

Fabricación de la torta con cuadrados de brea individuales.

1. ***Fusión de la brea.*** (Los números se refieren a los de la figura 23). La brea se parte en pedazos no muy grandes y se calienta lentamente a fuego moderado. Si la dureza es originalmente muy grande, se aguardará la fusión completa para agregarle unos centímetros cúbicos de trementina hasta obtener que una fuerte presión de la uña del pulgar deje sólo una marca ; si por el contrario, la uña del pulgar penetra sin dificultad, hay que prolongar el calentamiento el tiempo suficiente (varias horas si es necesario) para eliminar lentamente una parte de los solventes naturales. Cada cuarto de hora se retira con un cucharón una muestra que debe enfriarse durante 5 minutos como mínimo, en agua a la temperatura de la sala de pulido (20° C), antes de que pueda hacerse el ensayo de dureza.
2. ***Preparación del molde.*** Durante el caldeo de la brea se prepara un molde para las bandas de brea, de 20 mm de ancho y 7 a 8 mm de espesor. Basta con cubrir una tabla cualquiera con una hoja de papel de embalaje grueso, de superficie lisa, y clavar sobre ella varillas cuadradas de 8 X 8 mm forradas también. También sirve el papel que se le quita al “contact”. Clavar las puntillas a medias para su fácil extracción. Puede resultar ventajoso fabricar un molde bastante grande para poder colocar en una vez la brea suficiente para dos herramientas.
3. ***Colada de las bandas.*** Se recomienda quitar las impurezas más grandes que la brea pueda contener, filtrándola por medio de un colador de tela de mallas no muy cerradas, soportado por un armazón de alambre, pero es necesario asegurarse que la brea está suficientemente caliente como para colar casi como el agua. Si la brea proviene de recuperación de herramientas anteriores que contengan rojo hay que esperar la eliminación de las pequeñas burbujas que pueda contener. El molde se coloca exactamente horizontal y en sentido longitudinal y se llena hasta el tope pero evitando desbordar sobre las varillas. si se dispone de un pico de Bunsen es fácil eliminar las pequeñas burbujas superficiales pasando la llama sobre las bandas antes de que se enfríen.
4. ***Trazado de la herramienta.*** Se aprovecha el enfriamiento de la brea para trazar el emplazamiento de los cuadrados sobre la cara convexa de la herramienta de vidrio que nos ha servido para alisar. Cuando esta herramienta es gruesa y pesada se recomienda moldear sobre el espejo, provisto de una faja de papel fuerte, una torta de yeso de 4 cm de espesor para 20 cm de diámetro. Después de un secado de tres semanas como mínimo, esta herramienta puede ser protegida de la humedad por dos capas de gomalaca disuelta en alcohol. El sistema de cuadrados debe ser descentrado con referencia al contorno de la herramienta para evitar una posible causa de error sistemático.
5. ***Desmoldeo de las bandas.*** Después de un enfriamiento completo, de tres o cuatro horas cuando menos, se pueden desmoldar las bandas de brea, lo cual resulta más fácil si la brea está muy fría. Con precauciones para evitar romperlas, hay que quitar primero todos los clavos y arrancar con cierta brusquedad el papel dorsal ; luego se despegan las varillas con un pequeño movimiento de rotación, un poco seco, por medio de una tenaza o pinza que tome la extremidad. Si se han forrado las varillas, es mas fácil, pues se corta el forro con una cuchilla, y luego se desprende con menos peligro de romper las bandas.

6. **Recorte de los cuadrados.** Es muy fácil con un cuchillo bastante caliente para que no se pegue en la mitad del corte, pero no tanto para evitar la fusión en profundidad ; pueden cortarse 4 ó 5 cuadrados sin recalentar ni limpiar el cuchillo.
7. **Pegado de los cuadrados.** La brea no se adhiere bien sino sobre un cuerpo muy seco y algo caliente ; se puede entibiar la herramienta en agua caliente y secarla luego. No obstante es preferible el siguiente procedimiento empleado en el taller de la Comission des Instruments : se extiende rápidamente sobre la herramienta fría una delgada capa de cera de abejas bien caliente por medio de un pincel chato obtenido enrollando 3 ó 4 vueltas de tela en una paleta de madera. La cera se adhiere perfectamente al vidrio frío y los cuadrados de brea también se adhieren fuertemente sobre la cera fría ; por otra parte, la capa de cera servirá de amortiguador para los posibles choques contra el vidrio provocados por la arista cortante que servirá para recortar los cuadrados. Para pegar los cuadrados basta exponerlos durante 3 ó 4 segundos sobre una llama de una vela, o mejor todavía, sobre la llama luminosa de un pico Bunsen, hasta que una gota de brea esté próxima a caer. Se aplica en seguida el cuadrado exactamente en su lugar sobre la herramienta, presionándolo suavemente durante algunos instantes.
8. **Prensados.** El espesor de los cuadrados colocados puede variar en más de 1 mm. Una rápida nivelación con una herramienta filosa puede resultar conveniente, lo mismo que el raspado de los bordes de brea provenientes del centro del cuadrado cuando se ha empleado un cuchillo muy caliente para cortarlos. Cortar los cuadrados incompletos de los bordes de la herramienta. El primer prensado se efectúa en caliente y es más eficaz calentar el espejo en agua tibia que no pase de los 35° C sin olvidar jamás secarlo cuidadosamente antes de recubrirlo con un papel calcante o de seda sin pliegues ; luego se coloca la herramienta, templada por una permanencia prolongada a alguna distancia de una fuente de calor uniforme. Con una carga de algunos kilos, el prensado puede durar un cuarto de hora aproximadamente. Dos o tres prensados bastan por lo general, pero teniendo cuidado desde el principio que los cuadrados no se achaten al extremo de tocarse, lo que tornaría la herramienta inutilizable. Este accidente puede ocurrir si la brea es más blanda de lo previsto, si la temperatura ambiente es muy elevada (30° C) o también si se han calentado sin control el espejo y la herramienta. De vez en cuando, solo uno o dos cuadrados se aproximan peligrosamente ; antes de continuar el prensado, se los recortará de un golpe vertical con un formón bien afilado. Volveremos sobre esta operación que abarcará todos los cuadrados cuando la herramienta haya trabajado durante un cierto tiempo.

Cuando todos los cuadrados apoyan aproximadamente en toda su superficie (el papel calcante deja una marca mate), se procede a un prensado en frío directamente sobre el espejo sólomente embadurnado con una capa uniforme de rojo de pulir y agua, bastante espesa para cubrirlo. Este prensado al rojo debe ser prolongado durante una media hora como mínimo, antes de comenzar el trabajo de pulido.

Disposiciones generales para el pulido.

Indiquemos por orden de importancia, las cualidades fundamentales del local ideal para el pulido.

Temperatura cercana a 20° C. Es muy difícil amoldar la brea, para obtener un trabajo verdaderamente satisfactorio, a menos de 15° C o más de 30° C.

Constancia de la temperatura. En el hemisferio Norte, debe preferirse la exposición al norte, los muros gruesos y evitarse las corrientes de aire y la vecindad inmediata de una fuente de calor.

Conveniente estado higrométrico. Una humedad pronunciada perjudica las mojas normales.

Aseo. Evitar los locales polvorientos o difíciles de limpiar.

Aprovechar la mejor iluminación natural posible.

Desde luego en la práctica no se reunirán jamás simultáneamente estas condiciones. No demos un rigor absoluto a estas cualidades, aunque son deseables. Por ejemplo, en un sótano la temperatura será más constante, pero tal vez nos perjudicará el frío, la humedad y el polvo. Aun a riesgo de provocar complicaciones domésticas, siempre aconsejaremos tomar la cocina como laboratorio (después de la rigurosa expulsión de su legítima locataria) ; se hallarán en general las comodidades máximas, tales como agua, gas, piso de fácil limpieza, etcétera. Señalamos a los más temerosos que al comienzo de los trabajos prácticos de la Comisión des Instruments, se tallaron buenos espejos en condiciones muy desfavorables desde todo punto de vista, en el observatorio de la Société, directamente bajo un techo de zinc.

