

Definiciones relativas a la aberración esférica

Como ejemplo, consideremos un espejo parabólico (figura 35) que da una imagen de un punto luminoso colocado en su centro de curvatura. Esta imagen no es exactamente un punto, puesto que las intersecciones de los rayos emergentes de zonas del espejo cada vez más alejadas de su centro, se realizan a distancias también cada vez más alejadas del espejo.

La energía luminosa está repartida principalmente a lo largo de las intersecciones de los rayos vecinos que dibujan progresivamente una envoltura llamada “superficie cáustica”, de revolución alrededor del eje óptico, y cuya forma es parecida a un pabellón de trompeta ; su sección es visible en la figura 35, donde las alturas de incidencia están muy exageradas para mayor claridad. La superficie cáustica contiene además un pequeño segmento de recta luminosa confundida con el eje óptico, originada en cierto modo, si puede expresárselo así, por el apilamiento de las imágenes dadas sobre el eje por las zonas de radios crecientes.

Es particularmente interesante considerar este segmento ; su longitud $\Delta p'$ mide la aberración longitudinal y se calcula por medio de un desarrollo en serie que, en la práctica, se reduce al primer término con una aproximación más que suficiente para los espejos comunes :

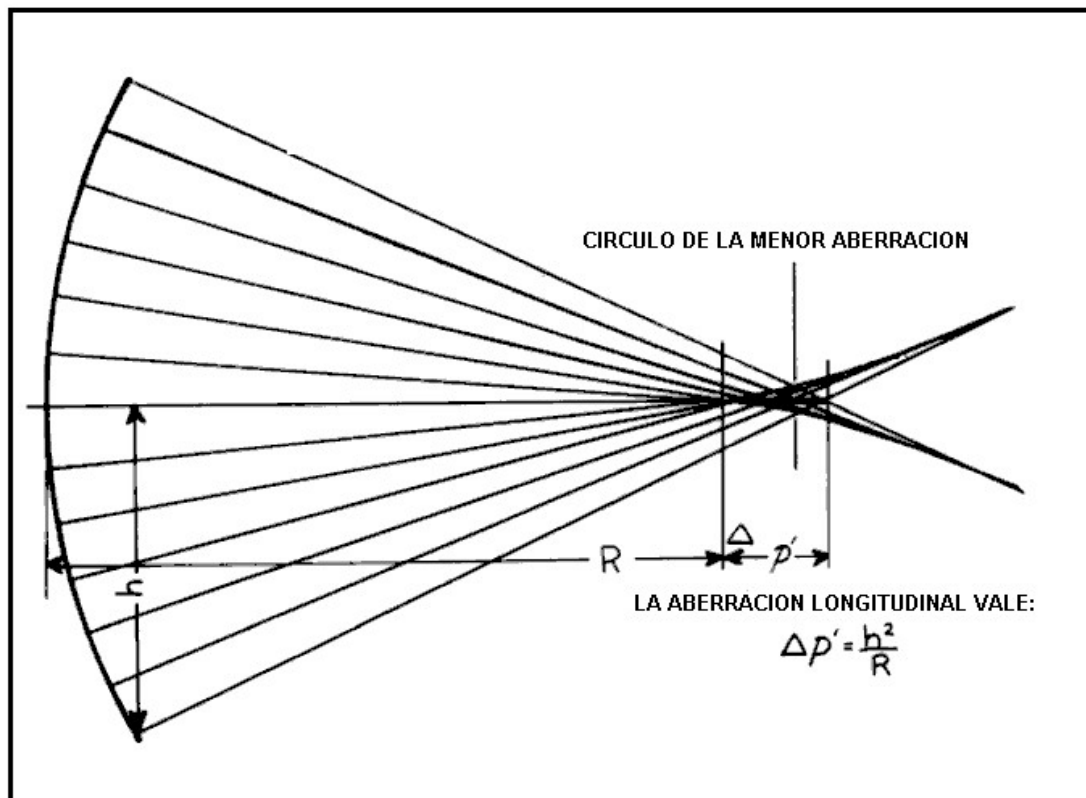


Fig 35. Aberración de un espejo parabólico en su centro de curvatura

$$\Delta p' = \frac{h^2}{R}$$

La aberración longitudinal de una zona de radio h es igual al cuadrado de esa altura de incidencia dividido por el radio de curvatura R del espejo.

Pero el paraboloides no es sino un caso particular entre las superficies deformadas que uno encuentra (involuntariamente) cuando hace un espejo ; a menudo se introduce en la fórmula un coeficiente de deformación b , y la misma se transforma entonces, en la siguiente expresión general :

$$\Delta p' = b \frac{h^2}{R} + \dots$$

b vale -1 en el caso de la parábola y el signo menos indica solamente que la intersección de los rayos marginales ocurre más lejos del espejo que la de los rayos centrales. Si b es menor que -1 , la superficie es hiperbólica ; si está comprendido entre -1 y 0 , su meridiana es una elipse vuelta sobre su eje mayor (prolate en inglés), y cuando está comprendido entre 0 y $+1$ la superficie es de revolución con referencia al eje menor de la elipse (oblate en inglés) (figura 36) ; en este último caso el radio de curvatura de los rayos marginales es más pequeño que el correspondiente a los rayos centrales y se dice

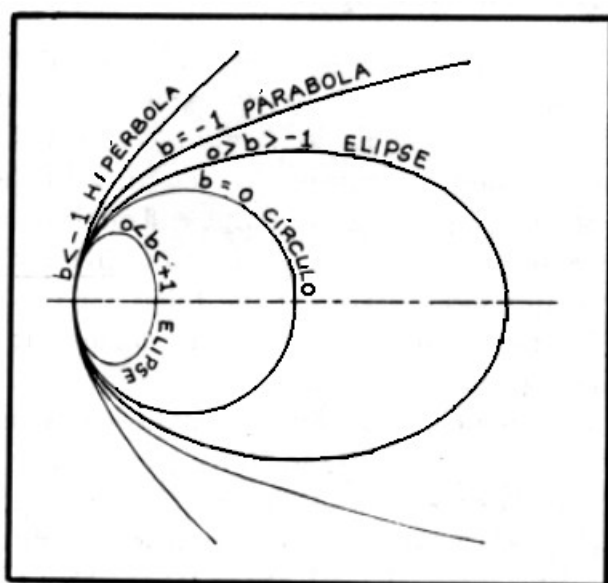


Fig 36. Significado del coeficiente de deformación b .

entonces que la aberración es del tipo de subcorrección la trompeta tiene su extremo afilado vuelto hacia el exterior mientras que para todas las superficies con coeficiente de deformación negativo (figura 35) ella está dirigida hacia el espejo y existe entonces sobrecorrección.

Notemos también que entre las secciones transversales de la cáustica, hay una cuyo diámetro es mínimo ; es el círculo de menor aberración (figura 35) que se halla a una distancia igual a $\frac{3}{4}$ del segmento de aberración longitudinal al contar de la intersección de los rayos centrales.

Descripción de la aberración esférica

Para el técnico óptico, la aberración esférica consiste, principalmente, en un desarrollo en serie de las potencias impares de h ; pero el observador y constructor, debe estar más familiarizado con los aspectos más concretos de la realidad física que, de hecho, es una resultante de la geometría y de la difracción. El observador tendrá a menudo obstáculos con la aberración esférica cuando observe el cielo ; por ejemplo, si existe una sobrecorrección común y observa una estrella bastante brillante con un ocular muy fuerte, ve las siguientes apariencias : en el foco de los rayos centrales (Figura 37A, en

el cuadrado pequeño), la figura de difracción, casi normal en el centro, está rodeada de anillos anormalmente brillantes y numerosos, y a menudo los del borde se funden en una grande y pálida aureola si la imagen está agitada o la fuente no es puntual ; alejando el ocular, la aureola disminuye de diámetro, y la energía se concentra sobre el anillo exterior (figura 37B) que continúa decreciendo hasta el momento en que se alcanza el círculo de menor aberración ; en este plano la imagen es por otra parte muy mala, puesto que toda la luz está en la sección anular de la cáustica y el segmento axial no representa más que una débil fracción.

