

Capítulo 4. Lupas. Oculares. Microscopios

4.1 Lupa

4.1.1 Principio

1. Definición

Una lupa es un instrumento subjetivo, es decir, el ojo observa directamente la imagen que nos proporciona el instrumento. La lupa está formada por una lente convergente destinada a la observación de los detalles en objetos próximos, y nos permite ver aumentadas las dimensiones aparentes de objetos pequeños y próximos.

La lupa se basa en el hecho de que, si colocamos un objeto entre el foco objeto (F) y la lente convergente, obtenemos una imagen derecha, virtual y mayor, que es observada directamente por el ojo.

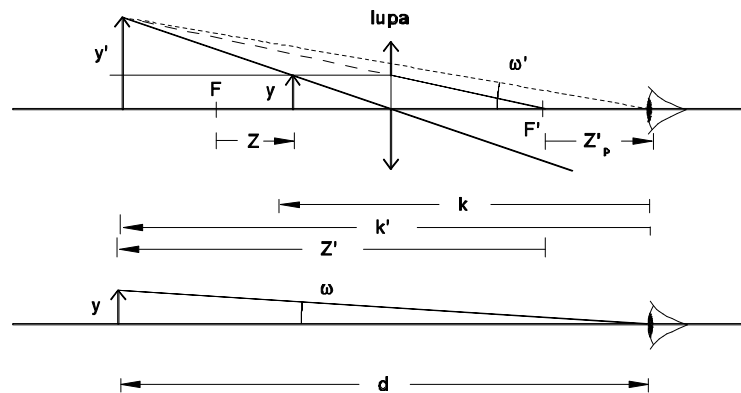


Fig. 4.1

El ángulo que subtende la imagen y' a través de la lupa, (ω') es mayor que el ángulo que subtende el objeto (ω) (Fig. 4.1); por lo tanto, las dimensiones aparentes aumentan.

Si la lupa está especializada en mirar imágenes suministradas por un objetivo, se denomina ocular.

4.1.2 Potencia. Aumento visual. Poder separador

1. Potencia

a) Definición. La potencia es la magnitud que expresa la aptitud de la lupa para hacer ver un objeto de unas determinadas dimensiones bajo un ángulo mayor. Se mide la potencia de la lupa por el número, P , por el que hay que multiplicar la longitud y de un objeto para encontrar el valor de ω' , que es el ángulo que subtende la imagen y' de y , desde el ojo. ω' se expresa en radianes y y en metros. Se tiene, pues,

$$\omega' = P y$$

ω' determina la potencia de la lupa si y es un objeto de longitud la unidad.

Calculemos esta potencia:

$$P = \omega' = \frac{y'}{k'} = \frac{y'}{y} \frac{y}{k'}$$

$$\frac{y'}{y} = m = -\frac{z'}{f'}$$

$$P = -\frac{z'}{f'} \frac{1}{k'} = \frac{k' + z'_p}{f'} \frac{1}{k'} = \frac{1}{f'} + \frac{z'_p}{f' k'} \quad (4.1)$$

Cuando $y = 1$, un objeto de longitud 1 se vería bajo un ángulo $T' = P \cdot 1 = P$.

La potencia de una lupa depende, entonces, de su distancia focal, de la distancia del ojo a la imagen, k' (que depende de la posición del objeto) y de la posición del ojo respecto a la lupa, z'_p .

El primer término de la fórmula $1/f'$ es independiente de la posición del ojo y de su distancia de acomodación; es una magnitud que solo depende de la lupa y se llama potencia intrínseca de la lupa, que coincide con su convergencia en el aire.

El segundo término de la fórmula general se puede anular y así la potencia de la lupa se convierte en su potencia intrínseca. Esto sucede si $z'_p = 0$ o si $k' = \infty$.

Si $z'_p = 0$, el ojo está en el foco imagen de la lupa; la potencia es, por tanto, independiente de la distancia de acomodación. Este es el caso de la lupa del relojero, que es una lente delgada fijada a una montura que se adapta al arco ciliar de forma que el ojo se encuentra en su foco imagen. Los diferentes detalles de un reloj mantienen sus proporciones, aunque para observarlos se tenga que acomodar a distancias diferentes; pero a dimensiones iguales les corresponden iguales ángulos aparentes de visión.

Si $k' = 4$, la imagen está en el infinito y la potencia es independiente de la distancia ojo-lente. Este es el caso cuando se utiliza una lupa para leer. Los rayos de luz procedentes de un punto, situado en el plano focal objeto de la lupa, dan lugar a haces luminosos con rayos paralelos entre sí.

