

## **TEMA VI**

# **FABRICACIÓN DE ELEMENTOS ÓPTICOS**

## **PROGRAMA**

### 1. FABRICACIÓN DE SUPERFICIES ÓPTICAS

- 1.1.- Bloqueado
- 1.2.- Desbaste y pretallado
- 1.3.- Afinado
- 1.4.- Pulido
- 1.5.- Desbloqueo
- 1.6.- Limpieza
- 1.7.- Control de la superficie

### 2. FABRICACIÓN DE ESPEJOS

- 2.1.- Superficies esféricas
- 2.2.- Procedimientos físicos

### 3. SUPERFICIES OPTICAS DE GRAN TAMAÑO

- 3.1.- Superficies esféricas
- 3.2.- Técnicas de pulido para espejos astronómicos
- 3.3.- Aluminización de espejos astronómicos

### 4. ALGUNOS DATOS SOBRE LOS ESPEJOS DE LOS GRANDES TELESCOPIOS

- 4.1.- El telescopio de Monte Palomar
- 4.2.- El telescopio Isaac Newton
- 4.3.- El telescopio Anglo – Australiano

## **1- FABRICACIÓN DE SUPERFICIES ÓPTICAS**

En la fabricación de elementos ópticos el punto de partida son los bloques de vidrio de calidad óptica. Si se trata de un elemento con varias superficies (prismas, lentes) éstas se van realizando individualmente. Las operaciones principales para la realización de una superficie óptica son las siguientes:

- Bloqueado
- Desbaste y Pretallado      Tallado
- Afinado
- Pulido
- Desbloqueado
- Limpieza
- Control de la superficie

### **1.1.- Bloqueado**

Para la fabricación de las superficies es necesario fijar el bloque de vidrio sobre un soporte que servirá de enlace con la maquinaria correspondiente.

Estos soportes llamados comúnmente “tacos” son en su mayoría bloques de hierro redondos que poseen en la parte central una pequeña porción de acero. El tamaño de los tacos debe guardar relación con los bloques de vidrio que se van a trabajar y son planos, cóncavos o convexos según que las superficies a las que se van a adherir sean planas, convexas o cóncavas. Si la superficie que se va a trabajar es tórica poseen además de la forma conveniente, tres puntos o perforaciones que sirven para marcar el eje de la superficie.

La adhesión del bloque de vidrio al taco es el bloqueado y para llevarla a cabo actualmente se utilizan aleaciones de bajo punto de fusión que, a temperatura ambiente solidifican y, a temperaturas generalmente superiores a 80°C funden, con lo que el desbloqueado es muy sencillo.

Sin embargo, hasta hace relativamente poco tiempo, se han utilizado diferentes tipos de cemento para el bloqueado, el más común es una mezcla compuesta por:

- |                           |         |
|---------------------------|---------|
| - Resina o colofonia      | 800 gr. |
| - Pez o alquitrán mineral | 170 gr. |
| - Aceite mineral          | 30 gr.  |

Se puede incorporar a la masa un pequeño porcentaje de cera de abejas. Este cemento, conocido por “pez de pegar” se prepara de la siguiente manera:

Se funde la resina en un recipiente de hierro y, cuando ésta fluye, se le agrega el alquitrán. Después, se adiciona el aceite y la cera teniendo la precaución de no elevar mucho la temperatura para evitar que el material se inflame.

Una vez hecha la preparación, se deja enfriar hasta que comienza a espesar y se vierte en moldes de cartón o madera que permiten obtener panes de cemento. Para realizar la operación de bloqueado basta ablandar el cemento por calor e ir depositándolo sobre el vidrio. Para el desbloqueado, dado que su coeficiente de

dilatación es diferente del del vidrio, al enfriarse rápidamente, el cemento se resquebraja y el vidrio se separa fácilmente.

### **1.2.- Desbaste y pretallado**

Como desbaste se entiende el tratamiento del vidrio óptico con esmeril grosero. En este paso del proceso de fabricación, se trata de frotar energicamente la superficie con abrasivos de grano grueso que van a llevar a la superficie a sus cotas prácticamente definitivas.

