

Cómo construir un telescopio reflector

Orlando Martínez*

RESUMEN

Para hacer observaciones astronómicas con un mínimo de 300 aumentos y una buena resolución de imagen es necesario utilizar un telescopio de apertura mayor que 10 cm. Sin embargo, el costo relativamente alto que puede significar su compra es desalentador para muchas personas potencialmente interesadas en la astronomía. Por ello, decidí pulir un espejo de 10 cm. de diámetro y, con la experiencia adquirida, conseguí pulir otros espejos de mayor tamaño.

En este trabajo se muestra en forma detallada cómo construir un telescopio reflector de bajo costo, incluyendo las técnicas de pulido de espejos cóncavos de distancias focales previamente establecidas en el diseño del telescopio.

Introducción

Un telescopio es un instrumento que sirve para observar objetos situados a gran distancia. En un telescopio reflector, el espejo cóncavo concentra en un sólo «punto» (foco del espejo) el haz luminoso proveniente del objeto, luego esta imagen es aumentada con un ocular. La configuración del telescopio reflector (Newtoniano) puede observarse en la figura 1.

* Universidad Nacional de Ingeniería/ Facultad de Ciencias/ Grupo Astronomía. Lima-Perú.
e-mail: orlandomartinez@hispavista.com

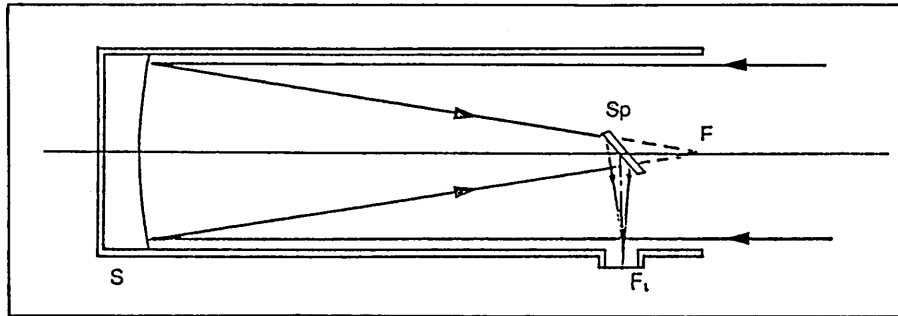


Fig 1. El montaje newtoniano. Delante del foco F del espejo parabólico S se pone un espejo plano S_p que refleje los rayos de luz lateralmente a F_1 , donde se coloca el ocular o la placa fotográfica, o los otros aparatos para el examen de la luz.

El primer telescopio que utilizó un espejo como objetivo lo construyó Isaac Newton en 1688; dicho espejo era metálico (aleación de estaño y cobre), con un diámetro de 3,5 cm y una distancia focal de 16,5 cm. El espejo metálico más grande fue construido por William Parsons, Conde de Rosse con un diámetro de 1,8 m. Si bien el empleo de espejos corregía la aberración cromática de los primeros telescopios refractores (como el anteojo de Galileo) y permitía además ampliar el diámetro del objetivo sin repercutir en el peso del telescopio, en cambio ellos tenían un problema serio: «se oxidaban», motivo por el cual debían pulirse periódicamente.

Por aquellos tiempos se regresó al empleo de los telescopios refractores hasta que se diseñaron técnicas apropiadas para pulir espejos cóncavos sobre un trozo de vidrio común, que luego sería **plateado** (y en la época moderna, **aluminizado**).

Entre las ventajas del **telescopio reflector** podemos mencionar:

- No tiene aberración cromática.
- Recomendable para trabajo de astrofotografía.
- Refleja imágenes con buen brillo.
- Bajo costo por cm. de apertura comparado con los de tipo refractor.
- Razonablemente compacto y cómodamente transportable para distancias focales comparables a 100 cm.

Entre las desventajas tenemos:

- El tubo abierto en la parte delantera recibe corrientes de aire y contaminaciones.