Antes de comenzar el pulido, llamaremos también la atención sobre los siguientes puntos :

1. La calidad del rojo de pulir es una cosa importante.
2. Prensar la herramienta durante el tiempo suficiente (por lo menos media hora a 20° C).
3. Verificar el aseo de la mesa de pulir y de la mesa accesorio (hules lavados). Es una buena precaución limitar al máximo los objetos a utilizar (espejo, herramienta, frasco de rojo y su pincel). Para limpiar y recalentar el espejo es necesario un recipiente bastante grande que permita su inmersión completa y una esponja fina reservada para el rojo. El secado y la limpieza del espejo se hace con trapos blancos bien desgastados por lavados repetidos, resultando ideal un tejido de algodón delgado como un liencillo. La herramienta puede ser lavada después de cada sesión de trabajo por medio de la esponja del rojo, suficientemente húmeda. luego se la deja secar por sí misma sin enjuagarla con nada.
4. Si la temperatura del local es un poco baja, por ejemplo entre 14 y 16° C es absolutamente necesario entibiar ligeramente, los discos pero en profundidad ; para el espejo un buen medio es una inmersión durante 5 a 10 minutos en agua a 30° C seguida de un secado. Es preferible no mojar totalmente la herramienta que sería luego difícil de secar convenientemente. Bastará entibiar la brea dejándola largo tiempo ante una suave fuente de calor (lámpara infrarroja). A continuación se hará un prensado suplementario de 10 ó 15 minutos solamente, lo que permitirá recomenzar el trabajo antes del enfriamiento completo de los discos ; el calor

desprendido luego por el trabajo bastará para mantener un régimen térmico suficiente (ver figura 24).



Fig 24. Sala de pulido en el taller de la Commission

Semejantes consejos para la ejecución de una superficie de alta precisión no dejarán de chocar contra el “buen sentido”. Nos excusamos por insistir una vez más sobre estos factores puramente psicológicos ; no es culpa nuestra si ellos juegan un papel preponderante y tenemos el deber de tomar en consideración todos los aspectos de la realidad si deseamos verdaderamente capacitar al lector para dominar la cuestión. Conocemos de modo muy

preciso, por experiencia directa y por referencias de muchos colegas, el proceso que engendra el equivocarse 99 veces sobre 100. Los espíritus temerosos y razonadores están infinitamente más expuestos a las falsas maniobras que los “prácticos”, que sólo desean aceptar la lección de los hechos. Por ejemplo, la reacción instintiva de aquel que teme rayar es la de adoptar un sistema que favorece el rayado ; el resultado de un trabajo en el que se trate de evitar todas las causas de calentamiento razonado sobre las causas que no son las que determinan la forma del vidrio es, seguramente un espejo catastrófico. Una vez más : hacer un buen espejo cuando se sabe cómo hacerlo, es fácil, pero explicar lo que sucede no puede tener posibilidades de veracidad si no es razonado a posteriori.

Dicho lo cual, vamos a intentar dar una idea objetiva de las mejores técnicas fruto de una experiencia que ha madurado durante muchas generaciones de ópticos astrónomos. Esperamos que el lector tenga a bien no oponer especulaciones personales más seductoras hasta que su espejo no esté completamente terminado.

Conducción del pulido

Con un espejo de menos de 30 cm de diámetro puede trabajarse indiferentemente en la posición espejo arriba o abajo. Los resultados dependen en mucho de factores difíciles de prever anticipadamente (posición, tamaño de las manos respecto del vidrio, presiones involuntarias). Aconsejamos más bien la posición espejo abajo ; contrariamente a las creencias generalmente admitidas, la experiencia muestra que el promedio de operadores evita mejor de esta forma las anomalías del borde. En la posición espejo abajo, éste debe reposar exclusivamente sobre una mesa bien plana, con la interposición de dos redondeles de franela separados por un papel grueso ; los tacos laterales dejarán un juego suficiente para que se pueda girar el espejo fácilmente cada cuarto de hora de trabajo más o menos, con respecto a este almohadón elástico, en una cantidad



Capítulo 2: Realización del espejo principal (parte B)
Del libro: El telescopio del aficionado de Jean Texereau
Página mantenida por: Jorge López jorgealm22@yahoo.com
Visite mi página: www.geocities.com/jorgealm22
Actualizada el 03-sep-2003

sistemáticamente constante, un poco superior o inferior a un cuarto de vuelta. Este procedimiento, debido a A. Couder permite evitar radicalmente el astigmatismo, aun con un espejo muy flexible.

Las carreras a adoptarse son las normales, de amplitud $1/3 D$ descritas anteriormente. Es más fácil hacer carreras rectilíneas que rizados, pero siempre se tratará de evitar en lo posible toda tendencia regular variando la amplitud de los desplazamientos (alrededor del valor $1/3$) y la cantidad de zig zag entre las rotaciones, de modo de no respetar sino en promedio las cifras indicadas. Un operador aislado no puede imitar perfectamente al azar (E. Borel). Nosotros obtuvimos resultados mucho más perfectos haciendo trabajar con las “mismas” carreras a 4 ó 5 personas distintas sobre el mismo espejo. A pesar de todo, el trabajo se vuelve rápidamente maquinal y suficientemente incoherente si uno no contrae desde el comienzo un hábito vicioso. Especialmente ponemos en guardia contra la tendencia frecuente de hacer girar la herramienta en el mismo lugar al final de cada carrera, o peor todavía, marcar un compás de espera en la extremidad de la misma antes de volver. Es necesario evitar toda brusquedad ; Conviene redondear ligeramente el movimiento rectilíneo antes de volver en el otro sentido, y la frecuencia de las carreras tampoco debe ser muy grande : cerca de 60 dobles carreras por minuto y todavía menos hacia el final del trabajo para limitar las causas que producen las ondas primarias.

El pulimento es más eficaz cuando se pone poco rojo y poca agua por vez ; el pequeño frasco de rojo, lleno hasta un tercio de rojo y recubierto por una capa de agua de 1 ó 2 cm permite mojar el pincel hasta el lugar deseado para mantener un buen régimen. La renovación del rojo no debe tomar más que un instante ; ni siquiera se separan los discos ; basta pintar una banda roja sobre los cuadrados (en posición excéntrica) o sobre el espejo. La duración de una mojada no excede normalmente cinco minutos ; si dura 10 ó 15 minutos significa que se puso mucha agua y rojo por vez y también que el taller es muy frío o muy húmedo. Hacia el final de la mojada aumenta considerablemente la



Fig 25. Encerado de los cuadrados

eficacia del trabajo ; el agua escasea, el rojo se incrusta en la brea, la herramienta “afeita” parcialmente el vidrio. Insistiendo, la resistencia a los desplazamientos llega a ser enorme ; se producen ruidos agudos (en ciertos talleres industriales no pueden oírse unos a otros) y contrariamente a nuestra reacción instintiva no es en esas

circunstancias cuando se producen las rayas, sino es precisamente de este modo como se rellenan las pequeñas vetas y se obtiene el mejor pulido. Pero el trabajo de la óptica astronómica requiere técnicas más suaves ; es útil, durante una buena parte del pulimento, mantener un régimen de pequeñas mojadas un tanto duras en la medida en que se teman pérdidas de adherencia (local muy frío), pero es necesario terminar el trabajo poniendo un poco más de rojo y agua a la vez y sin secar completamente cada carga. Al comienzo del trabajo y no obstante los prensados, la herramienta está todavía mal adaptada al espejo ; se producen aferramientos y deslizamientos irregulares que deben disminuir poco a poco. Después de la primera hora de trabajo debe encontrarse una resistencia notable y regular para mover la herramienta y si no ocurre así puede procederse a un prensado suplementario con los discos algo entibiados. Al cabo de este

tiempo, los cuadrados deben estar uniformemente recubiertos por el rojo y presentar una superficie mate ; si permanecen negruzcos y se rayan, es un mal síntoma que demuestra falta de rojo o poca agua o que el local es muy frío o por último, que la brea es muy dura. Si no se cuenta con una buena brea que tome bien el rojo es preferible recubrir los cuadrados con una delgada capa de cera de abejas (G. W : Ritchey) extendida fácilmente con un pincel chato de tela (ver figura 25).

La operación debe continuarse con un breve prensado sobre el espejo ligeramente tibio, bien seco y recubierto con papel de seda. No debe calentarse en profundidad una torta encerada a riesgo de ver la cera deslizarse como una piel sobre la brea; del mismo modo, durante el trabajo no es menester intentar secar completamente ; se mantiene un régimen de rojo y agua más abundante. Una torta encerada pule más rápidamente que una de brea desnuda, y también es más difícil que raye, pero las superficies obtenidas tienen generalmente una forma de conjunto menos regular y las ondulaciones son más importantes. El espejo se aclara desde los primeros minutos del pulido ; en la posición espejo abajo es normal que el borde “se adelante”; por el contrario, con el espejo arriba, el centro se pule más rápidamente. Se tiene entonces un medio fácil para conducir el trabajo de manera regular sobre toda la superficie invirtiendo la posición por ejemplo, cada dos horas.