La mayor parte de las veces se trabaja con agentes amorfos que se deslían en agua formando una pasta. Los granos de esta pasta presentan aristas agudas que penetran en la superficie con un microscopio, se reconocen pequeños cráteres que se llaman poros de tallado. Como es lógico los granos más gruesos originan poros más profundos que los granos más finos. En un vidrio crown usual, la relación entre la profundidad de los poros y el tamaño de grano, en micras, es la siguiente:

Tamaño grano			Profundidad poro		
150	a	300	15	a	35
30	a	60	6	a	15
9	a	30	4	a	9
1	a	10	2	a	6

Esta tabla muestra que los granos de pequeño tamaño son más eficaces relativamente que los grandes pues, los granos gruesos originan poros con una profundidad del orden del 10% de su tamaño, mientras que los finos llegan a producir poros de la mitad de su tamaño. Esto es atribuible a que el trabajo es efectuado principalmente por las aristas de los granos, es decir, que la forma de los granos casi es más decisiva que su tamaño. Otros factores que influyen sobre la profundidad de los poros son la dureza, tanto del agente como del vidrio a tratar, y la presión a que son sometidos los granos.

*Los principales agentes de tallado son:*

- Arena, constituida por arena de cuarzo de bordes agudos. Actualmente se utiliza raras veces ya que su efecto es pequeño.

- Esmeril. Su constituyente principal es el Oxido de Aluminio perteneciente a la familia de los corindones. Según su pureza se clasifican en:

Esmeril	65%	de	$Al_2O_3$
Corindón	90%	de	$Al_2O_3$
Corindón noble	97%	de	$Al_2O_3$

Se obtienen por la trituración de los minerales procediendo después a la clasificación por tamaño de grano.

- Carborundum. Es un abrasivo artificial que se obtiene combinando, a gran temperatura en hornos especiales, el carbón y la arena de cuarzo. El producto obtenido es de color grisáceo con reflejos metálicos. Se utiliza en forma de discos y con diferentes tamaños de grano.

- Aloxite. Es de origen artificial. Se obtiene calcinando la bauxita u otro mineral rico en aluminio con lo que se obtiene un óxido de color rojizo que se utiliza sobre todo en la fabricación de piezas de biselar.

- Discos de diamante. El mejor agente de tallado es el diamante ya que es el material más duro. Su composición, como es conocido, es carbono puro cristalizado y se utiliza en forma de agrupaciones de pequeños cristales que se preparan de acuerdo a los tamaños de grano usuales.

Contrariamente a otros agentes, el diamante no se emplea en forma de polvo suelto, sino que se dispone en hojas de sierra y discos cuya acción necesita la ayuda de un líquido refrigerante. Antiguamente se rayaban las superficies de las herramientas y se incrustaba el diamante en las hendiduras pero, actualmente, el diamante se inserta en capas metálicas donde perdura el tamaño del grano de tal forma que se pueden obtener discos para el desbaste ( $150\ \mu m$ ) o para el afinado ( $70\ \mu m$ ). Como metal soporte se utiliza acero o bronce siendo éste último indispensable para el trabajo de las partes delicadas.

Las operaciones de desbaste y pretallado requieren evidentemente tamaños de grano distinto. Así, para el desbaste se utilizan agentes cuyo tamaño de grano es del orden de 100 a 250  $\mu m$  (también llamados de 1 minuto). En el pretallado se mejora la bondad superficial de las piezas con abrasivos de grano medio, siendo usuales los de tamaño de grano de 80 a 50  $\mu m$ .

Estas operaciones se pueden realizar a mano con el uso de tornos que giran a gran velocidad, dependiendo del tamaño de la pieza a realizar.

En el desbaste debe obtenerse un arranque grande de material por lo que se imponen altas presiones de trabajo; en el pretallado se requiere un mayor alisamiento de la superficie y que su curvatura sea exacta, por lo que se apoya el bloque de vidrio suavemente.