- Requiere mantenimiento: Esto es, colimación periódica.
- Para grandes aperturas (mayores a 8") son pesados y requieren montura especial.
- Generalmente no se usan para aplicaciones terrestres porque las imágenes observadas en el ocular se ven invertidas.

Los aspectos más importantes en la construcción de un telescopio reflector son:

- **Apertura (D).** Es la medida del diámetro del espejo. A mayor apertura, mejor resolución, mayor contraste, imagen más brillante.
- **Distancia focal (f).** Distancia desde el espejo hasta donde converge el haz luminoso que proviene del infinito. A mayor distancia focal se obtiene mayor potencia, mayor tamaño de imagen y menor campo de visión.
- **Poder resolvente o poder de separación.** Es la capacidad para separar dos objetos, por ejemplo una estrella binaria, en 2 imágenes distintas separadas unos segundos de arco. El poder resolvente es función directa de la apertura. Este es uno de los aspectos más importantes a tomar en cuenta.

La medida angular de la mancha de difracción (disco de Airy) vale, en radianes: $1,22 \lambda / D$ y, en segundos de arco: $1,22 (206265) \lambda / D$.

El radio lineal de dicha mancha mide entonces: $r = 1,22 \lambda (f/D)$.

Así, cuanto mayor es el diámetro del objetivo, menor es la imagen de la estrella y por tanto el disco de Airy. Esta característica no depende del ocular o de otras lentes intermedias, sólo del objetivo. En los telescopios, generalmente la figura de difracción no se puede apreciar con facilidad debido a la turbulencia de la atmósfera y a otros defectos.

- **Potencia o magnificación (M).** Nos dice cuán grande vemos el objeto utilizando el telescopio y, depende de 2 parámetros independientes: las distancias focales del espejo y del ocular: $M = f(\text{obj}) / f(\text{ocular})$. Como regla general la máxima potencia de uso es $M=60$ por cada pulgada de apertura del telescopio. Por ejemplo: para una apertura de 8", $M = 60 \times 8 = 480$ aumentos como máximo; pero las mejores observaciones se hace en el rango de 20 a 35 de poder por cada pulgada de apertura, o sea, 160 hasta 280 para el espejo de 8".

- **Magnitud límite (M.L).** Existe un sistema numérico que indica cuánto brilla un objeto estelar. A mayor magnitud el objeto tiene menor brillo. Por ejemplo, Sirio (ubicada en la constelación del Can Mayor) es la estrella más brillante con una magnitud de $-1,46$; Rigel (ubicada en la túnica de la constelación de Orión) tiene una magnitud $0,08$; la estrella polar tiene magnitud $2,12$.

La estrella más débil que puede verse con un telescopio es la magnitud límite y está relacionada directamente con la apertura:

$$M.L = 7,5 + 5 \log (D)$$

- **Límite de la imagen de difracción.** (Criterio de Rayleigh). Rayleigh encontró que si la onda defectuosa real producida por imperfecciones del objetivo, no se aparta de la onda esférica en más de $1/4$ de longitud de onda de la luz, la imagen de difracción no sufre más que débiles alteraciones. Así, en un espejo se puede tolerar un máximo de $(0,56/4)/2 = 0,07 \mu\text{m}$. como mayor defecto.

Fundamento teórico

FORMA DEL ESPEJO PRINCIPAL

Las leyes elementales de reflexión permiten prever fácilmente que un espejo esférico cóncavo dará una buena imagen de un objeto colocado cerca de su centro de curvatura. La observación de un astro que puede considerarse como infinitamente alejado exige por el contrario, que todos los rayos paralelos al eje convergan en un solo punto (foco), y esto se logra con un espejo parabólico (ver figura 2). Todo espejo parabólico puede aproximarse a un espejo esférico teniendo en cuenta el criterio de Rayleigh, esto es, el espejo esférico debe tallarse de tal modo que:

$$f^3 \geq 34,9 D^4$$

Veamos algunos ejemplos:

D (cm)	f mínimo (cm)
10	70
15	120
20	177
25	240

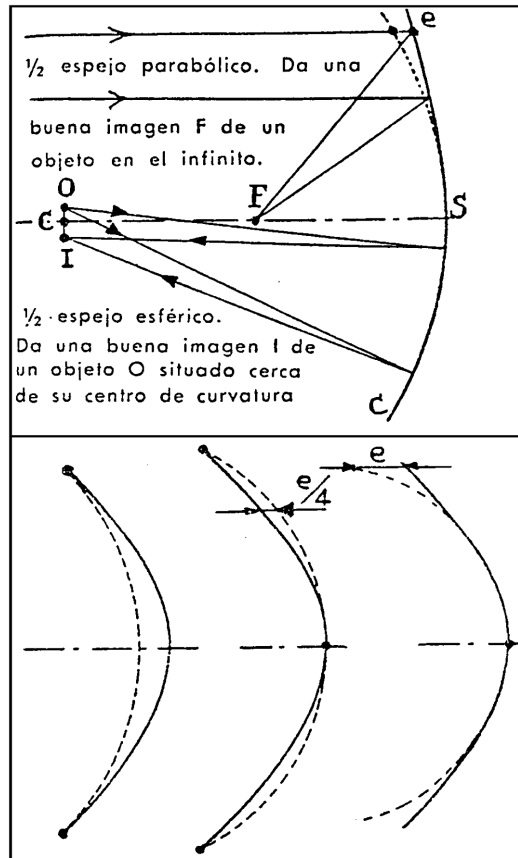


Fig. 2 (Arriba). Necesidad de un espejo parabólico.
 Fig. 2 (Abajo). Comparación de una parábola con 3 esferas de radios decrecientes.

TRABAJO CON EL VIDRIO Y TÉCNICA DEL PULIDO.

El trabajo de pulido de alta precisión de las superficies del vidrio está dominado por dos hechos esenciales conocidos (o inconscientemente aplicados) desde la edad de piedra: el aprovechamiento de los procedimientos de ajuste por frotamiento y la 'ley de los grandes números'.

Ajustar por frotamiento una superficie es frotarla contra otra de extensión comparable, que toma ahora el nombre de 'herramienta', con la interposición de un abrasivo, es decir, un polvo compuesto por pequeños granos cortantes más duros

que el cuerpo a trabajar. La combinación del movimiento de traslación y de la presión que se le hace sufrir a las piezas -presión repartida sobre las duras y agudas aristas de los granos de abrasivo- provoca en un material frágil como el vidrio una multitud de fracturas y de pequeños fragmentos, principalmente en las zonas sobresalientes, que tienden entonces a aplanarse.

Si la ley del movimiento relativo de las piezas es tal, que un régimen de presiones iguales pueda existir en todas partes, se obtendrá automáticamente la nivelación de las superficies con una precisión del orden del diámetro de los granos interpuestos. Si este movimiento está dirigido en todos los sentidos, las superficies tomarán necesariamente una forma esférica (o plana como caso particular) puesto que ésta es la única que permite el contacto con todas las posiciones. El vidrio de arriba toma la forma cóncava y el de abajo (herramienta) se vuelve convexo. Los accidentes elementales, pequeños pozos y fracturas, son también comparables en dimensiones al tamaño de los granos interpuestos. Pero una pequeña desigualdad en la presión, por ejemplo repetida siempre sobre el mismo punto de la carrera, puede crear una notable deformación; para evitarla, es necesario volver improbable esta repetición exacta y aprovechar la 'ley de los promedios'. Como el trabajo exige en total varias centenas de millares de carreras de frotación se concibe que, si el movimiento está dado por la mano de una persona que sabe más o menos la amplitud que debe dar al movimiento, se producirá a la larga una asombrosa compensación exacta de los errores individuales. En cierto sentido podría decirse que cuantas más torpezas cometa el operador, tanto mejor resultará el pulido.