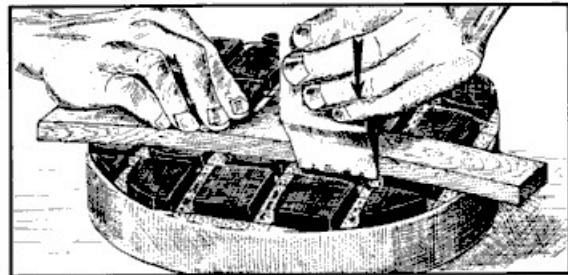


Fig 26. Recorte de los cuadrados

El trabajo es mucho más eficaz y sobre todo mejor la forma, si se trabaja durante bastante tiempo como para que un régimen de corrientes térmicas regulares se establezca en toda la masa del espejo y la herramienta. Con un espejo de 20 cm y de 35 mm de espesor es necesario trabajar durante una hora al menos sin detenerse más que algunos instantes a cada renovación de rojo. Mejor todavía si se puede pulir durante 2 ó 3 horas seguidas, aunque la resistencia de la brea es limitada ; los cuadrados se hunden cada vez más, sus lados se vuelven convexos y amenazan tocarse, lo que es necesario evitar a cualquier precio si no se quiere inutilizar la herramienta o recurrir al método mediocre de abrir canales en la brea.

Se recortarán entonces a tiempo los cuadrados por medio de una arista cortante muy aguda y perfectamente afilada (formón de madera de no menos de 20 mm de ancho, hierro de cepillo de carpintero o de garlopa o conejo) que se dirigirá a plomo (vertical) por pequeños golpes sobre la brea que excede la línea de una regla bastante gruesa colocada bien de frente al trazado primitivo a lápiz sobre la herramienta (figura 26).

Se cortan así limpiamente y sin graves escamaduras, los cuatro lados de los cuadrados ; los pequeños fragmentos y el polvo de brea son cuidadosamente cepillados sobre un papel blanco para la eventual recuperación y especialmente para evitar que se peguen por todas partes en especial en las manos y en los brazos que pueden limpiarse con trementina. Después del recorte es necesario un nuevo prensado de los discos a temperatura ambiente. Puede utilizarse como caso extremo, brea un poco blanda que necesite el recorte de los cuadrados cada hora, pero si un trabajo prolongado durante 3

horas no produce ninguna deformación notable, la brea es muy dura y debe ser encerada, o mejor, rehacer la herramienta con la brea ablandada.

Después de un trabajo de 3 ó 4 horas el vidrio está pulido a medias y los cuadrados de la herramienta han sido recortados 2 ó 3 veces, son menos gruesos, pero incrustados uniformemente de rojo y sin graves defectos. Después de un tiempo suficiente se

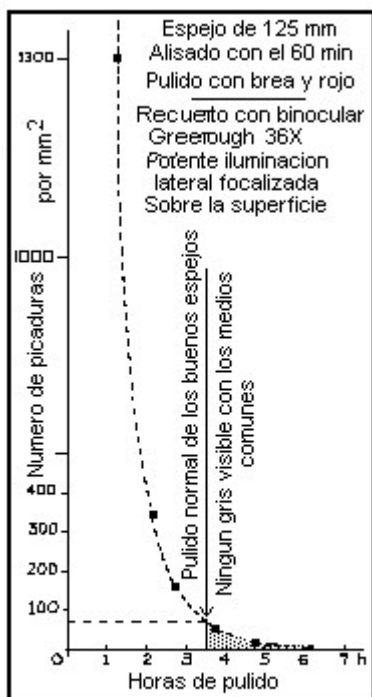


Fig 27. Progreso del pulido en función del tiempo

experimenta, al desplazar la herramienta, una impresión de adherencia grasa muy uniforme, capaz de dar preciosas indicaciones sobre la regularidad del trabajo. Puede decirse que todo el ser del operador participa en el conocimiento sensorial de lo que ocurre.

Si se caracterizan los progresos del pulido en función del tiempo por una estadística llevada sobre el número de picaduras por unidad de superficie se obtiene una curva (figura 27) de carácter exponencial en la región que nos interesa, lo que permite prever fácilmente que la últimas picaduras de esmeril costarán “caras”. Un espejo muy pequeño trabajado racionalmente no requiere sino 4 horas de pulimento para dar completa satisfacción con los medios corrientes de control, pero ni un tiempo doble bastará generalmente para un espejo de 20 cm.

Acomodando cuidadosamente la vista, se comprobará al cabo de este tiempo, sobre la superficie del espejo y cerca de la imagen reflejada sobre un fondo negro del filamento de una lámpara eléctrica, la presencia de un velo “gris” constituido por una multitud de pequeñas picaduras de esmeril (aquellos que no son muy miopes utilizarán una buena lupa). Según que el “grisado” sea más notable en el centro que en el borde, se sabrá si es necesario continuar el trabajo con el espejo encima o debajo. Es normal, para una superficie astronómica de 20 cm, ocupar unas 15 horas para obtener sobre la base de ese control un pulido aparentemente total; esto representa cuando menos 3 días enteros de trabajo¹ debido a las pérdidas de tiempo en los prensados, etcétera. Si no se dispone de días enteros o de medios días, hay que evitar disponerse a pulir por lo menos de una hora continuada.

Cuando el alisado del espejo no ha sido totalmente logrado por una u otra razón, un trabajo de 30 horas y aún más no basta para eliminar totalmente el “grisado” algo particular que subsiste todavía formado por picaduras bastante grandes, pero muy diseminadas, que pueden considerarse como no pulimentables. El principiante a quien

¹ Después de ciertas “hazañas” de operadores capaces de tallar un espejo de 160 mm en 6 horas, muchos aficionados hacen una cuestión de honor en pulir como locos ; indicamos a los más furiosos que las máquinas americanas modernas (usando la barnesita) pulen un bloque de 180 mm de diámetro entre 1 y 3 minutos ; pero la óptica astronómica es otra cosa.

seguramente le ocurrirá esta desventura no debe desolarse por ello ; un poco de “gris”, de vetas y aún de verdaderas rayas si no son muy gruesas o muy numerosas, prácticamente no perjudican la figura de difracción ; es necesario considerar ciertamente, la cantidad de luz que estas fallas difractan, despreciable frente a la energía total, salvo en los casos muy particulares (observaciones de la corona solar, de ocultación de estrellas muy débiles por un astro brillante, del compañero de Sirio, etcétera). Recordamos a los irreflexivos que las cuatro láminas que soportan el espejo secundario juegan exactamente el mismo papel que 4 enormes rayas sobre el espejo ; no obstante, todos las aceptan sin inconvenientes ; por otra parte, aquellos que hablan del “gris” con severidad, harían mejor en comenzar por quitar cuidadosamente el polvo de sus objetivos.

Fin del pulido

Debemos distinguir dos casos : Primero el del aficionado modesto que desea simplificar su trabajo lo más posible y se contenta con un espejo de 150 mm, de foco suficientemente largo para que la parabolización sea innecesaria. Si los principios antes enunciados han sido bien comprendidos y efectivamente aplicados, el aficionado podrá en rigor evitar cualquier control y tener algunas probabilidades de obtener al primer intento un espejo esférico utilizable.

El caso del aficionado que anhela obtener un espejo irreprochable es mucho más interesante. No se puede contar con obtener automáticamente con cierta certeza un paraboloide de 20 cm a $f/D = 6$; los controles ópticos y los retoques son indispensables. No es aconsejable para un novicio examinar su espejo en el aparato de **Foucault**, antes de terminar completamente el pulido. Efectivamente, si comprueba que la forma obtenida es buena, no se atreverá a continuar el trabajo y se contentará con un espejo muy “gris” o bien si observa un defecto, intentará un retoque prematuro y generalmente desgraciado, seguido de otros más desastrosos. A partir de este momento, el operador está perdido ; su espejo no estará jamás ni bien pulido ni con forma realmente satisfactoria, mientras que un trabajo regular, bastante prolongado como para hacer una herramienta impecable, habría nivelado todo automáticamente con una forma fácil de parabolizar con gran seguridad. Personalmente guardamos un vivo recuerdo de nuestro primer espejo, un 250 mm a $f/D = 7$ pues no logramos el cuarto de onda sobre 220 mm sino al precio de 80 retoques a lo largo de 20 días de trabajo. En la correspondencia de la secretaria de la Comisión se encuentran muchos ejemplos de colegas que hablan de 200 horas para dar forma a uno de 16 cm. Deseamos evitar a nuestros colegas semejante prueba de perseverancia ; por cierto, si se aprovechan correctamente los principios dados aquí, un espejo pulido estará casi terminado. Nunca se apreciará lo bastante la importancia de obtener una forma muy regular, de primer intento.