Alejando todavía más el ocular, de modo de observar la intersección de los rayos marginales (figura 37C), veremos que gracias a ellos subsiste todavía un poco de luz sobre el eje, pero los anillos exteriores predominan y son bien marcados y corresponden a franjas de la cáustica. Por cierto que esta sucesión de aspectos se invertirá si la aberración es del tipo de subcorrección.

Veamos ahora lo más interesante para el constructor de espejos : el aspecto de las sombras por el método de **Foucault**. Nuestro cuchillo viene siempre de la derecha y corta primero el extremo de la cáustica ; el centro del espejo aparece en matiz uniforme (figura 37A), los rayos que vienen del lado derecho del espejo son interceptados por el cuchillo y las regiones correspondientes se ven oscurecidas. Por el contrario, el lado izquierdo está iluminado y el conjunto

da la impresión de una gran prominencia ligeramente aplastada en el centro (no olvidemos que la luz viene del lado opuesto al cuchillo). Alejemos un poco el cuchillo ; cuando corte el segmento de aberración longitudinal por la mitad (figura 37B) se hallará

en la intersección de los rayos enviados por la zona de radio $\frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$ (siendo 1 el

radio del espejo) ; esta zona se ve entonces con un matiz uniforme y en relación con ella, las regiones de radios más cortos tienen entonces sus laderas vueltas hacia el interior, dando la impresión de una cavidad ; por el contrario, las zonas marginales tienen un radio más largo, y sus laderas inclinadas hacia el otro lado. El conjunto sugiere un anillo toroide en relieve, empalmado con suave pendiente. Este aspecto debe resultar familiar al óptico. Alejémonos todavía más ; la zona “neutra” llegará a alcanzar el borde mismo del espejo (figura 37C) ; todas las otras zonas tienen un radio de curvatura más corto y aparecerán como las paredes de una profunda cubeta.

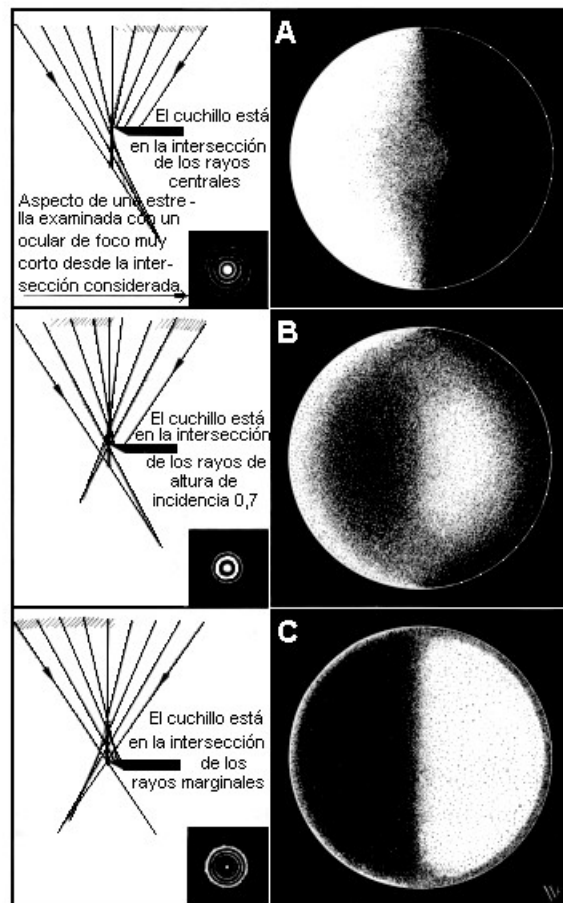
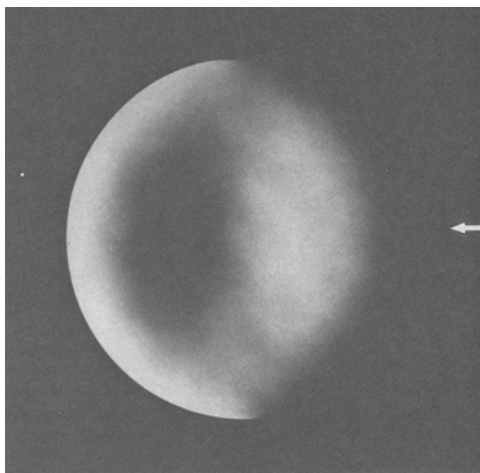


Fig 37. Sobrecorrección esférica

Todas las superficies deformadas según una ley de esta naturaleza, presentan aspectos parecidos, más o menos notables, cualquiera que sea el valor negativo del coeficiente de deformación (elipses, parábola, hipérbolas) y aun cuando el signo es positivo, con la condición de dar vuelta a la figura conservando la convención de iluminación (el aspecto corriente es una prominencia con los bordes levantados). La sensibilidad del aparato de **Foucault** empleado, la abertura relativa del espejo, la magnitud de su radio de curvatura, son otros tantos factores que influyen igualmente sobre el contraste de las sombras. Para fijar ideas, digamos que los aspectos de la figura 37 se observan en un espejo parabólico estándar de 200 mm a $f/D = 6$ y con el aparato descrito anteriormente con una rendija normal de una treintena de micrones de ancho. Si el espejo tiene una abertura relativa más grande (o si es hiperbólico), las sombras son más marcadas, y el límite de las medias tintas entre los negros y los blancos se estrecha ; por el contrario, con un espejo de $f/D = 10$ (o un espejo normal elíptico) las sombras son muy débiles y el relieve muy atenuado. Es evidente que son indispensables. Es evidente que son indispensables las medidas cuantitativas para establecer la perfección del espejo y especialmente debemos poner a los aficionados en guardia contra los numerosos charlatanes que nada han comprendido respecto de las sombras y proponen métodos “simplificados” que carecen de valor.

Medida de la aberración esférica

También **León Foucault** fue el primero en describir los “sólidos diferenciales” dibujados en la figura 37, de los que nos servimos para medir la aberración longitudinal. Para ello se busca experimentalmente la posición longitudinal del cuchillo que da el aspecto A y se anota el desplazamiento a partir de un cero arbitrario de la reglilla (si el aparato no está dividido, se traza una marca sobre una tarjeta) ; del mismo modo se



busca la posición más alejada del espejo donde se observe el aspecto C y la diferencia de ambas lecturas (o la distancia entre ambas marcas de la tarjeta) da la longitud del segmento $\Delta p'$. Bastará comparar este segmento con su valor teórico, para saber si el espejo está más o menos deformado que la parábola. Por ejemplo, con un espejo de 20 cm a $f/D = 8$ se tiene $h = 100$ y $R = 3200$; por consiguiente, $\Delta p' = 3,12$ mm. El espejo estándar tiene $\Delta p' = 4,17$ mm. Por otro lado se verifica que en la mitad de este segmento el cuchillo da el aspecto B, es decir que la zona neutra está

sensiblemente a 0,7 del radio del espejo y que las zonas se empalman normalmente, si irregularidades. Este ensayo sumario puede, en rigor, bastar para verificar un espejo poco deformado (por ejemplo uno de 20 cm de $f/D = 8$) pero exige del operador una profunda experiencia de las sombras ; en efecto, el corte de los rayos centrales es poco preciso con rayos que se cortan tan oblicuamente y el de los rayos del borde extremo es molestado por el brillante anillo de Rayleigh. Por otra parte, anomalías zonales que son muy frecuentes, ya sea en el centro o sobre el borde, bastan para inducir a un juicio erróneo sobre un espejo, si el simple examen de las sombras no ha permitido descubrirlas.

G. W. Ritchey tuvo la idea de hacer una comparación fotométrica mediante dos ventanas recortadas en un diafragma, las cuales descubren dos porciones de una misma zona simétrica con respecto al eje. Las ventanas del diafragma de Ritchey eran tan estrechas que las orlas de difracción estorbaban considerablemente las medidas. A. Couder ha descrito un diafragma mucho más práctico, del cual vamos a ocuparnos.