Equipo y materiales

Se construyó un banco de trabajo de madera de superficie superior circular, de 3 patas estabilizado mediante pesas en su base. Además en una mesa adicional se colocó un porta-espejos (de madera) para mantener orden y limpieza.

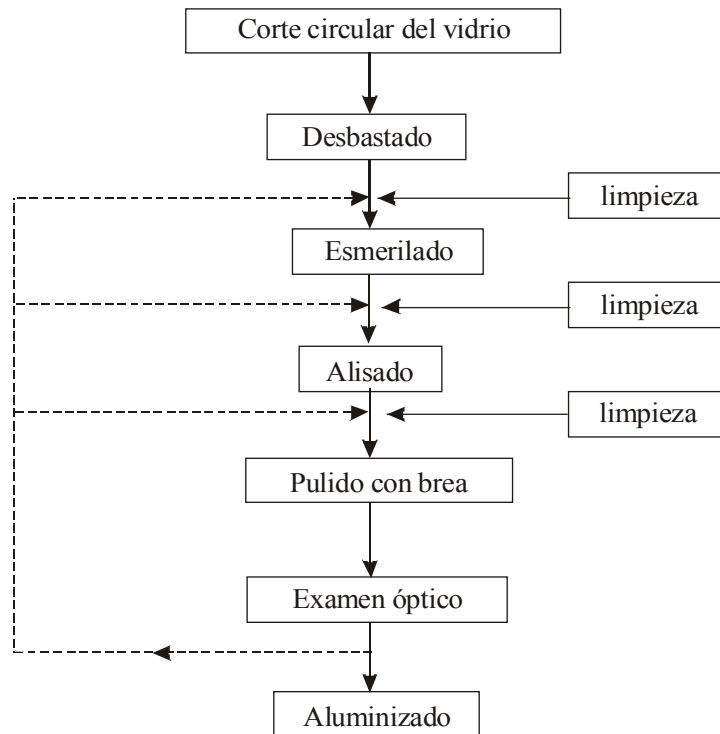
Es necesario disponer de baldes pequeños con agua para lavar el espejo y recoger los abrasivos usados, pinceles y esponjas.

Los materiales e insumos usados fueron:

- Esmeril en polvo: Carborundum #50, #120, #220.
- Óxido de aluminio.
- Óxido de cerio.
- Brea.
- Vidrio plano de 19 mm. de espesor.

Metodología para el pulido del espejo

Se usa el método de pulido de espejo a mano. Las etapas para el pulido del espejo se muestran en el diagrama de flujo adjunto:



CORTE CIRCULAR DEL VIDRIO

Como los cortadores de diamante sólo pueden cortar vidrios circulares hasta de 6 mm de espesor, fue necesario desbastar el contorno circular del vidrio con una herramienta de corte y esmeril #50. Se desbastó 6 mm por cada cara del vidrio, luego se procedió a cortar con una cuchilla diamantada sobre el contorno hueco y finalmente a lijar las imperfecciones de este último corte; además se hizo un bisel de 3 mm.

El esmeril usado fue recogido, lavado y guardado para uso posterior.

DESBASTADO

Se coloca el vidrio llamado ‘herramienta’ sobre el banco de trabajo apoyado sobre 1 ó 2 franelas, se vierte un poquito de esmeril #120 mojado y con el disco superior presionado se recorre su superficie según lo indica la figura 3. Así se logra que el espejo superior se vuelva cóncavo y el inferior convexo. Antes que las 2 superficies logren acoplarse por completo se cambia de tamaño de esmeril. Para ello debe lavarse todos los materiales utilizados, botar todos los papeles y/o plásticos que sirvieron de protección, lavar y cubrir con una capa de laca el banco de trabajo, guardar el esmeril #120. ¡¡Es mejor tomar todas las precauciones aunque parezcan innecesarias!!