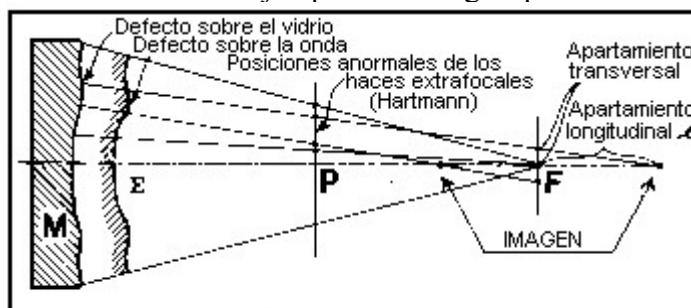


Fig 28. Principales métodos que se utilizan para medir un defecto

Generalidades sobre los medios de control

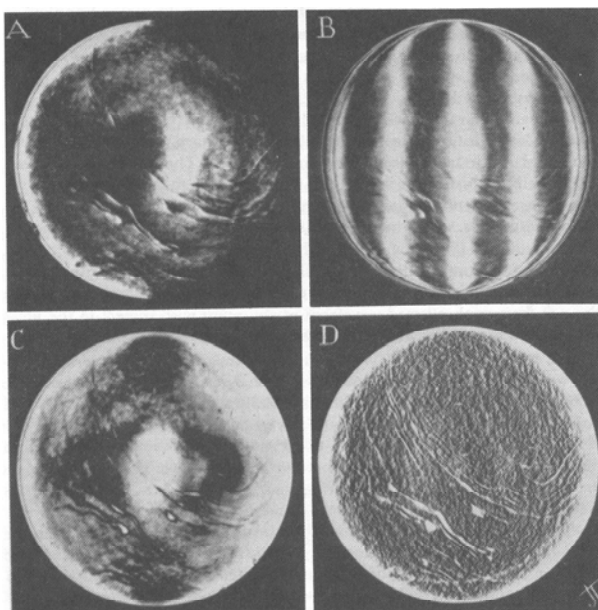
Un defecto material sobre el vidrio y las anomalías correspondientes sobre la onda y sobre la imagen son aspectos distintos de la misma realidad física y la medida de una de ellas permite calcular las restantes ; pero estas dimensiones distan mucho de ser del mismo orden. Mientras que los defectos materiales del vidrio o de la onda se expresan corrientemente en centésimos de micrón o en mili micrones, los apartamientos que resultan sobre la imagen se miden en micrones enteros en el sentido transversal y en milímetros en el sentido longitudinal (figura 28).

Es natural que se tendrán muchas más facilidades para determinar el defecto con una buena precisión relativa, si se intenta la medida de su aspecto más accesible. Esta observación nos permitirá elegir fácilmente el método más seguro, particularmente para el aficionado desprovisto de piezas de referencia.

Revista rápida de los principales métodos de control

Los métodos basados en medidas directas sobre el vidrio serán descartados en seguida ; evidentemente, no es posible pensar en un comparador de contacto mecánico u óptico por perfecto que sea. Los calibres interferenciales, muy empleados en la industria y sobre los cuales volveremos a propósito del pequeño espejo plano, no se emplean formalmente para el control de un vidrio astronómico de 20 o más cm de diámetro. Este método constituye, por otra parte, un círculo vicioso.

Los métodos ópticos dirigidos a la medida de los defectos sobre la onda son ya más serios. Un interferómetro de Michelson Twyman de suficiente tamaño puede resultar útil, pero evidentemente no es cuestión de intentar aquí su empleo, puesto que costaría muchos miles de veces más caro que nuestro espejo. El método de Michelson, por el contrario, no exige ninguna costosa pieza de referencia. Se verifica directamente la esfericidad de la onda por medio de un diafragma con dos aberturas, una de las cuales, fija, está en principio en el centro, mientras la otra explora la superficie del espejo. Estas dos aberturas relativamente pequeñas dan una gran mancha de difracción estriada



por franjas de interferencia (agujeros de Young). Si el camino óptico no cambia cuando el orificio móvil explora el espejo, la franja central de este sistema permanece fija ; en caso contrario sus desplazamientos dan inmediatamente las diferencias de fase. Pero considerando los defectos que nos interesan, las cantidades a medir resultan muy pequeñas, del orden de un micrón a lo sumo y por ello no se puede esperar una aproximación suficiente en las medidas, por la poca estabilidad de los soportes y la insuficiente precisión de las mediciones realizadas con el microscopio.

Capítulo 2: Realización del espejo principal (parte B)
Del libro: El telescopio del aficionado de Jean Texereau
Página mantenida por: Jorge López jorgealm22@yahoo.com
Visite mi página: www.geocities.com/jorgealm22
Actualizada el 03-sep-2003

León y François Lenouvel han indicado un método que posee las ventajas de las medidas interferenciales directas sin sus principales inconvenientes. Las interferencias se producen por medio de un duplicador de Michelson o de un birrefringente de Wollaston unido a nicoles ; el duplicador ubicado en la vecindad inmediata de la imagen es de pequeñas dimensiones, pero aún continúa siendo una pieza costosa y poco corriente para un aficionado.

Los métodos de control sobre las imágenes son, pues, los más importantes en la práctica. La observación directa de las figuras de difracción focales y extrafocales se conocen si duda, desde que comenzaron a usarse los instrumentos. Ha sido desarrollada y descrita en un folleto editado por la Casa Cooke y es muy útil al observador, pero resulta de interés limitado para el óptico, puesto que no establece claramente el lugar y la magnitud de los defectos.

El método Hartmann permite determinar las posiciones longitudinales de intersección de los pinceles luminosos aislados por un diafragma colocado delante del espejo y dispuestos simétricamente con respecto al eje, por medio de dos fotografías extrafocales que pueden medirse luego con gran precisión. El método da indicaciones muy seguras e indiscutibles, pero es un recurso solo aplicable al control final de grandes piezas. Los aficionados adelantados que intenten el control de un espejo de 50 cm sacarán provecho estudiando el magnífico ejemplo de aplicación de este método, utilizado en el control del espejo de 81 cm del observatorio de Haute Provence y publicado en Lunettes et Tèlescopes. A **León Foucault** se le deben los métodos de control más útiles para el óptico, de los que derivan casi todos los otros métodos sobre las imágenes. El método de la hoja de cuchillo o de las sombras es el más maravilloso de todos por su sensibilidad y su simplicidad. Más adelante nos ocuparemos en detalle. Por el momento digamos solamente que un simple diafragma opaco de bordes netos, interceptando el haz en la vecindad inmediata de la imagen evidencia, para un ojo colocado detrás, los apartamientos transversales de los rayos aberrantes por medio de sombras sobre el espejo, y sugiere al observador una sorprendente visión en relieve de los defectos, tal como podría verlos con una iluminación rasante si la altura de estos defectos fuera un millón de veces mayor (figura 29A). La densidad de la sombra está en relación con la pendiente que forma la superficie de la onda real con la esférica ideal que tendría su centro en el plano de corte del cuchillo. Si se desea medir la altura de los defectos, es necesario anotar todas las pendientes por pequeñas fracciones, es decir, proceder a una integración ; pero esta operación, con un espejo chico, sólo es útil una vez terminado totalmente, con el objeto de asegurarse que los defectos residuales son muy inferiores al límite perjudicial. En realidad, durante el trabajo y con un poco de práctica, basta una simple ojeada a las sombras para que el óptico obtenga con precisión las indicaciones necesarias para realizar un buen retoque ; mientras que la simple enumeración de la cantidad de mili micrones a rebajar en tal lugar tendría un valor práctico casi nulo. En efecto, este último método no permitiría elegir ni la herramienta conveniente ni determinar la duración del trabajo, ni las carreras a emplear. Es importante insistir sobre este punto, puesto que la mayor parte de los juicios que se pueden leer sobre los métodos de control están dados por teóricos que jamás han tallado un sólo espejo con sus propias manos.

Capítulo 2: Realización del espejo principal (parte B)
Del libro: El telescopio del aficionado de Jean Texereau
Página mantenida por: Jorge López jorgealm22@yahoo.com
Visite mi página: www.geocities.com/jorgealm22
Actualizada el 03-sep-2003

El método de la red extrafocal, debido también a **León Foucault** ha sido retomado y desarrollado más tarde por V. Ronchi y L. Lenouvel. Se trata de interponer en el haz y cerca de la imagen, una red de trazos opacos iguales a los intervalos. Si el haz es homocéntrico, las sombras creadas por este múltiple cuchillo son rectilíneas ; en caso contrario, las regiones aberrantes son visibles por las correspondientes anomalías (figura 29B). Desgraciadamente, a partir de un pequeño número de trazos por milímetro en la red, se producen intrincados fenómenos de interferencia parásita cuya interpretación clara y segura no resulta fácil. No hay que extrañarse, pues que no obstante los volúmenes publicados sobre esta teoría, el método no haya entusiasmado a los prácticos ; sin embargo, rinde importantes servicios para el control rápido del anastigmatismo de objetivos fotográficos y de otras pequeñas piezas corrientes que pueden controlarse con redes muy poco cerradas y extensas fuentes de luz.