Diafragma de zonas concéntricas de A. Couder

Las ventanas descubren zonas sucesivas cuyos radios tienen sus cuadrados crecientes en progresión aritmética¹; por lo tanto son más estrechas hacia el borde del espejo, donde la más rápida deformación no permite examinar en matiz uniforme una zona ancha. El diafragma se recorta en papel grueso de dibujo, cartulina o cartón delgado; su trazado es fácil; una primera

circunferencia exterior corresponde al diámetro del vidrio y una segunda, ligeramente más pequeña, es el diámetro a la altura del bisel; su radio es el radio exterior de la zona marginal cuyo ancho se determina por consideraciones prácticas dictadas por una parte por la dificultad de efectuar buenas medidas si la zona es muy angosta y por la otra, por la obligación de observar un matiz casi uniforme si la zona es muy ancha.

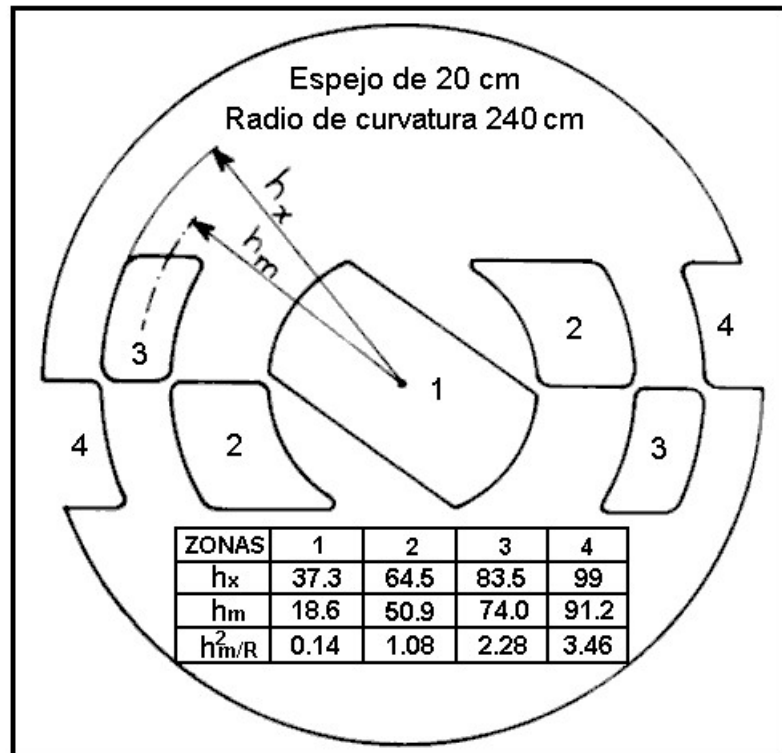


Fig 38. Diafragma de Couder

Si el espejo está muy deformado, son necesarias numerosas zonas (por ejemplo, una por cada milímetro (de eje focal) de aberración), pero con un espejo estándar aconsejamos especialmente a los principiantes no descender por debajo de una quincena de milímetros para una ventana vista a 3 m (valen más 4 buenas lecturas que 10 malas).

Una vez determinadas las ventanas exteriores, la ley de los cuadrados de los radios decrecientes en progresión aritmética (cuya razón se deduce del ancho de la zona

¹ La razón de crecimiento de área es $28\pi \text{ cm}^2 = 88 \text{ cm}^2$. Los radios h_x son:
 $h_1 = \sqrt{\frac{1}{7}}R$, $h_2 = \sqrt{\frac{3}{7}}R$, $h_3 = \sqrt{\frac{5}{7}}R$, $h_4 = \sqrt{\frac{7}{7}}R$. En esta forma las áreas de las franjas circulares serán: $Z_4 = Z_3 = Z_2 = 2Z_1$.

externa), que puede ser respetada sólo aproximadamente, permitirá elegir el número de ventanas y sus radios exteriores¹.

Aclaremos por medio de un ejemplo : la figura 38 da las características del diafragma estándar empleado en la Commission para el control de los espejos de 20 cm.

Una vez recortado el diafragma, se miden los diámetros interiores y exteriores reales de cada zona (a 1/10 de mm). Se calcula la altura media² h_m para cada una (dividiendo por 4 la suma de los dos diámetros) y la aberración longitudinal h_m^2/R se comparará con los números hallados experimentalmente.

Procedimiento y causas de errores en las medidas visuales con el diafragma

Deberán ser especialmente cuidadas las precauciones habituales para la homogeneidad térmica en el vidrio y en el aire de la habitación ; el espejo estará correctamente colocado en su soporte de contactos geométricos, desde varias horas antes.

El Aparato de **Foucault** estará provisto de su abertura, cerrada entre 10 y 20 μm , paralela a la arista del cuchillo (se ven 4 ó 5 franjas de sombras a 20 mm de la intersección). La corredera del carrito porta cuchillo estará dispuesta paralela al eje óptico (la penetración del cuchillo en el haz no se modifica cuando se desplaza el carrito longitudinalmente y el cuchillo es perpendicular a este eje). Primero se verifica, con el espejo descubierto, la uniformidad de la iluminación (rotación de la linterna sobre sí misma) y la sucesión de los aspectos de la figura 37 que naturalmente deben producirse para enfoques del cuchillo comprendidos dentro de la graduación. Se puede asegurar el barrilete que inmoviliza el aparato de **Foucault** y colocar el diafragma de zonas concéntricas delante del espejo, orientando horizontalmente el eje de las zonas y cuidando el centrado con referencia al bisel del vidrio ; un pequeño resorte de alambre de acero puede eventualmente, asegurar la posición (evitar tocar el espejo). Es necesaria una verificación más cuidadosa de la uniformidad de la iluminación de las ventanas exteriores sobre todo (cuchillo netamente fuera del haz). Para las comparaciones fotométricas, el ojo trabaja en las mejores condiciones si la habitación no está

¹ El número de zonas se determina por el número entero que dé la siguiente fórmula : $2Z - 1 = \frac{2r^2}{r^2 - (r - 15)^2}$ con r en mm.

² Esta media aritmética h_m no es idéntica a la h_m de A. Couder, Lunettes et télescopes, Pág. 533, que se define como el radio cuyo cuadrado es igual a la mitad de los cuadrados de los radios interior y exterior de la zona, y que permite una reducción teóricamente más correcta ; no obstante la significación física del enfoque fotométrico de la zona, nos parece corresponder a la mitad de la ventana (las orlas de difracción afectan simétricamente ambos bordes y el observador iguala especialmente las partes centrales de la porción). Las diferencias que resultan de esta divergencia de interpretación son de todos modos pequeñas ; con el diafragma estándar, ellas representan apartamientos transversales inferiores al micrón. Cada uno elegirá según su criterio.

completamente a oscuras y hasta es ventajoso iluminar la pantalla y el aparato con una luz difusa muy uniforme. Todas estas precauciones no deben acobardar a los principiantes ; ¡que ensayen ! Al cabo de un pequeño número de experiencias comprenderán mejor estas precauciones y sabrán poner rápidamente en posición correcta su dispositivo de control.

No falta sino hacer las medidas ; comencemos, por ejemplo, por la zona central. Si esta zona parece más negra del lado izquierdo es necesario aproximar el cuchillo al espejo (se acciona el tornillo de los desplazamientos longitudinales con la mano izquierda mientras que la derecha maniobra al mismo tiempo el tornillo de corte para ensayar los distintos enfoques) ; inversamente, se lo alejará si el lado derecho es el más oscuro.