Para finalizar con este punto, se puede decir que ambas operaciones son frecuentemente sustituidas por el tallado con útiles de diamante. Las máquinas, generalmente sofisticadas, constan de una muela de diamante que gira a gran velocidad (siempre en función del tamaño del grano del diamante, las dimensiones de la pieza y la dureza del vidrio) y que en pocos segundos realiza el movimiento conveniente para dar a la superficie la forma requerida. En general, estos “generadores de curvas” están comandados por un microprocesador al cual se le han introducido previamente los datos de la superficie en cuestión.

### **1.3.- Afinado**

El afinado es el último proceso de trabajo antes del pulido. En él se hacen desaparecer los poros del pretallado y la curvatura superficial adopta su exacta medida. En la mayor parte de los casos, se efectúa primeramente con un abrasivo de 30  $\mu m$  (30 minutos), se procede en etapas sucesivas con abrasivos cada vez más finos

lavándose en cada caso el molde y el bloque de vidrio para eliminar todos los granos del abrasivo precedente.

Es un proceso de desgaste.

#### **1.4.- Pulido**

El pulido es el proceso mediante el cual se hacen transparentes las superficies del vidrio ya que, incluso después del afinado, son sólo translúcidas. Además reciben en él su curvatura definitiva. Se acepta que el pulido es un proceso de desplazamiento, en el que el vidrio pasa de las elevaciones de las superficies ásperas hacia las cavidades de los poros, y los llena.

El pulido ha sido caracterizado desde hace mucho tiempo como un proceso químico. Según esta teoría, mediante el rozamiento del agente de pulir, la capa superficial del vidrio se disolvería, por transformación química, en el agua aportada formando la llamada agua de vidrio. En esta línea, se han estudiado agentes adicionales de pulir que deberían acelerar ese proceso químico, como por ejemplo las sales de ácido fluorhídrico. Esto no ha conducido a resultados convincentes, si bien se ha demostrado que los procesos químicos juegan un papel secundario, y a este respecto es interesante destacar que todos los agentes de pulir son óxidos.

De todas formas, la característica principal del pulido es el engarce de los agentes de pulir sobre un soporte lo cual determina una acción de fricción, en oposición a los agentes de tallar que trabajan por rodamiento. Esto hace del pulido un proceso puramente mecánico, lo que coincide con toda una serie de hechos observados desde hace mucho tiempo. Así por ejemplo, se sabe que los agentes de pulir bastos pulen más rápidamente que los finos, lo que permite concluir una actividad mecánica. También ha sido posible observar en el pulido, una disminución de espesor y de peso de las piezas, disminución que se acusa más avanzada, al tratar nuevamente una superficie ya pulida.

En conclusión, se puede decir que, a pesar de las numerosas teorías del proceso de pulido, éste queda sin explicar completamente, particularmente la pérdida de material durante el mismo, y que cada una de las teorías abarca tan sólo una faceta del proceso total.

#### *Agentes de pulir y soportes para los mismos.*

Durante mucho tiempo, se empleó como agente de pulido el llamado “rojo de pulir” que no es más que un óxido de hierro,  $Fe_2O_3$ , que existe en diferentes calidades y tamaños de grano. Desde hace algunos años, se utilizan los óxidos de tierras raras (Cerio, Torio, Zirconio...) como eficaces agentes de pulir. Estos agentes pulen mucho más rápidamente y han desplazado al rojo de pulir.

En la operación de pulido, es necesario que los granos del agente de pulido permanezcan sin girar para lo cual es necesario que estén situados en un soporte. En el pulido del vidrio se emplean como soportes sustancias blandas, especialmente paños, fieltros, y pez.

Como paños, son adecuados los tejidos compactos (como los de un traje de caballero; en el caso de que el paño tenga una cara lisa y otra vellosa, se adopta la primera como cara de pulir. El fieltro ha de ser compacto y espeso, ya que los fieltros blandos producen bordes muy curvados y se consumen rápidamente. Los tipos más usuales de pez consisten en mezclas de pez blanda y colofonia o en mezclas de pez

blanda y dura. También se utilizan mezclas con una parte de cera de abejas y de 15 a 20 de colofonia.

El pulido es un proceso relativamente sencillo en Óptica de poca precisión pues no resulta muy difícil conseguir que las irregularidades de la superficie sean del orden de la longitud de onda. Sin embargo, en el pulido de elementos de precisión, las dificultades aumentan y, en este caso, se requiere una gran experiencia para efectuar la operación en la forma adecuada y conseguir superficies pulidas que puedan responder a un control interferométrico.