F. Zernike imaginó una derivación asombrosa y magnífica del método de **Foucault**, rehaciendo la teoría del método de las sombras y teniendo en cuenta la naturaleza ondulatoria de los rayos luminosos. Esta vez, en lugar de un cuchillo opaco, se superpone a la imagen de difracción una lámina de fase bastante pequeña y del espesor deseado para producir un desfase de 90° únicamente en la imagen central. Si el espejo posee defectos capaces de enviar luz fuera de esta imagen y formar espectros laterales, se producirá entonces una interferencia parcial entre estos espectros y la imagen central desfasada, que indica las variaciones de fase de la onda por medio de variaciones de intensidad y de matices muy vivos (figura 29C). Esta figura no puede dar sino una idea muy incompleta del método ; nosotros hemos obtenido fotografías directas en colores que lamentamos no poder reproducir aquí. El método es susceptible de aplicaciones extremadamente importantes en microscopía. Para el control de la óptica astronómica su interés es más limitado. Su interpretación correcta y segura exigiría un conocimiento muy profundo de la forma en que se produce la diferencia de marcha de $\lambda/2$ de los rayos que pasan por un foco.

Mencionemos por último, si bien ello interesa solo indirectamente al aficionado constructor de espejos, la aplicación del contraste de fase ideado por B. Lyot para el estudio de pequeños defectos muy poco pronunciados (algunos Angstroms y muy poco extendidos : algunos décimos de milímetro). Evidentemente estos defectos no son capaces de provocar una aberración geométrica, pero al menos perjudican en ciertos casos. En efecto, no obstante su débil pendiente (1×10^{-6}) perfectamente comparable con el de un gran defecto óptico ordinario, sus dimensiones laterales son suficientemente pequeñas como para que puedan difractar por todo el campo una cantidad no despreciable de luz fuera de la mancha de difracción y crear una luz parásita más grave que la producida por defectos de abrasión, visibles directamente sin artificios (rayas del pulido).

El método impone el desfase y la absorción simultánea de la imagen central, pero esta vez la fuente es mucho más ancha. No se trata de estudiar los defectos de período largo ; el método es selectivo y no muestra más que los defectos que pueden enviar la luz suficientemente lejos como para caer fuera de la lámina de fase (figura 29D).

Todos los métodos que imponen la introducción en el haz y cerca de la imagen, de un obstáculo, completamente opaco o no, son realizables con montajes muy parecidos. De

este modo, la red fotográfica de 5 trazos por milímetro que permitió tomar la fotografía 29B hubiera permitido también la aplicación de los cuatro métodos, aunque en condiciones no del todo óptimas : **Foucault**, normal con un sólo trazo en el foco ; Ronchi (fotografía 29B) ; Zernike, aprovechando el desfase producido en un sólo trazo por la variación del espesor y quizá del índice de la gelatina de la placa expuesta ; por último, Lyot, ensanchando la fuente. El efecto se diferencia de marcha causado por los trazos se reconoce además sobre la fotografía 29B en las sombras parcialmente opacas.

Explicación geométrica del método de Foucault.

Coloquemos el espejo sobre un soporte de tal modo que su eje quede horizontal y coloquemos en la proximidad de su centro de curvatura , una “estrella artificial” (“S” de la figura 30) es decir, una fuente de luz cuya dimensión transversal sea muy pequeña. El espejo pulido, pero todavía no metalizado, refleja bastante luz como para dar una imagen I de S suficiente para realizar el control. Si la fuente coincidiera exactamente con el centro de curvatura, la imagen de retorno se confundiría con ella y sería inaccesible. Separémosla pues, un poco hacia el costado ; en virtud de las leyes fundamentales de la reflexión, la imagen se aleja simétricamente con referencia al eje. Coloquemos el ojo inmediatamente detrás de la imagen I ; si el haz no es demasiado abierto, como es el caso de los espejos que nos interesan, se ve la superficie del espejo total y uniformemente luminosa. Ahora hagamos penetrar en el haz reflejado y exactamente delante del ojo una pantalla opaca rectilínea, de bordes netos, llamada cuchillo.

Estableceremos como convención general que la fuente ha sido alejada hacia la izquierda y que el cuchillo se acerca por la derecha, estando frente al espejo. Supongamos ante todo que estamos examinando un espejo perfectamente esférico ; puesto que la fuente está en la vecindad inmediata del centro de curvatura, todos los rayos se cruzan en el mismo punto I. Cuando el cuchillo penetra por delante de la intersección (figura 30A) se ve una sombra que avanza sobre la superficie del espejo en el mismo sentido que él; por el contrario, cuando el cuchillo está detrás (figura 30B) la sombra se desplaza en sentido inverso oscureciéndose primero el borde izquierdo. Pero si el cuchillo corta exactamente en la intersección I (figura 30C), debido a que todos los puntos de la superficie del espejo contribuyen igualmente a la formación de la imagen, se verá oscurecerse el espejo progresiva y uniformemente, puesto que en realidad la fuente tiene un ancho finito y la óptica geométrica no es sino una aproximación. Se tiene así un medio muy sensible para colocar el cuchillo longitudinal y exactamente en el plano de la imagen ; basta comparar, en el curso de un corte el brillo de los lados izquierdo y derecho del espejo. Si el borde derecho es un poco más oscuro, es preciso alejar ligeramente el cuchillo ; en cambio se lo aproximará si el borde

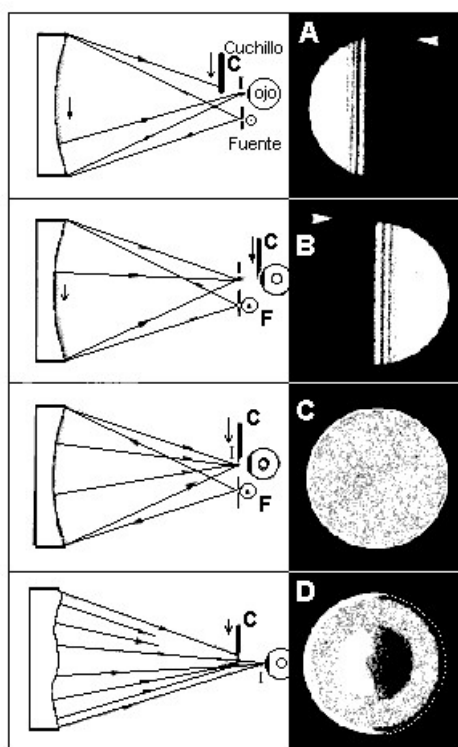


Fig 30. Explicación geométrica del método de Foucault

izquierdo es el más negro. Rápidamente se logra hallar una posición de extinción con un “matiz uniforme” : el cuchillo se halla en la intersección de todos los rayos de luz.

Pero con frecuencia, el espejo no es completamente esférico. Observemos ante todo que, considerando la forma en que ha sido trabajado el espejo, los defectos engendrados son siempre casi exactamente de revolución (excepto los pequeños accidentes ondulados que se deben a la estructura de la herramienta o a otras anomalías muy raras), es decir, que se presentan como zonas hundidas o levantadas concéntricas al borde del vidrio. En la figura 30D hemos supuesto que el cuchillo está en el plano imagen formado por una extensa corona esférica de un espejo defectuoso. Esta corona aparece entonces con un “matiz uniforme” pero con relación a ella, existen en los bordes y en el centro del espejo regiones cuyos radios de curvatura son un poco más largos y los rayos reflejados por esas zonas no convergen exactamente hacia el mismo punto y por lo tanto no pueden ser interceptados por el cuchillo al mismo tiempo que el resto ; aquellos que provienen de “laderas” vueltas hacia el cuchillo son evidentemente detenidos primero y en consecuencia se ven las regiones en cuestión oscurecerse más rápidamente ; por el contrario, las laderas inclinadas en la dirección opuesta permanecen iluminadas hasta el último momento. El aspecto que se observa con una penetración media del cuchillo es el de la figura 30D, cuyas sombras sugieren el relieve de los defectos con respecto a la esfera de referencia que aparece con un matiz uniforme. Falta sólo establecer una convención de iluminación para saber si se trata de una protuberancia o de una depresión ; cuando se examina un espejo debemos asimilar el aspecto observado a un relieve difusor de luz, iluminado por una fuente colocada en forma muy oblicua del lado opuesto al cuchillo (es precisamente al revés en el caso de un lente). Según nuestra convención, las laderas vueltas hacia la izquierda son las iluminadas ; las inclinadas hacia la derecha están en sombra. En la figura 30D debemos ver una protuberancia central y el borde rebajado ; en la figura 29A hay un hoyo central, una pequeña zona intermedia sobresaliente (parcialmente oculta por otro defecto más grave) y borde rebajado.