Cuando se alcanza el centro de curvatura de la zona, ésta se oscurece uniformemente en toda su superficie. La posición del cuchillo es dada por la escala graduada con referencia a un origen arbitrario (únicamente nos interesan las diferencias) y se puede pasar a la zona # 2 cuyas ventanas son fáciles de identificar con la disposición del diafragma de Couder ; naturalmente, la ventana de la derecha es la más oscura, lo que equivale a decir que es necesario alejar un poco el cuchillo para hallar el centro de curvatura de la zona y así se continúa para todos los pares de ventanas que dan los enfoques longitudinales correspondientes. Alcanzada la última ventana, es conveniente recomenzar inmediatamente otra serie de medidas retrocediendo hasta el centro del espejo. Para comparar la iluminación de dos ventanas bastante alejadas una de la otra, es necesario proceder como en la comparación de dos estrellas separadas en el cielo, fijando alternativamente la atención sobre una y otra sin tratar de fusionarlas. Esta fotometría es más fácil y menos expuesta a errores, que se deben principalmente a la

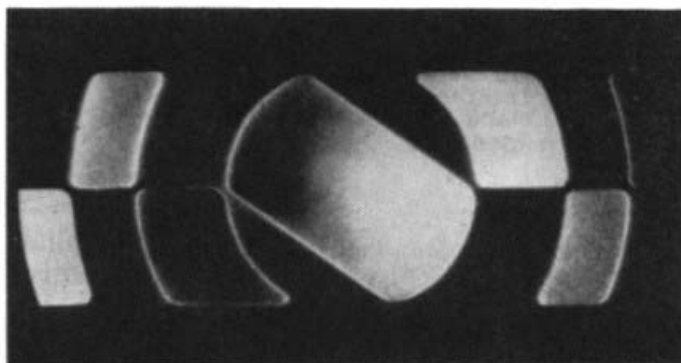


Fig 39. Prueba de Foucault de un espejo estándar; El cuchillo está en la intersección de los rayos de la zona 3. Observe las orlas de difracción y la fusión parásita (rendija de 20 μ)

difusión lateral por difracción, si se examinan las ventanas al comienzo de la extinción, sin continuar la comparación más allá de la mitad del corte.

La figura 39 da una idea de las causas de errores, de las que hablaremos a continuación. Debemos insistir, sin embargo, en que este método, a pesar de sus defectos, es el más útil.

Cuando la superficie del espejo es muy suave, el aire de la habitación calmo y la iluminación conveniente, el operador ejercitado por algunas decenas de miles de medidas, encuentra el centro de curvatura de una zona intermedia de un haz a $f/12$, con un error medio de $2/100$ de milímetro. Evidentemente el principiante no debe esperar tal precisión ; sus primeras series podrán diferir de 3 ó $4/10$ entre ellas, pero un poco de perseverancia dará enseguida diferencias de 1 a $2/10$ como máximo y se tendrá una aproximación suficiente haciendo entonces la media de 4 medidas sobre cada zona, que dará con seguridad valores a $1/10$ aproximadamente, permitiendo conocer la forma del espejo con una precisión mejor que el décimo de la tolerancia de Rayleigh para los espejos que

nos ocupan. Volveremos sobre esta reducción de medidas, en oportunidad de establecer el boletín de control.

Defectos que no son de revolución

Si bien son graves, no diremos más que algunas palabras puesto que quien trabaje convenientemente un espejo sobre una mesa fija, no tendrá en la práctica ocasión de notarlos.

Para descubrir esta género de anomalías, el método de las sombras de **Foucault** no es recomendable para quienes están poco familiarizados con los aspectos de difícil interpretación que las sombras pueden presentar para ciertas orientaciones del cuchillo. Un ensayo con el ocular sobre las manchas ligeramente extrafocales, puede bastar para tranquilizarnos. Ya hemos explicado que no es fácil de obtener una estrella artificial suficientemente pequeña y bien redonda, por medio de un agujero y con el montaje anteriormente descrito. Lo mejor es emplear la linterna porta rendija (con la rendija provisionalmente reemplazada por un agujero redondo de 3 ó 4 mm) para iluminar una bolita de acero o balín de aproximadamente 6 mm de diámetro pegada con un poco de resina en un lado del ocular de observación (figura 40). Si la bolita es nueva y bien pulida (se la mejora mucho por medio de una torta montada sobre un torno, con brea y rojo) da una imagen “estelar” del filamento de la lámpara que es recogida por el espejo, el cual a su vez devuelve una imagen, que se observa con un ocular bastante fuerte ($f \leq 10$ mm, por ejemplo, para haces a $f/12$). Cuando el espejo es prácticamente esférico se pueden utilizar manchas poco extrafocales : 2 a 3 mm solamente, que permanecen bien redondas si el espejo es exactamente de revolución, pero cuya ovalización es ya visible para un astigmatismo de $1/10$ de onda. Con un astigmatismo más notable, se encuentran posiciones longitudinales del ocular, distantes varios milímetros, que corresponden a elipses cuyos ejes son ortogonales (figura 40). Cuando además existe aberración esférica, se deben tomar manchas un poco más extrafocales, pero el ensayo mantiene generalmente un carácter crítico suficiente. Por excepción, en el caso de tensiones o compresiones extraordinarias (discos pegados sobre una “moleta” o un vidrio de “refuerzo” ; o temple muy fuerte) se pueden observar asombrosas y desastrosas figuras irregulares, del tipo indicado a la derecha de la figura 40, que son frecuentes en objetivos proporcionados por la industria. Antes de decidir que los defectos corresponden al espejo, conviene por un lado, hacer girar la bolita sobre ella misma o iluminarla desde una dirección un poco diferente para eliminar eventualmente sus propios defectos, y por otra parte debe tenerse en cuenta el astigmatismo del montaje, no siempre desdeñable cuando la bolita está a determinada distancia del eje o iluminada muy oblicuamente. Lo mejor es hacer girar el espejo sobre sí mismo y ver si el ángulo de posición del eje de una elipse extrafocal gira al mismo tiempo. Esta operación debe hacerse con cuidado para no calentar con las manos un diámetro determinado del espejo ; para evitar luego un laborioso enfriamiento, no se toca el vidrio sino con la interposición de franela o guantes gruesos.

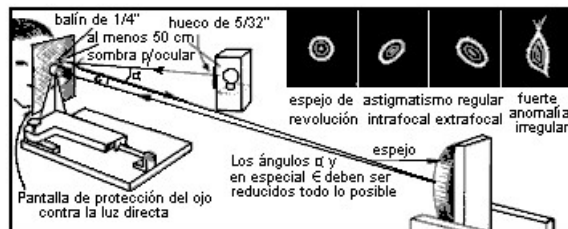


Fig 40. Estudio de los defectos no de revolución

No trataremos el retoque de defectos que no son de revolución ; éstos no se encuentran sino en caso de falsas maniobras sistemáticas que resultan imperdonables, tal como el olvido de girar el vidrio de abajo, pegar una manija muy grande o un disco de “refuerzo”, o también si el disco posee una heterogeneidad verdaderamente excepcional. En todos los casos, el mejor medio, aún para un óptico ejercitado, es buscar la eliminación automática del defecto continuando simplemente el trabajo normal por lo menos durante una hora, favoreciendo la eliminación de los errores sistemáticos con la inversión de los discos, el cambio de carreras, o mejor aún de operador. Solamente después de muchas tentativas de este tipo hay que resignarse a tallar otro espejo ; nosotros jamás encontramos semejante caso en la *Commission des Instruments*.

Las ondulaciones

Se trata de un sistema de accidentes, no de revolución, que afectan en la forma de pequeñas ondulaciones que generalmente no tienen más de 2 ó 3 centésimas de longitud de onda de altura, pero que, visto su número y disposición casi periódica, pueden hacer actuar al espejo como una red de fase y causar una difusión de luz no siempre despreciable. Pueden distinguirse las ondulaciones primarias cuyo período es el de la malla de la herramienta, bien visible con un aparato de **Foucault** de fuente intensa y rendija fina, capaz de aumentar el brillo de los anillos de difracción a partir del número 2 ó 3 y las micro ondulaciones, que se descubren en rigor fotográficamente con un aparato de **Foucault** bien ajustado, pero sobre todo por el método de Lyot. Estas micro ondulaciones dependen principalmente de la naturaleza de la torta, del agente de pulimento y quizá también del estado estructural del vidrio ; es capaz de difractar la luz mucho más allá de la imagen central, a varios minutos de arco, superponiendo así una luz parásita en todo el campo.

