correspondiente a veintiséis horas de pulido para las misma posiciones de la rejilla:(a) en foco, (b) desplazamiento dentro de foco de 35 mm y (c) 30 mm fuera de foco. Mediante la observación de la forma de las franjas comparado con los Rochigramas que tenemos como referencia en la figura 21 podemos ver que nuestro espejo es un tanto parabólico y debemos seguir puliendo con una carrera ligeramente larga por periodos de 15 minutos y nuevamente ir probando

Finalmente después de un total de treinta y seis horas de pulido, podemos decir que nuestro espejo está listo, los Ronchigramas se muestran en la figura 25 de

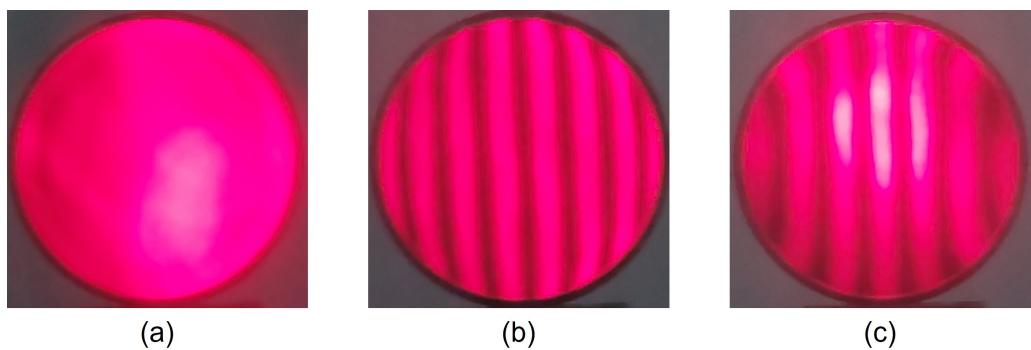


Figura 24: Ronchigramas obtenidos en una etapa intermedia correspondiente a 26 horas de pulido, (a) en foco, (b) dentro de foco 35 mm y (c) fuera de foco 30 mm, (Edición propia).

Igual manera como en los casos anteriores la rejilla se colocó en las mismas tres posiciones (a) en foco, (b) desplazamiento dentro de foco de 35 mm y (c) 30 mm fuera de foco. Se puede observar que las franjas prácticamente son líneas rectas, lo que era nuestro objetivo al comenzar el pulido del espejo.

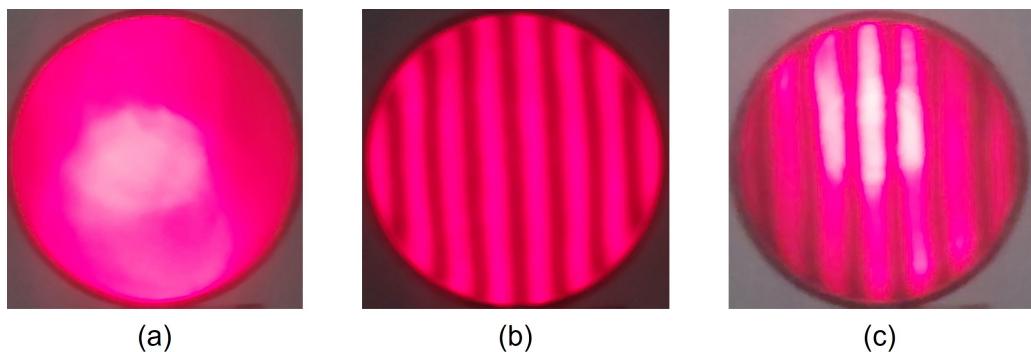


Figura 25: Ronchigramas obtenidos en la última etapa correspondiente a 36 horas de pulido, (a) en foco, (b) dentro de foco 35 mm y (c) fuera de foco 30 mm, (Edición propia).

Aunque hemos dado por terminado el proceso de pulido, podríamos seguir puliendo para mejorar aun más la calidad del espejo, pero recordemos que este espejo es para un telescopio de aficionado, motivo por el cual no se requiere alta precisión.

6. Conclusiones

Se realizó la fabricación de un espejo primario para un telescopio Newtoniano de aficionado mediante el método de pulido tradicional y utilizando la prueba de Rochi se evaluó de manera cualitativa la calidad del espejo.

La calidad del espejo puede ir mejorando en cada etapa de pulido siempre y cuando se haga una buena interpretación de la forma de las franjas para definir los parámetros de la siguiente etapa.

Es importante que cuando las franjas se comienzan a aproximar a ser rectas, se deben disminuir los tiempos de pulido e ir probando entre cada etapa.

Cuando no se cuenta con experiencia en el proceso de fabricación, es importante apoyarse de un experto en pulido, pues la mala interpretación de las franjas y el uso de una carrera inadecuada en la máquina de pulido puede echar a perder horas de trabajo de pulido

Agradecimientos

Al Dr Rafael Izazaga Pérez jefe del taller de óptica del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), por todo el apoyo brindado en el desarrollo del este trabajo.

A la Téc. Inv. Asociado C Emilia Cruz Zavala y al Téc. Titular B José Miguel Arroyo Hernández del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) por su asesoramiento en la interpretación de las franjas y determinación en las carreras de la máquina de pulido.

Referencias Bibliográficas

- A. Cornejo-Rodríguez. (2007). *Optical Shop Testing: Ronchi Test*, third Edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Cebrian, Rosete, Bruce. (2018). *Generación, esmerilado y pulido de superficies ópticas con el método de pulido tradicional*, Informe técnico interno, CCADET-UNAM.
- De la Herrán, José. (2012). *Construya su telescopio*, Dirección General de Divulgación de la Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México
- Hecht, Eugene. (2017). *Óptica*, 5ta edición, PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- J. Ojeda-Castañeda. (2007). *Optical Shop Testing: Focault, Wire, and Phase Modulation Test*, third Edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Malacara, Daniel. (2004). *Óptica básica*, Segunda edición, Fondo de cultura económica.
- M. V. Mantravadi and Malacara. (2007). *Optical Shop Testing: Newton, Fizeau and Haidinger Interferometers*, third Edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Pelling. (2008). *Who Invented the Telescope?*, History Today, Volume 58. Issue 10 October 2008.