ESMERILADO

Se usó el carborundum #220 en cantidades más pequeñas que en el caso anterior (este esmeril corta más rápido). Justo antes de lograr un buen acople de superficies, intercambiar los espejos de posición para bajar la velocidad de desbaste y lograr una mayor homogeneidad en la superficie. Las picaduras del grano anterior deben desaparecer usando este grano.

Una vez terminado este proceso, y lograda la curvatura deseada se puede recoger el grano, lavarlo, decantarlo, separar los granos pequeños de los grandes y utilizarlos de nuevo (los más pequeños). Para lograr una mejor superficie, de ahora en adelante debe intercambiarse los espejos arriba y abajo. Obviamente se hizo primero el ritual de limpieza descrito más arriba.

ALISADO

Se utiliza óxido de aluminio, el cual tiene un grano muy fino, por lo cual la limpieza en el taller debe ser muy rigurosa. Aparte de lo descrito anteriormente debe contemplarse la limpieza general de todos los materiales; si es posible sacar primeramente los abrasivos gruesos del taller, cambiarse de ropa de trabajo y luego (al siguiente día) volver a hacer la limpieza de materiales. ¡¡ En estas circunstancias del proceso un sólo granito de esmeril #220 puede malograrnos horas (o días) de trabajo!!

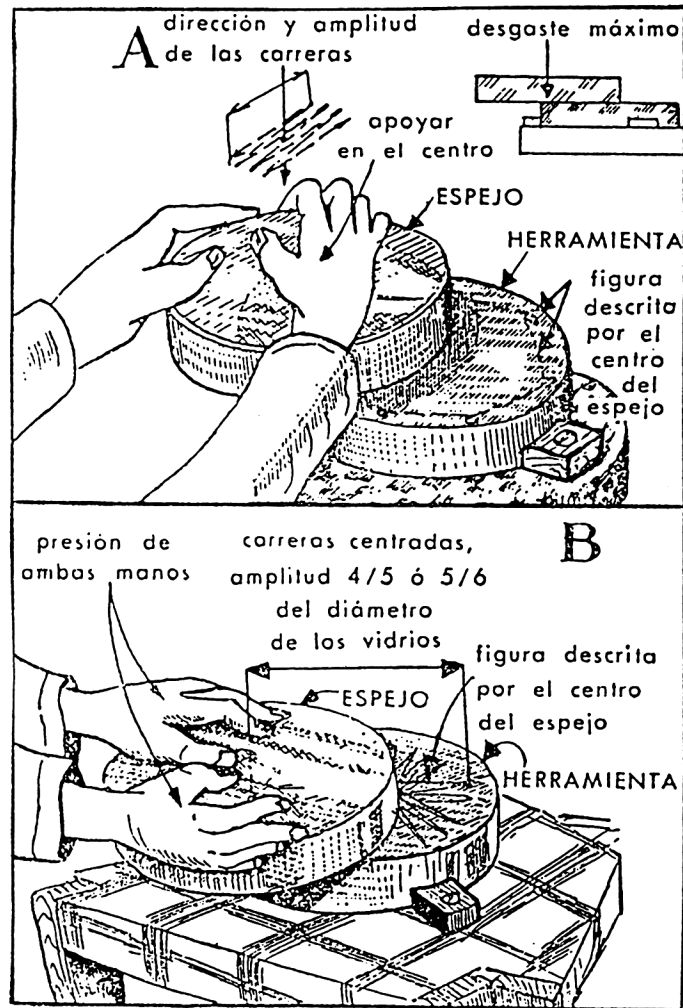


Figura 3. Carreras del desbastado:
A. Rectilíneas.
B. En forma de 8.