Con una torta de cuadrados de 20 mm se provocan sobre el vidrio almohadillas de fondo plano separadas por tabiques de radio más corto que reproducen exactamente los canales de la herramienta. Una torta H. C. F. con alvéolos hexagonales de cerca de 6 mm produce ondulaciones primarias como panal de abejas del cual dimos una fotografía en la figura 29A tomada en el aparato de **Foucault** y micro ondulaciones muy pronunciadas (figura 29D). La identidad entre la estructura de la herramienta y la de las ondulaciones engendradas es perfecta, aún para los más pequeños accidentes que se puedan fotografiar en contraste de fase. Un ejemplo típico lo proporcionan las tortas para retoques parciales guarnecidas de tafetán de seda, cuya trama se encuentra exactamente impresa sobre el vidrio en forma de surcos de menos de 1 Å de profundidad y de 2/10 mm de ancho, aún después de la más pequeña intervención realizada con carreras constantemente cruzadas si marcar el más mínimo tiempo de detención en un lugar. Agregamos que en éste último ejemplo, la luz difractada producida no es perjudicial sino en el caso de un lente para coronógrafo.

Podrían desfasarse eficazmente las ondulaciones primarias alternando el pulido con dos herramientas con cuadrados de diferentes dimensiones. Pero corrientemente uno evita tal complicación. Una primera precaución elemental es evitar el régimen de pulido brutal “a los gritos” que siempre provoca un calentamiento irregular y adherencias

locales anormales de la herramienta. A. Couder¹ señaló que durante el trabajo a máquina de grandes piezas es conveniente impedir los giros espontáneos de la herramienta que se producen sobre los cuadrados anormales provocando anomalías periódicas, mecánicamente mantenidas, que amenazan alcanzar una amplitud catastrófica. Cuando se trabaja a mano el peligro es menor, pero es necesario, de todos modos, gobernar los giros de la herramienta causados por falta de adherencia y no introducir más que las rotaciones necesarias, hechas voluntariamente durante el movimiento de vaivén y no al cabo de la carrera. Hemos podido combatir muy eficazmente las ondulaciones primarias en la *Commission des Instruments* haciendo trabajar 4 ó 5 personas sobre el mismo espejo por permutación circular cada 10 minutos en las cuatro mesas de nuestro taller. El operador aislado obtendrá buenos resultados obligándose a reaccionar de modos diferentes, por ejemplo alternando las carreras normales en forma de W y de doble rizo (∞). En cuanto a las micro ondulaciones, se trata de una pura cuestión técnica. Recomendando el trabajo con brea y rojo damos el mejor procedimiento posible para obtener superficies niveladas a menos de 1 Å. ¡Confiamos en que el lector no escuchará a aquellos que le hablarán de tortas de cera o de papel ! No es raro que los profanos produzcan superficies pulidas por un régimen tan poco eficaz que las ondulaciones primarias sean nulas ; desgraciadamente, al mismo tiempo la forma general del vidrio es absolutamente indeterminada, por lo común fuertemente zonada y achatada. No perdamos de vista a los más graves por considerar los minúsculos defectos que no interesan sino a los amantes del arte.

Los defectos zonales

Son evidentemente los más importantes y los más frecuentes. Debemos pasar revista a los más comúnmente engendrados (figura 41).

La esfera (figura 41-1) no es más que el caso particular del apartamiento nulo que es capaz de producir un sistema de trabajo no perturbado². También es frecuente hallar una superficie deformada, sea hacia la bajo corrección esférica (figura 41-2) o hacia la sobre corrección (figuras 41-3, 4 y 5). Una rápida medida sin diafragma de la aberración longitudinal fijará inmediatamente la actitud a tomar para mejorar el espejo. Si la deformación es de sentido contrario o menor que la parábola, se podrá parabolizar de primera intención como si se tuviera una esfera. Éste es el caso más favorable y

¹ Défauts des instruments réels (Defectos de los instrumentos reales). Cahiers de Physique.

² La superficie plana se utiliza para representar la esfera, ya que así es como se le observa en el método de las sombras.

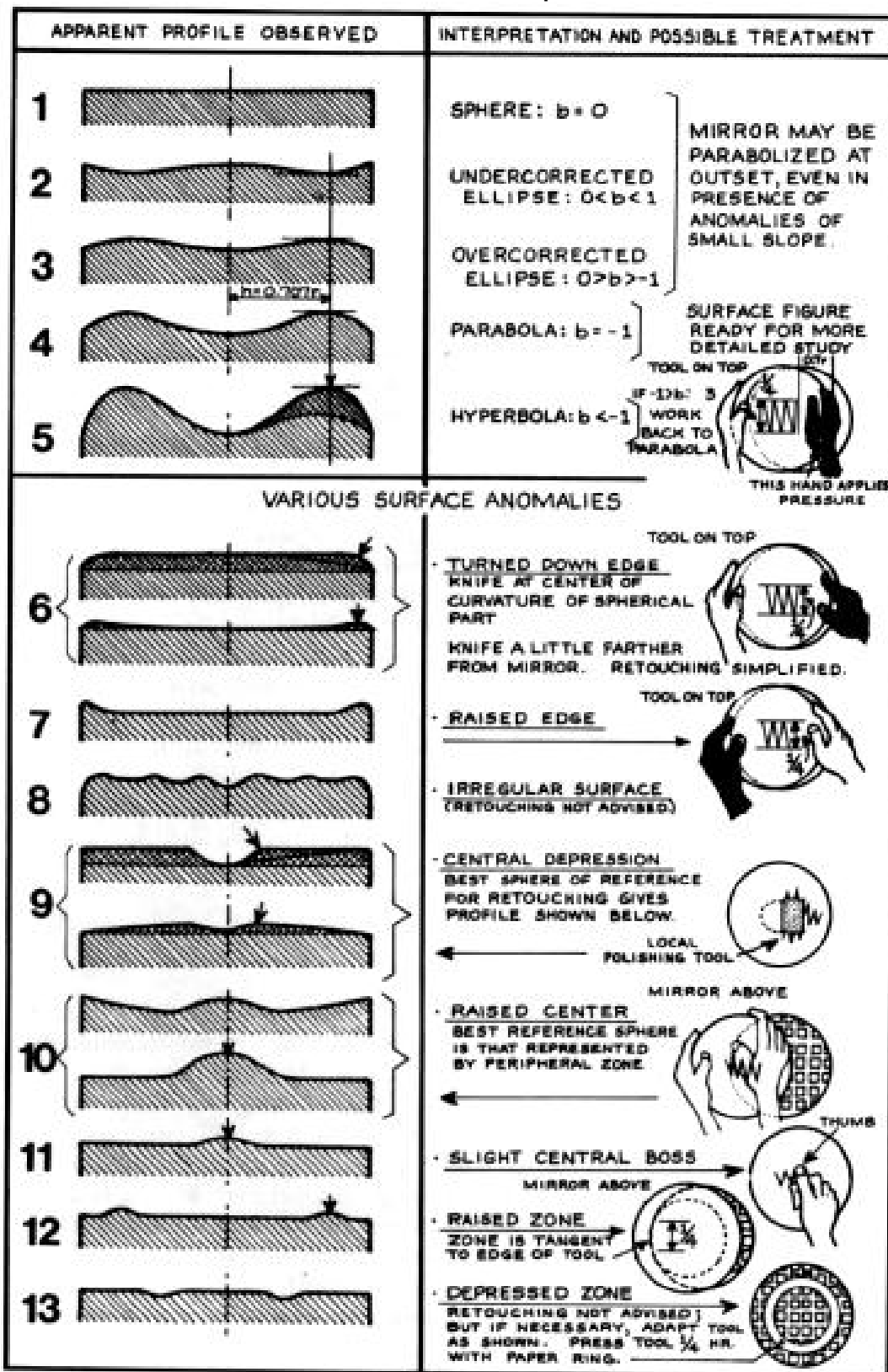


Fig 41. Ejemplos de retoques de anomalías zonales

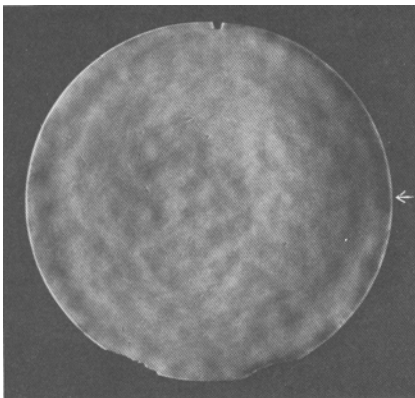
po
 drá aplicárselo aún en presencia de una anomalía de pendiente bastante suave. En el caso de una hipérbola que no exceda 2 ó 3 veces la parábola, se podrá volver

directamente a la parábola, por ejemplo con un régimen de sobrepresiones en la zona 0,7 que entra en la categoría de las intervenciones descritas más abajo.