Es natural, que el aspecto de las sombras cambia totalmente según la posición longitudinal del corte. Por ejemplo, con el mismo espejo que da las sombras de la figura 30D, si se retira un poco el cuchillo del espejo colocándolo en el plano de la imagen dada por los rayos centrales, es el centro del espejo el que se ve con un matiz uniforme y la corona como las laderas interiores de un cráter o de un embudo. Cuando se retoca un espejo, importa poco que resulte una superficie con un radio de curvatura ligeramente más largo o más corto. Elegiremos evidentemente el aspecto del defecto que en tamaño y posición, resulte más fácil retocar, pero el relieve más débil no resultará necesariamente para esta posición del cuchillo. Tendremos ocasión de presentar ejemplos.

Detalles de construcción de un aparato de Foucault

Si bien es cierto que un montaje rudimentario, improvisado con los elementos disponibles, es capaz de rendir importantes servicios, es mucho más cómodo para el control cuidadoso de los paraboloides, disponer de un aparato con cuchillo provisto de movimientos lentos en sentido transversal y longitudinal.

La figura 31 representa un modelo derivado del que construimos en 1946 para el taller de la Comisión de Instrumentos. Llamamos especialmente la atención sobre los

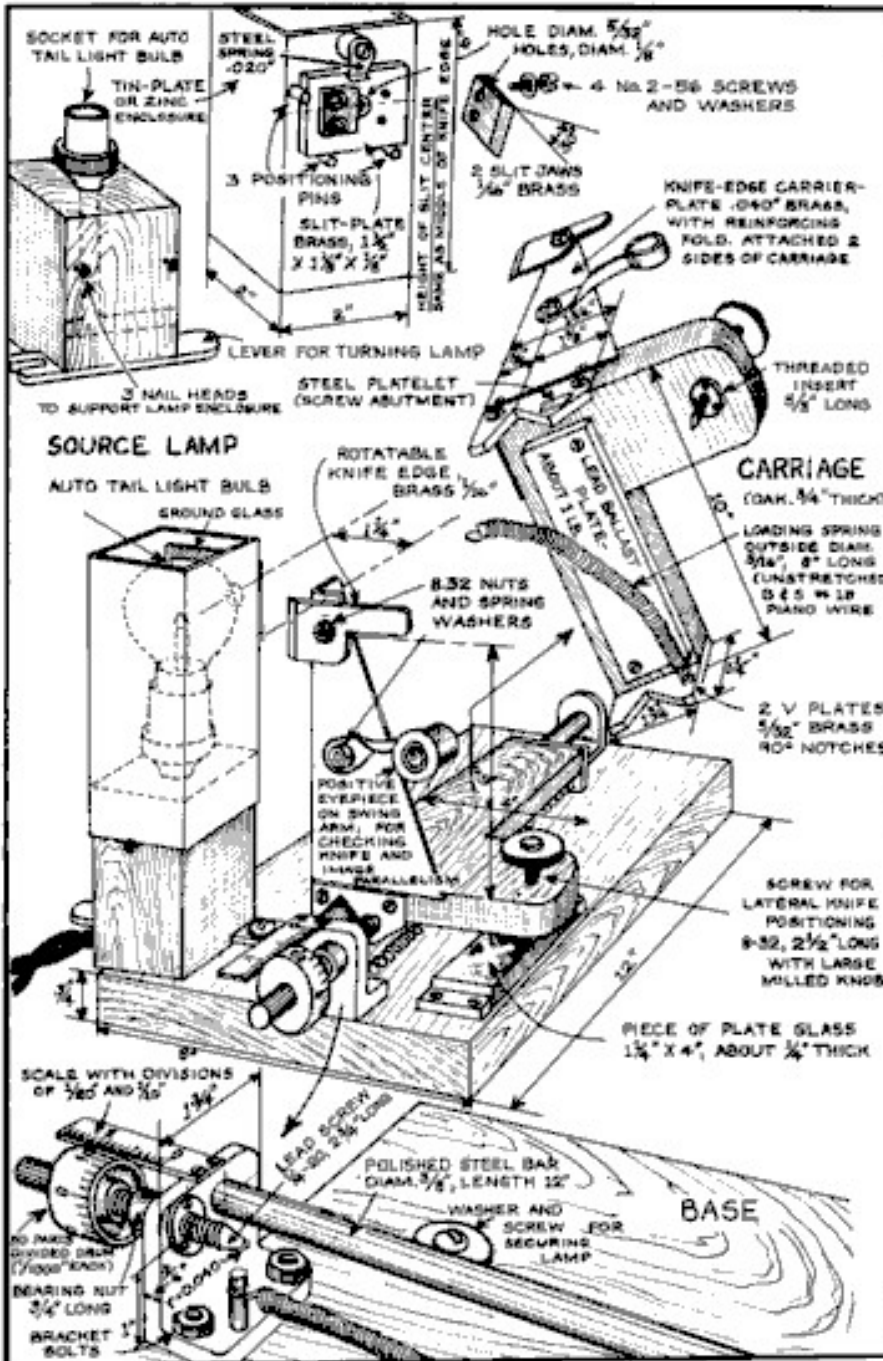


Fig 31A. Detalles de construcción del aparato de Foucault

siguientes puntos:

Grados de libertad del cuchillo

Para lograr fácilmente de modo suave y sin juego, los dos movimientos del cuchillo, hay que recurrir a una concepción cinemática : siendo 6 el número de puntos de contacto que definen la posición de un cuerpo respecto a otro (Maxwell), debemos tener en nuestro caso 4 puntos no regulables.

Estos son (figura 31), los contactos de las dos chapas en V del carrito, mantenido por efecto de su propio peso contra la varilla de acero

cilíndrica de la base. El peso del carrito se aplica además, en un quinto contacto, representado por la punta del tornillo calante sobre un vidrio plano dispuesto sobre la base, paralelamente a la varilla de acero. Accionando este tornillo se inclina ligeramente todo el carrito y se hace penetrar suavemente el cuchillo en la imagen, sin juego y sin tanteos previos, aun con un tornillo de cualquier clase de rosca. De hecho, el

movimiento del cuchillo no es exactamente rectilíneo y la intersección de la imagen de una rendija no se hace rigurosamente al mismo tiempo en toda su altura, pero con el radio elegido y los anchos de las fuentes usuales este defecto no es apreciable.

Un resorte tira del carrito longitudinalmente sobre el sexto y último punto de contacto, que es la extremidad redondeada de un tornillo “micrométrico” (un simple trozo de varilla con roscado ordinario de 6/100) cuyo tambor, dividido en 100 (recuperación de un goniómetro de artillería) o en 20 y aún en 10 (banda de papel pegada alrededor), permite medir los desplazamientos del carrito con aproximación de casi 1/100 de milímetro.

Distancia transversal del cuchillo a la fuente.

Debe ser pequeña para evitar en lo posible el astigmatismo del montaje (y disminuir la paralaje si más tarde se destina el aparato para controles por autocolimación. El tamaño de los bombillos comunes no permiten bajar esta distancia a menos de 30 mm sin emplear un pequeño prisma de reflexión total, pero esta solución no es realmente necesaria si no se trata de un espejo de radio muy corto ($R < 1$ m) o muy abierto ($f/D < 4$).

Fuente de luz, estrella artificial.

La sensibilidad óptima del método de **Foucault** se obtiene con fuentes suficientemente intensas cuyo ancho sea del orden del diámetro de la mancha de difracción es decir de 8 a 10 μm para los espejos que nos interesan (en el centro de curvatura), aunque resulta notable que una fuente 10 veces más ancha sea todavía muy suficiente para los controles corrientes. Muy a menudo basta con un simple agujero redondo hecho en una delgada lámina de estaño o aluminio con una fina aguja (la penetración se limita a la punta, colocando la hoja a perforar contra una superficie plana de dureza suficiente), obteniéndose con facilidad agujeros de aproximadamente una centena de micrones de diámetro (1/10 de mm) No es fácil practicar un agujero bien redondo de menos de 50 μm y puede ocurrir que la luz resulte insuficiente con semejante fuente ; además, en la visión estenopeica los defectos de los medios refringentes del ojo son perjudiciales por las sombras móviles que producen. A. Couder¹ ha señalado la importancia de emplear una rendija cuyo ancho pueda ser reducido al valor óptimo y su altura útil a 4 mm aproximadamente, permitiendo obtener bastante luz y eliminar los inconvenientes de la visión estenopeica. Damos aquí (figura 31) un modelo de rendija de ancho fijo que se puede ajustar si así se lo desea de 5 ó 10 μm de separación con un error de paralelismo inferior al micrón por simple apreciación de la luz diurna a través de un difusor blanco bien iluminado. Semejante rendija es muy estrecha para los ensayos corrientes y los fenómenos de difracción, sobre los cuales volveremos, que amenazarían desorientar a los debutantes ; a falta de una medida directa con el microscopio se hará el ajuste delante de un difusor blanco muy poco iluminado, para obtener una rendija de aproximadamente 30 a 50 μm de ancho.