El alisado tiene el mismo proceso de trabajo anterior y termina cuando ya no se vea ninguna picadura grande y la superficie del espejo pueda reflejar la luz de una bombilla a un ángulo de 30° a 45° debemos tener presente que el agua utilizada en el alisado se seca rápidamente, corriéndose el riesgo de que los discos queden pegados.

PULIDO CON BREA

Para un buen pulido las superficies deben estar completamente amoldadas bajo el mismo radio de curvatura. Esto se logra cambiando el molde convexo de vidrio por uno de brea, el cual es más blando y se amoldará en todo momento a la superficie del espejo.

Sobre la superficie del molde convexo se vierte brea líquida (calentada lo suficiente) y se practica surcos de unos 5 mm. de ancho para formar cuadraditos de 2 cm. de lado. Se prensa con el espejo interponiendo un papel enjabonado o plástico. Se deja enfriar y luego se puede volver a prensar. También es buena idea usar kerosene sobre la brea al momento de prensar. Una vez que el molde de brea tiene todas las garantías de trabajo se le pasa con un pincel de óxido de cerio húmedo y se procede a realizar el pulido con la misma técnica anterior, intercambiando los discos. El final del pulido se logra cuando no existan más picaduras (o sean muy pocas y pequeñas) y la superficie se presente transparente.

TEST DE FOUCAULT

Es un método simple pero muy útil para examinar la esfericidad de espejos cóncavos. El instrumento consiste de una rendija iluminada que sirve de fuente de luz la cual iluminará el espejo, y éste convergerá esa luz sobre su foco. Una cuchilla de filo paralelo a la rendija cortará los haces como en la figura 4; si el espejo es perfectamente esférico cóncavo la sombra que uno puede apreciar será vertical; si tiene deformaciones entonces éstas se verán como en la figura 4 D. Este aparato de prueba fue también construido.

ALUMINIZADO

El espejo ya pulido debe ser aluminizado en su cara anterior. En el presente proyecto, el aluminizado fue realizado en el laboratorio de películas delgadas de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el profesor César Chung, usando la técnica de evaporación al vacío.

CONSTRUCCIÓN DE LA MONTURA

El espejo debe ser colocado en un tubo acondicionado para el telescopio. En el presente caso se usó tubo de PVC de 6" de diámetro el cual presenta suficiente rigidez.