Pero también muy a menudo subsiste al final del pulido un defecto zonal anormal debido a una herramienta defectuosa o a un hábito vicioso del operador. Como no es posible confiar en algunos minutos de parabolizado para eliminarlo, es necesario hacerlo desaparecer o al menos suavizarlo suficientemente. Antes de intentar un retoque propiamente dicho, es necesario ensayar la eliminación automática prosiguiendo el trabajo normal durante una buena hora después de una cuidadosa verificación de la herramienta y de las carreras. Una anomalía del borde (figuras 41-6, 7) es frecuentemente debida a una presión incorrecta de las manos en el borde de la herramienta, a carreras demasiado largas o a la brea muy blanda. Una superficie irregularmente zonada es inadmisibles (figura 41-8) ; es necesario proseguir el trabajo bastante tiempo, con una torta bien amoldada. Otras irregularidades zonales (figuras 41-9, 10, 11, 12 y 13) pueden provenir de una visible deformación de la herramienta, tal como cuadrados con aristas rotas, faltantes o mal cortados. Es preciso, ante todo arreglar la torta y continuar prolongadamente el trabajo normal. Por lo general, una anomalía difícil de retocar (zona deprimida, hoyo central) podrá eliminarse o al menos reemplazarse por un defecto más fácil de corregir (por ejemplo una protuberancia central).

Los retoques parciales

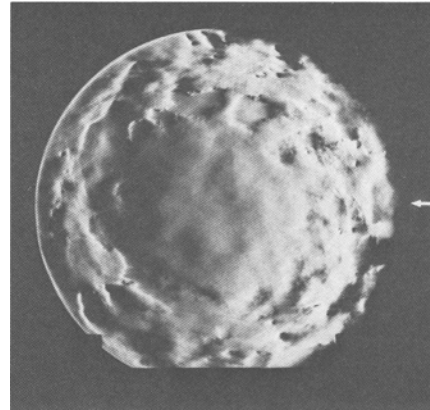
Conviene llevar un cuaderno de retoques que indique para cada intervención, una o más secciones aparentes notables del sólido diferencial observado por el método de **Foucault** (la figura 41 brinda ejemplos de perfiles a elegir), la indicación del tiempo de trabajo, de las carreras, de las presiones elegidas sobre la herramienta etcétera. Tal registro debería constituir, para un operador dado, el mejor documento de referencia para el trabajo futuro ; desgraciadamente no es posible aplicar un estricto determinismo a un problema de retoques parciales. No se trata de poner en duda el sagrado principio de causalidad, sino que es menester confesar que el conjunto de causas que determinan la acción de la herramienta no es jamás perfectamente conocido y reproducible. Con una herramienta grande solo se sabe lo que se hace cuando se trabaja durante unos pocos minutos y sin ninguna perturbación y con una torta para retoques es muy difícil empalmar el desgaste producido con el resto de la superficie. Del mismo modo, existen algunos principios que son de aplicación bastante general y segura en la medida en que se sepa evitar su superposición con otras causas de perturbación. Tales principios son :



1. El desgaste es una función creciente de la presión. Para nosotros es el principio más importante y más seguro. Los métodos de parabolización como veremos, constituyen a menudo sus corolarios. Un operador práctico puede de esta manera intentar cualquier retoque con una herramienta grande, lo que es una ventaja importante con relación al uso de tortas para retoques. La sobrepresión puede producirse en la posición espejo arriba, colocando el vidrio en

posición excéntrica de modo de hacer las carreras con la zona a deprimir tangente al

borde de la herramienta (figuras 41-10 y 12) o mejor todavía en la posición espejo abajo apoyándose en uno de los bordes de la herramienta (en la figura 41 las manos que ejercen esta presión aparecen sombreadas). El borde de la herramienta constituye ciertamente, un lugar crítico, donde puede localizarse con facilidad un desgaste anormal ; por ejemplo, con las mismas carreras pueden corregirse a voluntad : un borde rebajado (figura 41-6) o levantado (figura 41-7) simplemente apoyándose sobre el borde interior o exterior de la herramienta colocada en la conveniente posición excéntrica¹. Un peso móvil, desplazado con la mano sobre el dorso de la herramienta, permite lograr sin fatiga una presión regular, pero la maniobra no es cómoda. Hay que tener presente la necesidad de variar siempre la amplitud de la carrera para evitar un gran desgaste estrechamente localizado.



2. El desgaste es función del tiempo de acción de la torta. Proposición evidente, pero cuya aplicación da lugar a sorpresas puesto que la función no es simple ni aun reproducible y en todo caso no tiene ninguna posibilidad de ser lineal mientras no se logre un equilibrio térmico permanente, lo que no puede ocurrir en el corto tiempo que dura un retoque. Con una herramienta de acción modificada, excepto en el caso de un gran defecto (hipérbola profunda) o mal situado (borde rebajado), una duración de trabajo de 5 ó 10 minutos generalmente es suficiente. Cuando el defecto es estrecho y la perturbación es grande (pitón central corregido con el espejo arriba en posición muy excéntrica) un sólo minuto puede producir un hoyo muy fastidioso para retocar. Ante la duda, es prudente adoptar tiempos de acción notablemente cortos. Siempre existirá la posibilidad de repetir el retoque, si el defecto subsiste.

3. El desgaste es función de la velocidad del movimiento relativo con referencia a la herramienta. Este principio tiene algunas aplicaciones para las pequeñas piezas trabajadas con una máquina de altas revoluciones, pero para nosotros su interés es menor. Solamente es preciso recordar que para la regularidad del trabajo y la suavidad de la forma, son desfavorables las carreras rápidas o a tirones.

4. Anormalidades del desgaste por una herramienta modificada. Si voluntariamente se pone fuera de acción una porción de la herramienta, sea por prensado con interposición de papel sobre la zona, por raspado ligero de la superficie de algunos cuadrados o aun por su retiro total, se perturba el desgaste sobre la correspondiente zona del vidrio. Esta manera de trabajar es a menudo aplicada a las tortas llenas utilizadas para los pequeños objetivos, pero da resultados muy inciertos con un espejo un poco grande. Es muy difícil gobernar la perturbación producida y suspenderla instantáneamente cuando el defecto está bastante suavizado ; por lo tanto, la integridad de un buena torta no debe sacrificarse a la ligera. No obstante, para tratar un borde rebajado con el recorte de las esquinas de los cuadrados marginales (G. W. Ritchey) está reconocido como eficaz y las herramientas con cuadrados en forma de huso (Ellison), son útiles para parabolizar.

¹ He aquí un método divertido para desconcertar a un confiado "determinista", es decir, al operador que cree poder predecir siempre el efecto producido por una acción determinada.

5. Desgaste por medio de tortas de retoque. Este procedimiento aplicado desde 1857 por **León Foucault** es evidentemente, el más seguro para el espíritu determinista. Por lo tanto será útil advertir a los principiantes dispuestos a atribuirle a priori todas las virtudes¹. La torta de retoque generalmente está construida por una herramienta de madera de un veintena de milímetros de espesor, cuadrada, rectangular o circular según el caso a tratar, con un ancho de 10 a 100 mm. Está provista de cuadrados de brea como una herramienta grande, pero para evitar las rayas es necesario encerar los cuadrados o mejor interponer un tafetán de seda (A. Couder), fijado al dorso con chinches y sin ningún doblez del lado útil, que permite también una acción más enérgica y más segura aunque con aumento de la luz difractada por las micro ondulaciones.