### **1. 5.- Desbloqueado**

El despegado o desbloqueado del bloque de vidrio del taco se realiza, como ya hemos visto, aprovechando bien el bajo punto de fusión de la alineación empleada, bien las diferencias del coeficiente de dilatación con la temperatura.

### **1. 6.- Limpieza**

Las piezas de vidrio se deben limpiar en los diversos procesos de su fabricación. El lavado es relativamente sencillo y, por ello, esta operación se efectúa muchas veces con elementos auxiliares.

Si se trata de un número pequeño de piezas, en la limpieza final, éstas se disponen en un recipiente con cubierta, revestido de papel en el que se vierte alcohol hasta que estén cubiertas. Los recipientes permanecen cerrados de 3 a 5 horas hasta la disolución de las sustancias adheridas. Luego, se secan con un trapo blando, cuidando de que el agente de pulido que pueda quedar en los bordes se desprenda sin lesionar las superficies pulidas. A continuación, se frota una vez más con un pañuelo de lino limpio sobre el que se vierten unas gotas de alcohol.

En los talleres grandes, este proceso se hace de forma industrial utilizando grandes tanques con disolventes.

### **1. 7.- Control de la superficie**

En función de la precisión que se desee obtener, las piezas son sometidas a diferentes controles de fabricación. Las operaciones fundamentales de control son:

- a) Examen de los defectos del bloque de vidrio.
- b) Examen de los defectos de fabricación.
- c) Examen de los defectos de potencia.

Defectos del bloque de vidrio. Son aquellos que provienen de la fabricación del vidrio. Aparecen en bloques insuficientemente revisados y son, generalmente, pequeñas burbujas o estrías casi imperceptibles

Defectos de fabricación. Estos defectos aparecen generalmente por un reparto desigual en la presión de trabajo o por la contaminación de abrasivos de mayor tamaño que provocan rayas y puntos. También aparecen por la inexacta ejecución del pulido.

Defectos de potencia. Un defecto en la curvatura se traduce por una diferencia en la potencia obtenida. Si se trata de lentes, el control se realiza con el

frontofocómetro. Para elementos de mayor precisión se utiliza el método de los aumentos.

Si se desea una gran precisión, hay que utilizar métodos de control interferométricos y no sólo con la superficie acabada, sino en curso de su ejecución.

A continuación, se expone un método sencillo de verificación de superficies por interferencias en el taller. Este tipo de métodos son necesarios cuando se requiere una precisión mayor que la centésima de milímetro, que es la mayor precisión dada, generalmente, por los medios mecánicos. Además, para poder juzgar es necesario haber pasado una primera fase de pulido, puesto que el afinado no da más que una aproximación de la superficie deseada.

El principio en el que se basa este método de control es el siguiente (Fig.1).

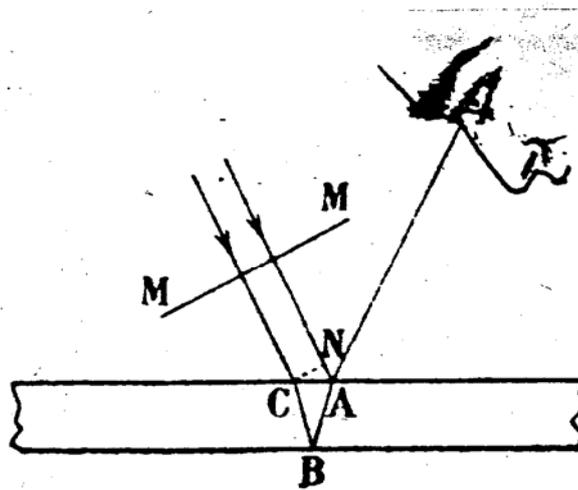


Fig.1.- Interferencias en una lámina planoparalela.