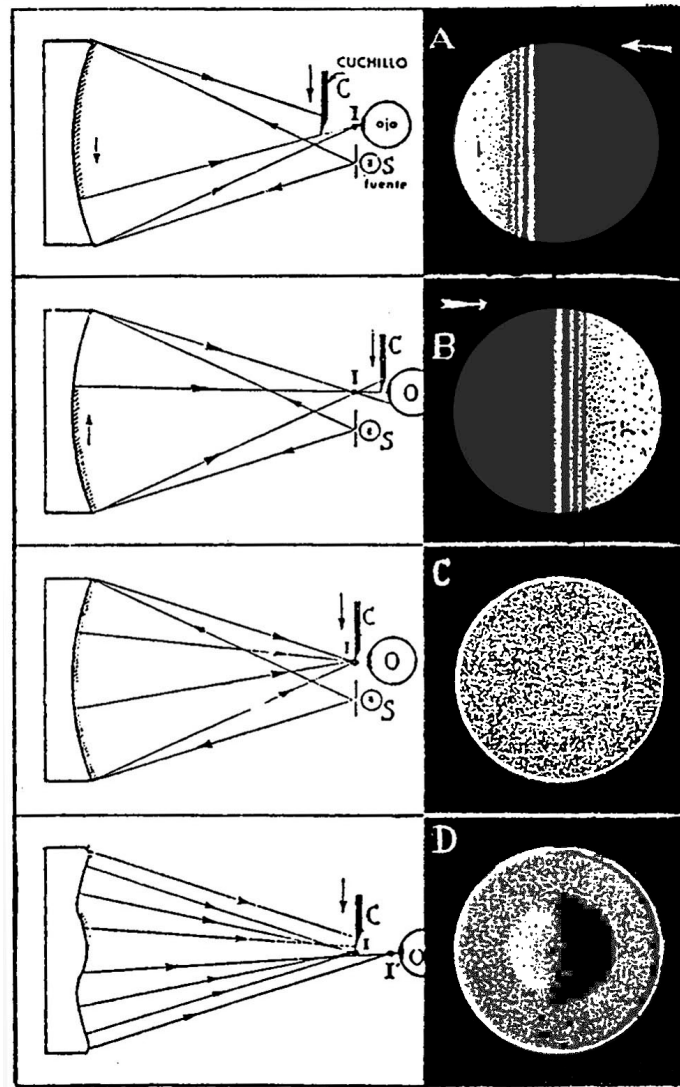


Fig 4: Explicación geométrica del método de Foucault.

La montura usada es del tipo azimutal, con movimiento en 2 ejes: vertical y horizontal. En verdad, una vez colocado el espejo en el tubo y dispuesto sus otros componentes, éste puede ser colocado en cualquier tipo de montura, siendo uno de los más sencillos el tipo dobsoniano por su facilidad de fabricación.

PRODUCCIÓN EN SERIE

Con la experiencia de haber pulido el espejo de 10 cm y comprobado que era demasiada la inversión de tiempo e insumos, se procedió a realizar un pulido de 4 espejos simultáneamente. Asimismo se pretendía con ello lograr pulir espejos con igual curvatura para así homogenizar criterios de fabricación o que se pueda utilizar en telescopios de espejos múltiples como el ubicado en el Monte Hopkins o el del Monte Palomar (U.S.A.).

Por otra parte, la fabricación individual del espejo trae consigo movimientos repetitivos que pueden ocasionar deformaciones que fueron comprobadas en el trabajo anterior mencionado (espejo de 10 cm de diámetro). Al tener una base más amplia de elementos, estos movimientos deben ser disipados sobre todos ellos, lo cual también fue comprobado (al menos en 2 de los espejos que llegaron a terminarse de pulir a la fecha). Para reforzar este último criterio se utilizó espejos de diferentes diámetros, dos espejos de 13 cm (para lograr distancias focales iguales), uno de 12 cm y uno de 9 cm (este último sólo como un espejo de prueba).

Los espejos se pulieron según una secuencia: disco de 13 cm., disco de 9 cm., disco de 13 cm., disco de 12 cm.

Durante el proceso de esmerilado, los dos discos de 13 cm fueron intercambiados cada cierto número de recorridos de las herramientas, lográndose curvaturas casi idénticas que fueron corregidas durante el alisado por simple inspección al contacto de las 2 superficies (espejo 1 con herramienta 2 y, espejo 2 con herramienta 1).

La prueba óptica se hizo para el espejo de 13 cm. Al finalizar la primera prueba se notó serias anomalías en forma concéntrica, pero de magnitud pequeña (según el contraste que ofrecía las sombras), siendo necesario prensar el espejo sobre la brea y reiniciar el pulido.

En la segunda prueba la superficie mejoró notablemente aunque en el centro del espejo no se logró mejora. Se prensó una vez más el espejo al molde y en la siguiente prueba no se notaron mejoras sustanciales; lo mismo sucedió la siguiente vez, procediéndose entonces a seguir con el pulido sin volver a prensar.

Al final del trabajo se obtuvo una superficie aceptable con una pequeña zona ligeramente hundida en el centro del disco que no pudo ser superada. Sin embargo al estar el espejo secundario en el centro del diámetro del tubo óptico, esa área quedará tapada, además dicha superficie es pequeña comparada con el total del espejo.

Al finalizar el pulido del espejo 1 (de 13 cm) y estando a la mitad del pulido del espejo 2 (de 13 cm) sus distancias focales son: $f_1 = 100,8$ cm; $f_2 = 101,2$ cm con un margen de error, al tomar las medidas con el aparato de Foucault; de 0,5 cm.