Para obtener buenos resultados es preciso no atacar con una torta de retoque un defecto grande ; este debe ser menor que $\frac{1}{4}$ de onda, estimado por la curvatura de las franjas de sombra. Unas marcas de tinta hechas en el momento del control indicarán el punto más alto de la zona, al borde de la sombra (no hay que cavar una zanja al lado de una colina). Debe ponerse el rojo en capa más espesa que para el trabajo normal. Cuando el efecto es poco extenso (figura 41-11) el dedo pulgar, o aun el índice (borde rebajado fino) pueden constituir, bien embadurnados de rojo, buenos pulidores de retoque. La presión a ejercer puede ser bastante grande, fácilmente del orden de 500 gr sobre una torta de una decena de centímetros cuadrados y las carreras, si bien estadísticamente distribuidas sobre el punto sobresaliente, suficientemente variadas y amplias para obtener un empalme suave. El tiempo de trabajo será contado en vueltas completas realizadas en torno del vidrio con la torta de retoque manejada con pequeñas carreras rápidas. Una sola vuelta de un minuto puede bastar en el caso de un débil defecto zonal ; éste es el caso más apropiado para la aplicación de esta técnica maravillosa que es necesario emplear del modo más moderado posible.

La destreza en este procedimiento no puede aprenderse sino por la experiencia ; un volumen de explicaciones no haría aquí sino embrollar a los temerosos. Es preferible no aconsejar el método a aquellos que no se sientan bastante seguros de sí mismos. Efectivamente, en el caso de un gran defecto de pendiente suave, un trabajo torpe puede trasformarlo en un relieve mucho más accidentado y perjudicial. Dada la pequeñez de los defectos retocables en buenas condiciones con tortas de retoques, el método no podría interesar sino al meticoloso que desea exceder largamente la aproximación del vigésimo de onda y está dispuesto a correr un riesgo.

La parabolización

Esta famosa parabolización no es más que un caso particularmente simple de régimen alterado, que no ofrece ninguna dificultad en el caso de un pequeño espejo no muy abierto.

¹ No hay que olvidar que **Foucault** pulía con papel, técnica que no se presta para la aplicación de otros procedimientos mejores.

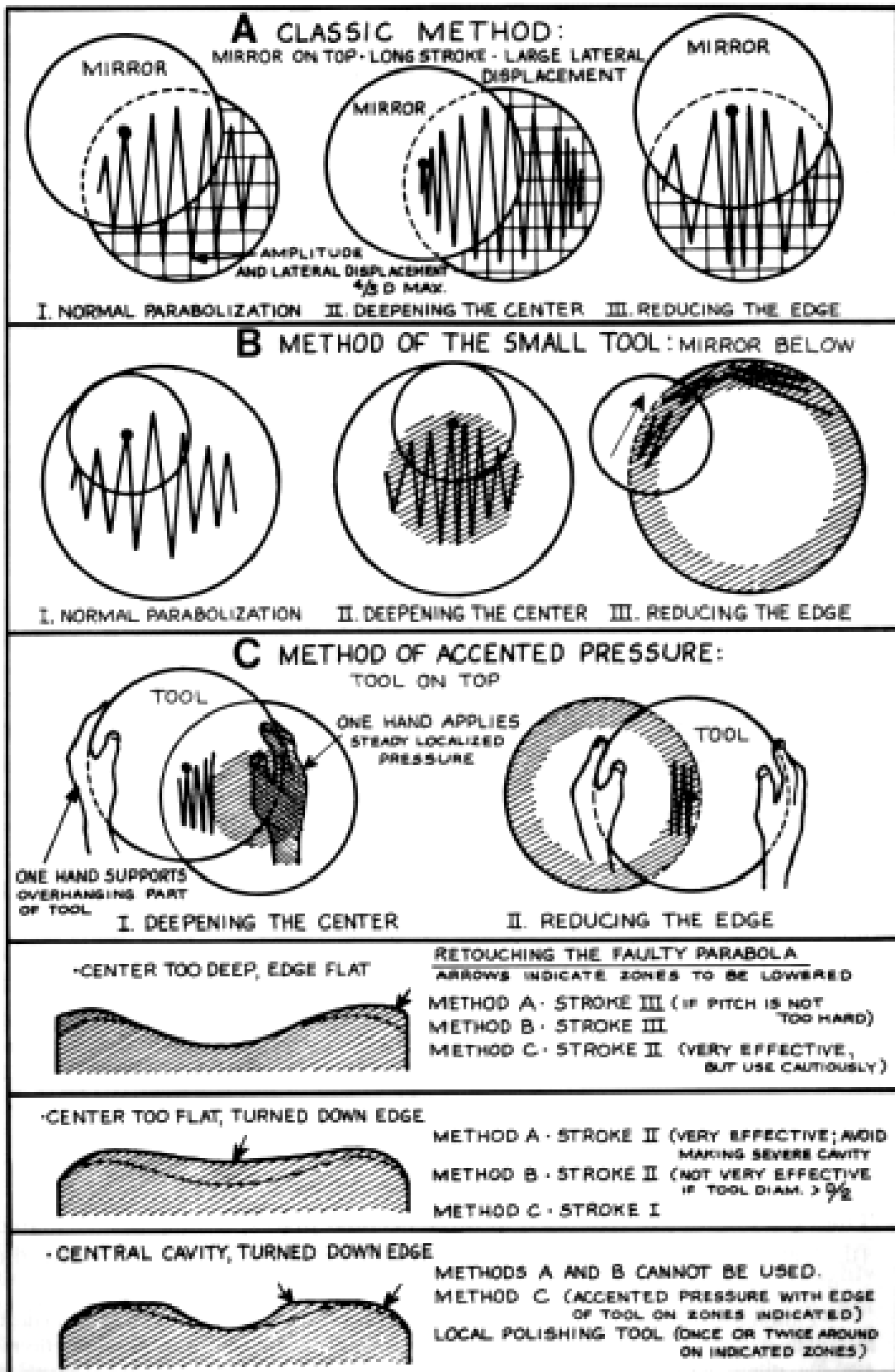


Fig 42. Métodos de parabolización

A) Método clásico (figura 42A). Basta trabajar con el espejo arriba con carreras de

amplitudes más grandes pudiendo alcanzar $4/5 D$. Es recomendable recortar los ángulos de los cuadrados marginales, pero es menester no confiar demasiado en ello para evitar el borde rebajado, cuando la brea es blanda. Si la abertura del espejo alcanza a $f/D = 6$ podrá disminuirse progresivamente hacia el borde la superficie de los cuadrados cuyas filas tendrán la forma de husos (Ellison). La herramienta deberá ser cuidadosamente prensada sobre el espejo, no muy frío, pues desgraciadamente no es posible contar con la igualdad térmica de un trabajo prolongado. Una primera intervención sobre un espejo de 20 cm a $f/D = 8$ podrá durar de 8 a 10 minutos ; esta duración del trabajo convendrá también para un espejo a $f/D = 6$ puesto que es preferible no intentar parabolizarlo de una sola vez. Debe ponerse una capa de rojo y agua más espesa que para un trabajo normal y evitar las mojadas irregulares. Cuando puede conseguirse un buen operador promedio, será posible obtener de primera intención parábolas no muy deformadas con una alta precisión ; en este caso las carreras no deben ser muy alargadas ; $2/3 D$ como máximo, pero el trabajo debe durar aproximadamente una hora con cambio de operador cada 10 minutos ; de esta manera hemos podido parabolizar espejos automáticamente en el taller de la *Commission* gracias a 4 ó 5 operadores que se relevaban haciendo las “mismas” carreras.

B) Método de la herramienta pequeña (figura 42B). Con un espejo un poco grande y no muy abierto, puede dar buenos resultados el empleo de una torta de la mitad del diámetro del espejo. El método es especialmente interesante para perfeccionar una forma obtenida con una herramienta grande ; si la duración del trabajo de la herramienta pequeña debe prolongarse mucho, existirá el peligro de que se produzcan ondulaciones y rayas.

C) Método de sobrepresiones (figura 42C). Hemos empleado este procedimiento tallando un espejo de 26 cm a $f/D = 4$ para el cual el primer método no permitía exceder con seguridad una elipse la mitad menos deformada que la parábola : se excava la parte central con sobrepresiones sobre el borde interior de la herramienta, estando el espejo abajo. El borde del espejo se rebaja con la herramienta en posición muy excéntrica. Del mismo modo, toda zona saliente de una parábola imperfecta puede tratarse por sobrepresiones sobre el borde interior de la herramienta pasando estadísticamente sobre esta zona ; desde luego, deben variarse suficientemente las amplitudes para evitar un estrago local y empalmar el punto atacado. La presión ejercida debe ser regular sobre todo el contorno de la zona y se trabaja bien entendido, por vueltas completas. Es necesario cierto hábito para lograrlo exactamente, pero se evita el uso de una torta más pequeña.