Cuando se mira un punto A de una superficie reflejante, el ojo recibe dos rayos superpuestos, uno reflejado por la cara superior y otro por la cara inferior. Estos dos rayos, pertenecientes a la misma onda, en un instante dado estaban en la posición MM en concordancia de fase. Pero, desde ese momento, debido a las distintas reflexiones que sufren ambos, recorren caminos diferentes y, si uno recorre un camino más largo que el otro un número impar de semilongitudes de onda, se observará una interferencia destructiva.

La diferencia de camino varía, evidentemente, con la incidencia de los rayos. La norma es mirar bajo una incidencia normal (perpendicular a la lámina) porque, en ese caso, la diferencia de marcha es dos veces el espesor de la lámina. Para mirar en incidencia normal es suficiente iluminar el vidrio y un calibre con la curvatura deseada con ayuda de un cartón blanco inclinado  $45^\circ$  y provisto de un agujero pequeño según se muestra en la Figura 2.

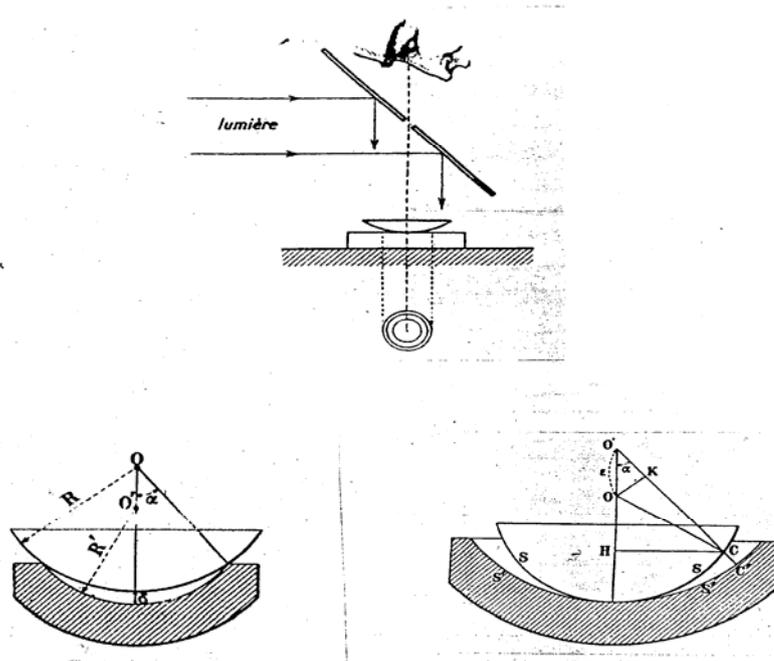


Fig. 2.- Método de verificación de la superficie.

Así, cuando se pone sobre una lámina plana una lente ligeramente convexa, entre la cara plana y la lente, se crea una lámina de aire cóncava que produce interferencias, visualizadas alrededor del punto de contacto por un cierto número variable de anillos. Si, por ejemplo, mirando normalmente, se cuentan diez anillos, esto significa que la flecha de la curvatura es igual a 10 veces la semilongitud de onda de iluminación.

Si se utiliza luz blanca, aparecen los anillos de diferentes colores ya que hay un sistema de anillos para cada color; los anillos rojos no tienen el mismo diámetro que los amarillos o azules, de tal manera que, a partir de un momento dado, los anillos se solapan y las interferencias no son visibles. Para poder sacar conclusiones, es necesario utilizar una luz monocromática; una lámpara espectral o un láser son excelentes para hacer visibles las franjas que aparecen incluso sin que los vidrios estén en contacto, lo que disminuye el peligro de rayarlos.

La interpretación de las franjas exige experiencia ya que, generalmente, no se sabe a primera vista en qué sentido varía el espesor; pero se puede saber inmediatamente ejerciendo una pequeña presión en la pieza a verificar. Si los anillos se juntan bajo la presión y desaparecen en el centro, es que el vidrio toca por sus bordes el calibre; si es convexo, es menos curvo que el calibre, si es cóncavo, es más curvo que el calibre. Si los anillos se separan sucede lo contrario. Si se trata de una comparación entre vidrios planos, las franjas son rectilíneas en lugar de anillos. Cuanto más espaciadas estén las franjas, mejor se pueden apreciar las sinuosidades de las mismas causadas por los defectos locales. Cuando el intervalo ente dos franjas sobrepasa la dimensión de la pieza a verificar, se obtiene el límite del método y cuando las franjas no



sirve de ánodo y las superficies plateadas queda aplicada una capa de cobre. Como cátodo se utiliza una placa de cobre (Fig.3).