¹ A. Couder, Construction d'un miroir de 1,20 m (construcción de un espejo de 1,20m) y Lunettes et Télescopes (Anteojos y Telescopios).

Todo esto es en la suposición de que los bordes de la rendija sean rectilíneos con gran aproximación. Tenemos ideas a menudo falsas, sobre la posibilidad de obtener piezas mecánicas rectilíneas con una aproximación de casi una fracción de micrón, y por lo tanto no creemos inútil describir la aparentemente infantil operación que debe realizarse para obtener los bordes de la rendija y la arista del cuchillo. El error más frecuente consiste en tratar de conseguir un diedro muy agudo, una verdadera arista cortante de navaja ; por el contrario se trata de una pequeña faceta que puede tener 1/10 de mm de ancho y puede obtenerse fácilmente bien rectilínea. No obstante su menor dureza, el latón es preferible al acero ordinario a causa de la oxidación. Se



Fig 32. Arreglo de los labios de la rendija y del cuchillo

comienza por hacer, aproximadamente en escuadra, la parte que dará la arista ; luego se le hace un chanfle a 30 ó 45° simplemente con una lima, teniendo la pieza en una prensa, y esmerándose lo más posible para lograr simultáneamente una arista aguda en toda su longitud. Desde luego con un metal blando y las inevitables torpezas, esta arista resulta dentada ; para nivelarla exactamente se apoya la pieza perpendicularmente contra un vidrio esmerilado plano¹ (figura 32), seco y adecuado, con la presión de algunas centenas de gramos, haciendo unas 10 carreras de vaivén, transversalmente a la longitud de la pieza. En pocos segundos se obtiene un pequeño bisel brillante que no debe presentar interrupciones que significan asperezas no eliminadas (en este caso basta hacer algunas carreras más).

Una llama estable de algunos milímetros de largo, en un ángulo suficiente, basta para la iluminación uniforme de tal rendija, mejor si está colocada cerca de esta abertura ; los ópticos antiguos empleaban comúnmente una pequeña lámpara a kerosene, dando excelentes resultados el acetileno debido a la temperatura de su llama superior a los 2.200° C. Pero es infinitamente más práctico usar un pequeño bombillo provisto de un difusor ; el vidrio opal resulta perfecto pero disminuye mucho el brillo, bastando en la práctica con esmerilar el lado del bombillo vuelto hacia la rendija con un poco de carborundum 280 y un pequeño trozo de plomo aproximadamente moldeado en forma cóncava con el radio del bombillo. Los bombillos de bajo voltaje utilizados en los faros de automóviles o cine, son ventajosos por su reducido tamaño y la mejor utilización del filamento. Es preferible no intentar proyectar la imagen del filamento sobre la rendija por medio de un sistema óptico ; la experiencia enseña que de esta forma es difícil obtener una iluminación bien uniforme y suficiente para todo el cono. No obstante, este método da buenos resultados con una fuente directa, tal como un arco a vapor de mercurio a alta presión cuyo elevado brillo es precioso para controles rigurosos de muy pequeños accidentes, pero que no interesan todavía al aficionado de primer grado. Notemos por último, que debe existir la posibilidad de hacer girar sobre sí misma la caja

¹ Un trozo de vidrio frotado contra otro con la interposición de Carborundum 280 ó 400.

que contiene la fuente, con el objeto de uniformar lo mejor posible la iluminación en el haz útil.

Rigidez de los soportes

Felizmente tiene mucha menos importancia que con los métodos de Michelson o Zernike, aunque naturalmente las observaciones son más fáciles y rigurosas con un equipo estable. Los soportes para los espejos construidos por los aficionados son a menudo defectuosos y pueden producir deformaciones mecánicas a las piezas bajo control ; también aquí debemos recurrir a un concepto cinemático y tomamos de los montajes de A. Couder algunas de las disposiciones siguientes, que son tan eficaces como poco onerosas de realizar. El espejo apoya en dos puntos de su borde separados entre 60 y 90° sobre las gualderas del soporte de la figura 33, cuyas aristas han sido rebajadas ligeramente, de modo que el espejo descansa contra el apoyo vertical, cuyo plano está definido por las cabezas de tres clavos introducidos a medias. También el soporte debe apoyar en 3 puntos sobre un armazón sólido que apoye directamente en el suelo si se trabaja en un sótano o empotrado en un ángulo de la pared si el local es un piso de la ciudad. El aparato de **Foucault** se coloca sobre un amplio y firme trípode con preferencia de altura variable, que permita hacer todos los ajustes rápidamente, sin quitar la vista de la imagen ni tocar ni el soporte ni el espejo.

Práctica de la prueba de Foucault

Debe trabajarse en un local cerrado y con suficiente aislación térmica para evitar en

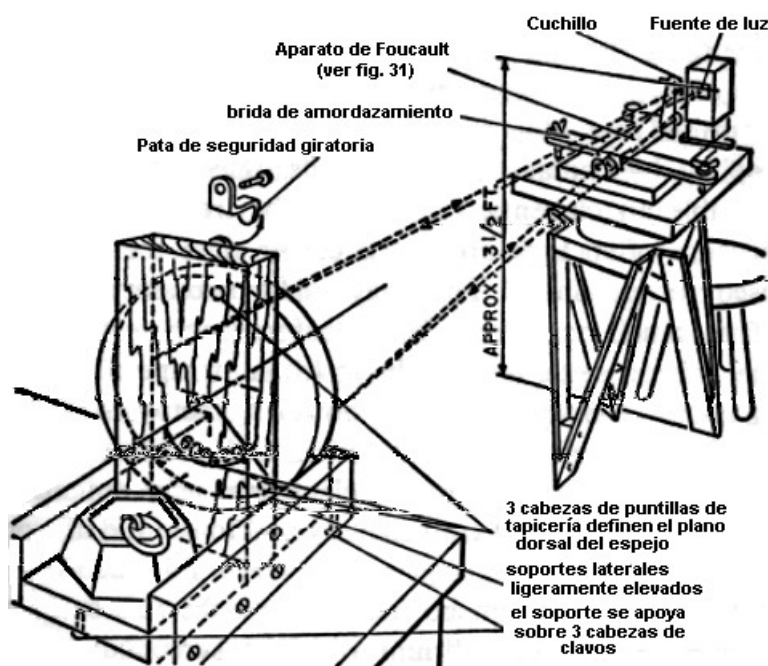


Fig 33. Disposición general para el control de un espejo

todo lo posible la heterogeneidad óptica del aire. Los sótanos son por lo general, los mejores sitios, excepto en invierno, cuando el calor desprendido del observador y de la fuente de luz, producen corrientes cálidas que se enfrían al contacto con las paredes. Este lugar es también algo inconveniente por la diferencia de temperatura que generalmente existe con respecto al lugar de pulido, y el espejo necesita entonces varias horas para hallar su equilibrio térmico antes de cada prueba. Si se trabaja en una casa se elegirá una habitación cuyos muros no estén expuestos directamente al sol. Conviene una obscuridad relativa, pero es cómodo permitir la entrada de una luz natural que baste para orientarse y ver el espejo, el soporte, etcétera. No es posible ningún examen útil si el espejo no se halla en perfecto equilibrio térmico con el aire ambiente. La simple operación que consiste en tomar el espejo frío para colocarlo en el soporte necesita

todo lo posible la heterogeneidad óptica del aire. Los sótanos son por lo general, los mejores sitios, excepto en invierno, cuando el calor desprendido del observador y de la fuente de luz, producen corrientes cálidas que se enfrían al contacto con las paredes. Este lugar es también algo inconveniente por la diferencia de temperatura que generalmente existe con respecto al lugar de pulido, y el espejo necesita entonces varias horas para hallar su

luego una espera de media hora ; si el espejo acaba de ser trabajado, al cabo de una media hora podrá analizarse su forma general gracias a un intercambio térmico superficial, pero el radio de curvatura y su forma exacta cambiarán todavía durante varias horas.