Retoque de parábolas imperfectas

Es menester cierta práctica de las sombras para interpretar las anomalías con relación a los sólidos diferenciales dibujados en la figura 37. Si la forma de conjunto parece casi lograda, lo que se juzga sobre todo gracias al aspecto medio (figura 37B), se hará una medida de aberración longitudinal sin diafragma para saber si hay que continuar el trabajo de la misma manera o por el contrario volver hacia la esfera como se ha visto anteriormente. Entretanto, independientemente de la corrección de conjunto, cuenta la exactitud de la forma ; damos en la parte inferior de la figura 42, tres ejemplos de retoques de formas defectuosas tomadas entre las más frecuentes.

Capítulo 2: Realización del espejo principal (parte C)
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

Trataremos de corregir una forma exacta¹; es más seguro, especialmente para el principiante, hacer al menos sumariamente, un par de medidas sobre cada zona con el diafragma Couder. Para no hacer un cálculo completo para cada retoque, acostumbramos operar en la forma expeditiva siguiente, que es suficiente para terminar un espejo estándar :

Se han encontrado por ejemplo, las medidas siguientes sobre las zonas 1, 2, 3, 4 respectivamente :

Valores hallados	28,03	29,64	31,15	31,81
$\frac{h_m^2}{R}$ teóricos	0,14	1,08	2,28	3,46

La segunda línea está copiada del diafragma de la figura 38. Para fijar ideas tomaremos una aberración cero para la zona 3, en la cual se obtienen las mejores medidas ; es necesario entonces restar de todas las cantidades la constante 28,87 obtenida de restar 31,15 menos 2,28 ; resultando :

-0,84 0,77 2,28 2,94

Restémosle los valores teóricos a estas cantidades :

-0,98 -0,31 0,00 -0,52

Vemos que todas nuestras medidas, excepto aquella realizada sobre la zona 3 tomada como cero, presentan desviaciones negativas ; por lo tanto es especialmente la zona 3 la defectuosa ; para repartir mejor las desviaciones, agreguemos otra constante y obtendremos así una segunda aproximación. Sumémosle 0,4 a la tercera línea ; resultará entonces :

-0,44 1,17 2,68 3,34

Restémosle los valores teóricos a estas cantidades :

-0,58 0,09 0,40 -0,12

Para retocar el espejo, basta un croquis cualitativo de semimeridiano. Se lo traza a pulso y no a escala sobre el cuaderno de retoques (figura 43) haciendo el sencillo razonamiento siguiente : las abcisas (horizontales) representan las alturas de las zonas ; 4 paralelas a las ordenadas (verticales), representan esquemáticamente los límites de las cuatro ventanas ; las ordenadas darán la importancia del relieve. Vemos que nuestra zona 1, tiene un radio de curvatura más corto en 0,58 con respecto a la superficie de

¹ Ellison lanzó la moda de los espejos parcialmente parabolizados (por ejemplo, 90% de h^2/R) para tomar en cuenta un eventual efecto térmico que no podría sino excepcionalmente compensar este defecto voluntario permanente ; en todo caso, es muy cómodo para justificar las torpezas, que tienen entonces el aspecto de haber sido realizadas intencionalmente.

referencia elegida. Esto quiere decir que la zona 1 está muy excavada y que el semilado derecho que hemos bosquejado sube ; para la zona 2 la desviación positiva es de sólo 0,09 y nuestra zona trazada es prácticamente casi paralela al eje de las abcisas, bajando un poco ; para la zona 3 el residuo es fuertemente positivo : 0,40 y nuestra superficie de onda descende sensiblemente ; por último, en la zona 4, tenemos un residuo de -0,12 y la curva nuevamente sube un poco.

PRECEDING RESULT	TREATMENT																									
	<p>Mirror on top. Extra action during lateral overhang. Duration: 4 min.</p>																									
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Readings</td> <td>1.103</td> <td>1.163</td> <td>1.227</td> <td>1.253</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>1.137</td> <td>.034</td> <td>.026</td> <td>.090</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>.015</td> <td>-.019</td> <td>.041</td> <td>-.105</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>.133</td> </tr> </table>		1	2	3	4	Readings	1.103	1.163	1.227	1.253	-	1.137	.034	.026	.090	+	.015	-.019	.041	-.105					.133	<p>Tool on top; localized pressure on zone 2. two turns around.</p>
	1	2	3	4																						
Readings	1.103	1.163	1.227	1.253																						
-	1.137	.034	.026	.090																						
+	.015	-.019	.041	-.105																						
				.133																						

Fig 43. Fragmento de un cuaderno de retoques

La línea quebrada obtenida, esquematiza cualitativamente la forma del semidiámetro derecho del espejo con relación a una línea horizontal que representa la superficie parabólica de referencia. Se ve inmediatamente (figura 42) que existe una zona alta que corregiremos actuando principalmente sobre la zona 2, con sobrepresiones del borde de la herramienta, por ejemplo. Cuando las desviaciones longitudinales no sean más que de 1 ó 2 décimos de milímetro habrá llegado el momento de hacer medidas cuidadosas y un cálculo completo.

Reducción de las aberraciones al plano focal

Para saber si el espejo es bueno, debemos valorar sus aberraciones en el plano focal y

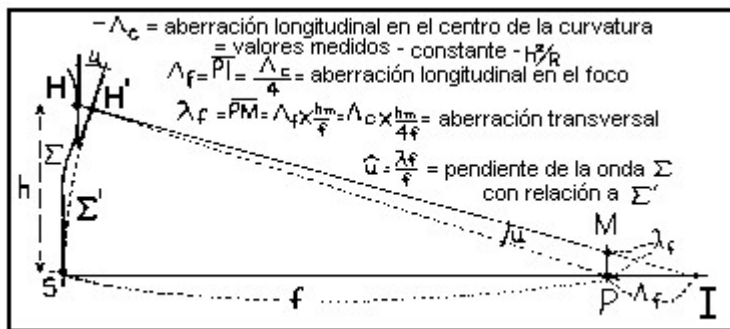


Fig 44. Relaciones entre las aberraciones

determinar la onda emergente cuando recibe una fuente luminosa muy alejada. Los residuos que nos quedan entre los enfoques longitudinales hallados experimentalmente después de rebajarlos en cierta constante bien elegida, y la aberración teórica h_m^2/R de una

parábola perfecta, son los defectos propios del espejo y miden su aberración longitudinal en el centro de curvatura : Λ_C ¹.

Las aberraciones longitudinales correspondientes Λ_f que el espejo presentará en el foco, serán cuatro veces más pequeñas. En la figura 44 se ve el rayo real HMI emerger del punto H y cortar el eje a una distancia longitudinal del rayo ideal H'P igual a PI, que es justamente esta aberración longitudinal Λ_f .

El segmento PM es la aberración transversal correspondiente, llamada λ_f . Como en la realidad PI y especialmente HH' son insignificantes frente a la longitud focal f , se obtendrán las λ_f con todo el rigorismo útil (aquí no hacemos matemáticas sino un espejo) multiplicando los residuos longitudinales en el centro Λ_C por las alturas de incidencia h_m y dividiendo los resultados por $4f$. En resumen, $\Lambda_C h_m / 4f$.

La tangente en el punto H de la onda real Σ hace con la tangente en el punto H' de la onda ideal Σ' , el mismo ángulo u que los rayos emergentes correspondientes HM y H'P ; este ángulo u que mide la pendiente de la onda Σ en el punto H, se obtiene evidentemente (siempre con la aproximación necesaria) dividiendo la aberración transversal λ_f por la longitud focal f . Uniendo extremo con extremo, estas pendientes nos dibujarán esquemáticamente el perfil de la superficie de onda y podremos valorar sus defectos. Para hacer todo esto basta conocer las cuatro operaciones elementales.

¹ Recordamos que tomamos las notaciones principales de *Lunettes et télescopes* e invitamos a los lectores que tienen un mínimo de conocimientos matemáticos a seguir sobre el original (numeral 115), el principio del método.