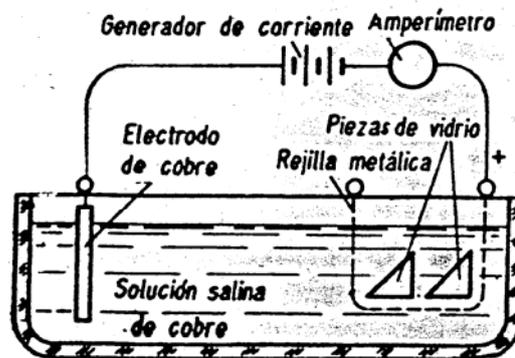


Fig.3.- Depósito de la capa de cobre.

## 2. 2.- Procedimientos físicos.

En estos procesos no se utilizan soluciones o transformaciones químicas algunas, sino que los metales se aplican en dispersión. Estos se preparan, salvo contadas ocasiones, por el mismo procedimiento. Los métodos físicos son adecuados también para otros metales distintos a la plata, cuya preparación en proceso químico es difícil.

El método más común es el de vaporización metálica en vacío. Los vapores metálicos encuentran en el vacío poca resistencia y, por ello, chocan con gran violencia sobre las superficies de vidrio pulidas pasando al estado sólido y constituyendo una capa reflejante. El método de vaporización en vacío se utiliza, sobre todo, para espejos de primera superficie.

El máximo poder reflexivo lo tienen los espejos de plata, con un 98% de coeficiente de reflexión, pero son muy sensibles a la acción ambiental. Los espejos de primera superficie de aluminio son muy indicados debido a la resistencia de la capa. Para la protección de la capa metálica en las aplicaciones en las que no se requiere gran precisión, se vaporiza sobre ella una película de Monóxido de Silicio ( $\text{SiO}$ ) que, al contacto con el aire, se transforma parcialmente en cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), y constituye un revestimiento casi indestructible. Con un espesor de  $\text{SiO}$  de  $0.225 \mu\text{m}$  se obtiene un máximo de reflexión que para el aluminio llega al 88.5%.

## 3.- SUPERFICIES ÓPTICAS DE GRAN TAMAÑO

### 3.1.- Superficies esféricas.

Por superficie esférica entendemos toda superficie con simetría de revolución o sin ella, que no es esférica. Las formas esféricas más simples son los elipsoides, paraboloides e hiperboloides de revolución y la asfericidad se define como la desviación entre la superficie en cuestión y la esfera mejor adaptada a ella.

En instrumentación óptica, este tipo de superficies se utiliza para eliminar algunas aberraciones como por ejemplo la aberración esférica que, en ciertas aplicaciones, como la observación astronómica, son particularmente molestas.

En los espejos, la forma esférica más adecuada es el paraboloide de revolución, ya que con este tipo de superficie, se puede formar la imagen de un objeto lejano sin aberración esférica, aunque para que el coma no aparezca, el objeto debe estar situado en el eje del sistema. Cuando el objeto está próximo, la aberración esférica estará presente si se trata de un espejo parabólico y, para eliminarla, habrá que utilizar como forma de la superficie, un elipsoide de revolución. Vemos pues, que el uso de espejos parabólicos está restringido a objetos lejanos pero, puesto que se elimina la aberración cromática, se usan en los más modernos telescopios astronómicos (Fig.4).