Para centrar rápidamente el aparato, se lo dispone aproximadamente frente al espejo a una distancia cualquiera pero un poco mayor que el radio de curvatura. Con la lámpara encendida y quitada la rendija, se busca moviendo la cabeza, la imagen de retorno del orificio de la linterna que debido a sus dimensiones (1 cm por ejemplo), es fácil de hallar ; esta imagen es más pequeña que el objeto. Se desplaza lo suficiente todo el conjunto formado por el aparato de **Foucault** y el trípode para aproximarse al espejo y llevar la imagen de retorno, que no se perderá de vista, a la proximidad del cuchillo. El diámetro de la imagen del orificio aumenta ; cuando se logra la misma dimensión que el objeto se está cerca del centro de curvatura ; puede colocarse la rendija e intentar un primer corte con el cuchillo. La imagen de la rendija debe ser exactamente paralela al filo del cuchillo, pudiéndose hacer un ajuste preciso por medio de un ocular Ramsden y un cuchillo giratorio (figura 31). Careciendo de un ocular que permita ver simultáneamente nítidos el cuchillo y la imagen, podemos contentarnos con separar el ojo aproximadamente 30 cm detrás del cuchillo y verificar que la imagen se extingue simultáneamente en toda su altura ; las franjas de difracción, de las que hablaremos en el párrafo siguiente, dan un criterio más sensible. Una vez hallada la intersección, ocurre a menudo que el cuchillo no está en el mismo plano frontal que la fuente. La diferencia puede alcanzar varios centímetros sin inconvenientes para el control, pero hay que tomarla en cuenta si se desea medir el radio de curvatura del espejo. En este caso nos serviremos de una regla larga y liviana que se apoya en el centro del vidrio, y trazaremos marcas con tiza a la altura de la fuente y del cuchillo ; el radio de curvatura es el promedio de las distancias de ambas marcas al centro del espejo.

El principiante practicará cuanto pueda para hallar las posiciones notables del cuchillo que muestren las zonas principales del espejo defectuoso que examina con un oscurecimiento uniforme, para apreciar si existe un defecto en profundidad o en elevación ; nunca olvidará hacer mentalmente el razonamiento acerca de la dirección de la iluminación ficticia.

Difracción en el ensayo de Foucault

El enorme interés que los ópticos astrónomos acuerdan al método de Foucault debe incitar a la búsqueda del límite de validez de la explicación puramente geométrica tomando en cuenta la naturaleza ondulatoria de los rayos luminosos. Es muy curioso que los fenómenos de difracción no tengan aquí sino un papel muy secundario (lo que generalmente no ocurre con las pruebas “mejoradas” que se han propuesto), al punto que los hubiéramos pasado completamente por alto en estas notas destinadas a los aficionados si no fuera necesario ponerlos en guardia contra probables errores

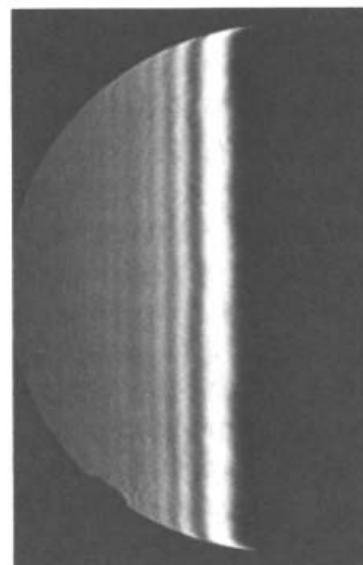


Fig 34. Franjas de sombra intrafocales de un espejo esférico con borde rebajado en $1/3$ de onda (rendija de 5μ)

de interpretación y señalar la posibilidad de su aprovechamiento. Rayleigh fue el primero en considerar el brillante anillo de difracción visible alrededor del espejo, aun cuando el cuchillo alcanza a cubrir totalmente la imagen ; este anillo entorpece la interpretación correcta de los defectos del extremo del borde. Banerji intentó aprovechar este fenómeno. Una teoría completa de la prueba de **Foucault** fue elaborada recientemente por Gascoine y por Linfoot, y la conclusión práctica de estos trabajos es que no hacen una corrección importante a la interpretación geométrica, en caso de que no haya grandes aberraciones del orden de una franja, que por otra parte resultan fáciles de estudiar con fuentes suficientemente grandes como para que la difracción no resulte molesta. Ya hemos visto la utilidad que F. Zernike supo extraer de su teoría ondulatoria de la prueba de **Foucault**, y su nuevo método se aplica especialmente a los pequeños defectos elementales más o menos periódicos causados por la estructura de la herramienta.

En 1931 A. Couder señaló el tipo de franjas oscuras de Fresnel que bordean la sombra del cuchillo cuando se encuentra en posición netamente extrafocal y subsisten aún en la intersección si el haz no es anastigmático. Este fenómeno sólo se observa con una rendija suficientemente fina y su interés práctico es bastante grande ; en primer lugar, permite ajustar el ancho de la rendija en un valor correcto y colocar el cuchillo exactamente paralelo a la imagen. Con los haces que nos interesan, abiertos de $f/12$ a $f/16$, se ven 2 ó 3 franjas de sombra (figura 34) bordeando la sombra geométrica para una posición extrafocal del cuchillo de 20 mm aproximadamente, cuando la rendija tiene el ancho recomendado de 30 a 50 μm . Con una fuente monocromática (por ejemplo de rayo laser) y una rendija de 3 μm se pueden observar y fotografiar las franjas sobre toda la mitad de la superficie no cubierta por la sombra.

A. Couder demostró también la posibilidad de aprovechar este fenómeno para la apreciación inmediata de los apartamientos de tautocronismo sin ningún cálculo. En efecto, cuando el haz es anastigmático, las franjas son rectilíneas si el cuchillo en posición intrafocal cubre más de la mitad del haz ; en caso contrario, su forma permite apreciar la magnitud de la desviación utilizándose para esto la primera franja, que es la más visible y cuya distancia a la sombra (aproximadamente $\frac{3}{4}$ de onda) sirve de escala.

Por vía de ejemplo presentamos la fotografía de las franjas obtenidas con un espejo con borde rebajado, defecto que no habría sido apreciado tan exactamente desde el centro de curvatura a causa del anillo de Rayleigh mencionado anteriormente.

Cuando se estudia una superficie con un defecto notable dentro de las condiciones del examen, por ejemplo un paraboloide bastante abierto, en el centro de curvatura, las franjas de sombra persisten más o menos nítidamente para todas las posiciones del cuchillo ; pero si uno se atiende a una fuente de 30 a 50 μm no será jamás molestado seriamente y la movilidad de las franjas impedirá confundirlas con los cambios de matiz de una ladera en el curso de un corte.

Límite de sensibilidad de la prueba de Foucault

Cuando se estudia una superficie cuyos defectos en las condiciones de examen, son muy débiles, los fenómenos de difracción no son molestos excepto en el borde extremo y la apreciación de los accidentes está limitada por el valor del más pequeño contraste

perceptible. Si la fuente no mide más que $10\mu\text{m}$ de ancho, un error transversal de $0,5\mu\text{m}$ de ancho se traduce en una variación muy visible de matiz. Esto corresponde sobre la onda en un espejo de 3 m de radio de curvatura, a una pendiente de $1/(6 \times 10^6)$; por consiguiente, para hablar de la altura, es necesario fijar la dimensión transversal de la región aberrante. si se trata de un defecto de gran amplitud, por ejemplo de una zona de 60 mm de ancho de pendiente, la altura alcanzará $1/10^5$ mm equivalente a $1/60$ de onda; pero si el defecto es poco extenso, la altura del accidente será extraordinariamente pequeña. Hemos podido fotografiar accidentes de menos de 1 mm de ancho sobre el vidrio, cuya pendiente (deducida de consideraciones únicamente geométricas) era de 1×10^{-6} m, la altura correspondiente a 10 \AA (o sea de $1/600$ de onda) fue confirmada por una medida de los mismos accidentes mediante un método por contraste de fase (método de Lyot).

Principio de control de los espejos parabólicos

El control de los paraboloides en la misma disposición que tiene su uso regular, impone serias dificultades puesto que habría que alejar considerablemente la fuente de luz, o disponer de un plano patrón a autocolimación o de un colimador perfecto del mismo diámetro que el espejo; pero a estas soluciones, aun los profesionales solo pueden recurrir en raras ocasiones. Se trabaja pues en el centro de curvatura; Sabemos que, en estas condiciones únicamente un espejo esférico dará una imagen perfecta; con el paraboloide aparece un defecto bien visible, inverso del presentado en el foco del esférico, que es un aspecto de la aberración esférica. Se puede prever anticipadamente la magnitud de este defecto, que se calculará por ejemplo, en el sentido longitudinal, cuya medida es más fácil; bastará luego restar este valor de la aberración real, observada en el espejo estudiado, para obtener los residuos que representan los defectos propios del espejo y que un simple cálculo reducirá al plano focal, con el fin de poder apreciar directamente el grado de importancia que tendrá en relación con la figura de difracción perfecta.