Al finalizar el alisado se tuvo un gasto de 44 horas efectivas de trabajo sobre los discos, sin contar el tiempo para cortar los discos, pulir sus dorsos y las tareas de limpieza. El tiempo de pulido es variable según la calidad de la superficie obtenida luego del alisado, no menos de 6 horas si el resultado en la primera prueba óptica fuera satisfactoria.

Aplicaciones

- La aplicación obvia y directa es el uso que le puede dar un aficionado a la astronomía, como es la observación planetaria, estelar y otros.
- Siendo un telescopio económico (más precisamente el pulido del espejo), puede estar al alcance de cualquier persona o institución y ser utilizado con fines de enseñanza. Por ejemplo, un colegio puede adquirir el espejo con el montaje óptico en el tubo y diseñar su propio soporte.
- Logrando fabricar varios espejos de distancias focales muy similares pueden ser utilizados por alguna institución para construir un telescopio de espejos múltiples cuya apertura equivalga a alguno de tamaño grande.
- Los espejos pueden servir como concentradores de luz de diferentes tamaños.

Conclusiones

- Terminado el pulido y realizado el control de calidad, se midieron y calcularon las características del espejo de 13 cm:

Abertura libre (D)	: 12,7 cm.
Distancia focal (f)	: 100,8 cm.
Poder resolvente	: (1,1)''
(Para $\lambda = 0,56 \mu\text{m.}$)	
Potencia máxima (M)	: 300X
Magnitud límite observable (M.L.)	: 13

- Sin tomar en cuenta la inversión en horas de trabajo, el costo del telescopio fue económico comparándolo con uno importado:
 - El vidrio para los 8 discos costó S/.5 (5 nuevos soles).
 - Conseguir oculares es un problema a solucionar.
 - Los abrasivos, si bien son caros, se gastan poco y, si se lavan adecuadamente pueden utilizarse varias veces.
 - El gasto por aluminizado fue por cuenta del laboratorio de películas delgadas de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM.
 - El costo de la montura es variable (se estima un mínimo de 30 dólares para una montura sencilla de madera).
 - La montura de madera y algunas piezas metálicas se pueden construir en cualquier taller.
 - El soporte metálico del tubo óptico fue construido por el personal del taller de mantenimiento en la Facultad de Ciencias de la UNI utilizando materiales sobrantes que pude conseguir a bajo precio.
- Los espejos de 13 cm de apertura lograron una distancia focal cuyo error de comparación no excede a 0,6 cm. Se puede mejorar la técnica para disminuir el error.

Agradecimientos

- *Agradezco al profesor **César Chung** del laboratorio de películas delgadas de la **Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM** por su gentil apoyo en el aluminizado de los espejos de 10 cm y 13 cm.*
- *Agradezco además al señor **José Farfán**, jefe del taller de mantenimiento de la **Facultad de Ciencias de la UNI**, por su apoyo en la construcción del soporte metálico del tubo óptico para la montura azimutal.*
- *También agradezco al profesor **Alcides López** por sus consejos y datos útiles al iniciarme en la actividad de pulido de espejos.*
- *Además agradezco la colaboración brindada por el **Grupo Astronomía** de la **Facultad de Ciencias de la UNI** en la realización de este proyecto.*

REFERENCIAS

- [1] **Texereau, Jean**; *“El telescopio del aficionado”*; Eudeba; Buenos Aires; 1961.
- [2] **Twyman**; *“Optical Glassworking”*; Hilger and Watts Limited; Londres; 1955.
- [3] **Celestron international**; *“Celestar instruction manual”*; 1997.
- [4] **Sarpe**; *“El Universo, enciclopedia Sarpe de la astronomía”*; Madrid; 1982 Volumen 3 pág. 1133-1139; Volumen 4 pág. 1170-1181, 1277, 1506.