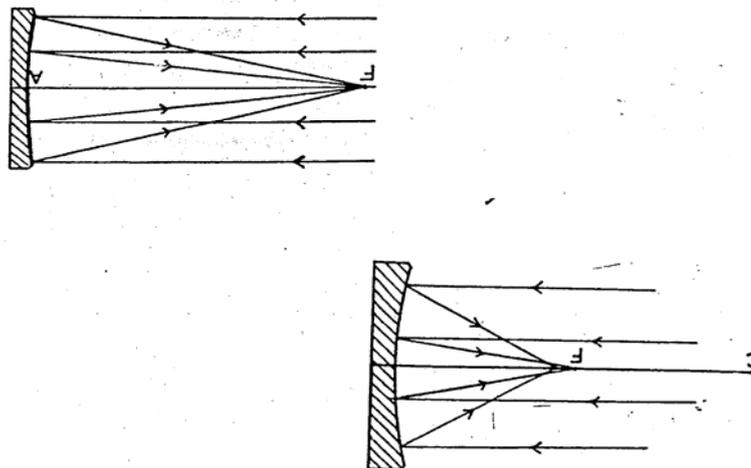


Fig.4.- Formación de imágenes con un espejo esférico y parabólico

### 3. 2.- Técnicas de pulido para espejos astronómicos

Los grandes telescopios astronómicos modernos son estructuras mecánicas de precisión que contienen espejos, los cuales deben ser alineados con un objeto celeste con una precisión mayor que el segundo de arco. Las imágenes de las estrellas que se obtienen en una placa fotográfica, pueden ser menores de  $20\mu\text{m}$  de diámetro y requieren un tiempo de exposición de varias horas. Durante este tiempo, el telescopio tiene que seguir al objeto debido a la rotación de la tierra, para que la imagen en la placa no se mueva más que unas pocas micras.

Hay objetivos de espejo de 380 cm de diámetro y, para obtener la resolución requerida, se pulen con una precisión mayor que  $1/8$  de longitud de onda. En otras palabras, los errores de superficie en el espejo no pueden exceder de  $0.05 \mu\text{m}$ . Los primeros espejos fueron hechos con una aleación de cobre y estaño sobre una placa de vidrio que tenía una buena estabilidad térmica. Los requerimientos de los sistemas ópticos modernos serían imposibles de alcanzar sin el desarrollo de vidrios cerámicos transparentes como el Cerviz (Owens Illinois) y el Zerodur (Schott and Gen, Mainz) que tienen un coeficiente cero de expansión.

El tallado, pulido y acabado de un objetivo de espejo de gran tamaño puede llevar hasta dos años. Se necesita pues mucha paciencia y dedicación.

La corporación Itek ha desarrollado una máquina para el pulido de grandes superficies que pueden ser esféricas, esféricas o asimétricas. En este proceso, la pieza de trabajo permanece estacionaria mientras que la muela de pulir gira con un motor y es dirigida por un ordenador. El diámetro de la muela es usualmente menor que  $1/3$  del diámetro de la superficie óptica.

El ciclo de esta máquina es el siguiente:

- a) Se hace un interferograma de la superficie.
- b) Se hace un barrido del interferograma y el ordenador convierte el resultado de este barrido en una matriz de contorno de superficie de formato hexagonal.
- c) El tamaño de la muela es seleccionado por el ordenador para suprimir los errores de superficie de forma óptima.
- d) El ordenador calcula el número de veces que la muela debe pasar sobre un área para corregir los errores.
- e) El ordenador genera una trayectoria continua para la muela para alcanzar la superficie deseada y escribe las instrucciones en una cinta magnética.
- f) La máquina se mueve según las instrucciones de la cinta magnética.
- g) Se hace otro interferograma para testear la superficie y el ciclo se repite hasta conseguir la calidad de superficie deseada.

### **3. 3.- Aluminización de espejos astronómicos.**

La metalización de este tipo de espejos siempre se hace por vaporización de aluminio en el vacío.

Puesto que los espejos astronómicos deben tener una alta reflectividad, es usual recubrirlos cada 6-12 meses y, por lo tanto, se necesita un equipo de vacío en el observatorio. Antes de recubrir la superficie de un espejo, debe quitarse la capa vieja del aluminio con una solución de potasa cáustica, (hidrato de potasio).

Los espejos primarios pueden pesar 2 toneladas para un diámetro de 190 cm y más de 16 toneladas para un diámetro de 380 cm, por lo que el diseño de la cámara de vacío y su manejo requieren cuidados considerables.

La máquina para depositar la capa de aluminio debe diseñarse para poder cargar el espejo en posición horizontal y girarlo a la posición vertical para el depósito de la capa. Esto es necesario para evitar que partículas de aluminio o de polvo puedan quedar en la superficie del espejo.

La cámara de vacío debe estar dividida de forma que la montura del espejo esté en una sección (la sección de montaje de la suspensión) y los electrodos de descarga, las fuentes de evaporización, etc. Estén en otra sección. Se necesitan un gran número de

fuentes para dar una capa uniforme y una potencia elevada para proporcionar la adecuada corriente para calentar las fuentes. En cada sección de la cámara, deben existir ventanas de inspección.

#### **4.-ALGUNOS DATOS SOBRE LOS ESPEJOS DE LOS GRANDES TELESCOPIOS**

##### **4.1.- El telescopio de Monte Palomar.**

La realización del espejo primario de este telescopio, de 200 pulgadas de diámetro (unos 500 cm), empezó en 1936. El tallado de la superficie esférica con la curvatura deseada (con una profundidad en el centro de 3.75 pulgadas) duró unos tres meses, durante los cuales se utilizaron unas 10 toneladas de abrasivo de grano grueso sobre 5 toneladas de vidrio Pyrex. En esta fase se utilizaron máquinas de tallar, primero de 100 pulgadas de diámetro y luego una de 200 pulgadas para obtener una superficie de revolución.

Después de una cuidadosa limpieza que duró 3.5 meses, se estuvo en condiciones de abordar la fase de pulido. En total, se usaron 31 toneladas de abrasivo y se emplearon 180.000 horas de trabajo en la realización del espejo.

Como pulidora, se utilizó la máquina de 200 pulgadas empleando diferentes tipos de resina y rojo de pulir.

La parabolización del espejo comenzó después de que éste hubiera recibido la fase inicial de pulido. La superficie central debía ser rebajada en 1/200 pulgadas, cantidad relativamente grande y, por ello, el proceso se llevó a cabo alternativamente con tallado y pulido, hasta que se llegó a una fase en la que el acabado final pudo obtenerse solamente con pulido.

En cada paso se hacía un control óptico midiendo las aberraciones para ir corrigiendo la superficie en pasos sucesivos.

Cuando la superficie del espejo estuvo acabada, el bloque fue transportado en su montura como una unidad completa, al observatorio de Monte Palomar, donde se sujetó al tubo del telescopio después de que el espejo fuera aluminizado.

##### **4. 2.- El telescopio Isaac Newton**

Este telescopio, instalado en las Islas Canarias, tenía originalmente un espejo primario de 98.2 pulgadas de diámetro (249.4 cm) hecho a partir de un bloque de vidrio Pyrex. En 1976, este espejo fue reemplazado por otro de 102 pulgadas de diámetro (255 cm) fabricado con un bloque de vidrio Zerodur cerámico policristalino.

La superficie frontal es cóncava con una profundidad de 5 cm en el centro. La superficie del vidrio está pulida según el proceso de Grubb Parsons, con una precisión medida en unidades de longitud de onda.

Para mantenerlo en servicio útil, el espejo debe estar fijo en su montura para que la curvatura del vidrio debida a su propio peso, no cause distorsiones más grandes que las permitidas por los límites del pulido. La necesidad de esta precisión extrema puede apreciarse mejor si consideramos que un haz paralelo debe converger en un 90% dentro de una imagen de 5  $\mu m$  de diámetro.

#### **4. 3.- El telescopio Anglo – Australiano.**

Este telescopio está situado en el observatorio Siding Springs de la Universidad Nacional Australiana a unos 500 km de Canberra.

El espejo primario del telescopio está hecho con vidrio cerámico Cerviz, tiene 155 pulgadas de diámetro (393 cm) y pesa 18 toneladas. Químicamente, el vidrio Cerviz es similar a los Feldespatos, se trata básicamente de  $SiO_2$  con algún átomo de Silicio reemplazado por Aluminio o Litio. Su baja expansión térmica es debida a su estructura microcristalina, lo que hace innecesario un recocido prolongado, de hecho el bloque de vidrio estuvo preparado para el tallado un mes después del vertido.

El espejo está realizado por el método de Grubb Parsons, y está ubicado en un soporte especial para evitar las deformaciones producidas por su propio peso.