En el caso general $k' \dots 4$, $z'_p \dots 0$, como z'_p es siempre muy pequeño respecto a k' , se puede considerar que la potencia es siempre muy cercana a $1/f'$. Esta es siempre ligeramente inferior o superior a $1/f'$, según que z'_p sea positiva o negativa (ya que k' se considera positivo).

Cuando z'_p es positivo, el ojo está situado después de F' y se aprovecha para acomodar lo más lejos posible.

Cuando z'_p es negativo, el ojo está entre la lupa y la F' , y lo que se aprovecha al máximo es la potencia de la lupa y la ampliación del campo que se obtiene. Pero se gana poco en potencia y la aparición de las aberraciones de campo hace que esta situación no tenga demasiado interés.

2. Aumento visual

a) Definición. Como las imágenes retinianas son proporcionales al ángulo que subtende un objeto (o su imagen a través de un instrumento) desde el punto nodal objeto del ojo, es lógico definir la magnitud denominada visual como

$$M = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{y'/k'}{y/d} = \frac{y'}{k' y} d \quad (4.2)$$

Si el objeto es de dimensiones la unidad, $M = P \cdot d$

b) Aumento comercial. Como M depende de la distancia de observación a ojo desnudo, se suele tomar $d = 250 \text{ mm} = 1/4 \text{ m}$, por lo que,

$$M'_c = \frac{P}{4}$$

El aumento comercial es igual a la cuarta parte de la potencia expresada en dioptrías.

La potencia de las lupas más usuales varía entre 8 y 120 dioptrías y, por tanto, su aumento comercial varía entre 2 y 30. Para que la lupa tenga un aumento comercial mayor que la unidad, la lente debe tener más de 4 dioptrías (una focal inferior a 250 mm).

3. Poder de resolución

Mide la aptitud de un ojo que mira a través de una lupa para distinguir los detalles de un objeto. Si el ángulo $T = y/d$, bajo el cual se ve un objeto y a ojo desnudo, es inferior a $1'$, entonces es necesario utilizar una lupa que permitirá ver este objeto bajo un ángulo $T' = P \cdot y$ y superior a este valor del límite de separación del ojo humano ($1' \approx 3 \cdot 10^{-4}$ rad).

Veamos ahora cual será el límite lineal de resolución del objeto observado:

$$y = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{P} \quad (4.3)$$

que se expresará en metros si P está en dioptrías.

Suponiendo que las aberraciones que presenta la lupa son despreciables, el poder de resolución del ojo que mira a través de una lupa depende solo del ojo y de su propio poder de resolución.

Es aconsejable, para encontrar el límite de resolución de una lupa, utilizar como objeto una mira de Foucault, donde A y B representan puntos análogos en dos trazos consecutivos de la mira, y AB están en una dirección perpendicular a estos trazados.

Ejemplo. Si $P = 30$ dioptrías, el límite lineal de resolución es

$$\frac{3 \cdot 10^{-4}}{30} = 10^{-5} \text{ m}$$

Así, con una lupa de 30 dioptrías se puede distinguir la dirección de las líneas de una mira que tiene 100 líneas por milímetro.

4.1.3 Profundidad de enfoque

1. Existencia y definición

Para que un objeto y sea visto nítidamente a través de una lupa es necesario que su imagen y' esté dentro del intervalo de acomodación del ojo.

Consideremos los puntos A_1 y A_2 conjugados de los puntos remoto R y próximo P , respectivamente. Cuando el objeto y se desplaza de A_1 a A_2 sobre el eje común a la lupa y al ojo, su imagen y' se desplaza en el mismo sentido, sobre el mismo eje, de R a P .

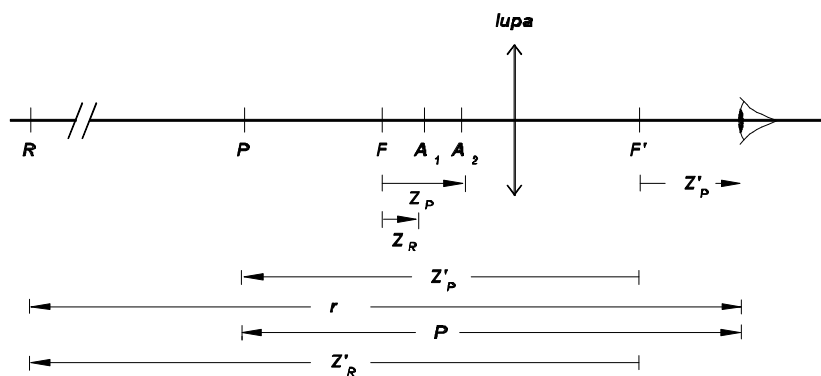


Fig. 4.2

La distancia A_1A_2 es la denominada profundidad de enfoque del ojo utilizando una lupa (Fig. 4.2). Si el ojo es emétrope, A_1 está en F ; si es miope, A_1A_2 están entre F y la lupa (es el caso de la figura 4.2) y si es hipermetrope, A_1 y A_2 están a una y a otra parte de F , o a veces antes de F . Calculemos la profundidad de enfoque; se tiene:

$$z_R z'_R = -f'^2$$

Con

$$z'_R = F'R = -(r + z'_P) = -z'_P - r$$

consecuentemente,

$$z_R = \frac{f'^2}{-z'_p - r}; \quad z_R = - \frac{f'^2}{z'_p + r}$$

De la misma manera,

$$z_P = - \frac{f'^2}{z'_p + p}$$

Entonces,

$$D_e = A_1 A_2 = z_P - z_R = f'^2 \left(\frac{1}{z'_p + p} - \frac{1}{z'_p + r} \right)$$

si el poder de acomodación:

$$A = \frac{1}{p} - \frac{1}{r}$$

y como z_p nunca puede superar algunos milímetros, es despreciable respecto a P y R , entonces

$$D_e = \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{r} \right) f'^2 = A f'^2$$

Para un ojo emétrope $r = 4$, A_1 coincide con F y $D_e = z_p = f'^2 / p$.

Ejemplo. para $f' = 3 \text{ cm}$ y $p = 15 \text{ cm}$, se tiene $D_e = z_p = 9/15 = 0,6 \text{ cm}$.

Para $P = 40 \text{ dpt}$. y $A = 4 \text{ dpt}$. (un observador de 45 años), se tiene:

$$D_e = \frac{A}{P^2} = \frac{4}{40 \cdot 40} = \frac{1}{400} \text{ m} = 2,5 \text{ mm}$$

Se comprende así por qué en las lupas fuertes debe existir un dispositivo que permita regular y mantener constante la distancia objeto-lupa.

La profundidad de campo, definida en general como la distancia axial de la región objeto para la que se obtienen imágenes aceptables, se confunde en el caso de las lupas, los oculares y los microscopios con la profundidad de enfoque (a causa de la acomodación). Esta profundidad de enfoque dará el máximo tamaño de las rugosidades que será admisible para el ojo sin que la visión sea incómoda.

4.1.4 Luminosidad y campo

Normalmente, la lupa tiene un diámetro mayor que la pupila del ojo del observador, por lo que ésta última limita el haz de rayos procedentes del punto del objeto en el eje óptico. El ojo es diafragma de apertura y pupila de salida, y la pupila de entrada es la antiimagen del ojo a través de la lente (Fig. 4.3).

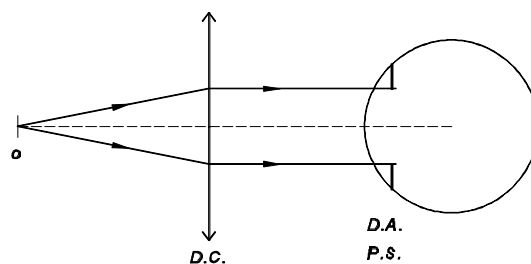


Fig. 4.3

El ojo trabaja a plena apertura, de manera que el haz de luz llena toda su pupila. Por tanto, la lupa es un instrumento muy luminoso.

En la figura 4.4 se determina gráficamente el radio del campo de iluminación plena, de manera que los haces emergentes desde un punto dentro de este campo llenan toda la pupila del ojo. El valor de R_p se podrá calcular geoméricamente en esta figura y depende del valor del diámetro de la lente y de su focal con dependencia directa e inversa respecto a la distancia de la lente al ojo.

Alejándonos del eje óptico mientras nos movemos sobre el objeto, alcanzamos una situación como la de la figura 4.5 en que al ojo le entra la mitad del haz de luz emergente. Se determina así R_m , que es el radio del campo de iluminación media.

El radio del campo límite de iluminación, R_l es el que nos muestra la figura 4.6. Cualquier punto objeto situado fuera del campo límite no puede ser observado sin modificar la posición del ojo, ya sea acercándolo a la lente o bien desalineando los ejes ópticos de la lente y el ojo.

Lo que se considera de ordinario es el campo de iluminación medio R_m , es decir, la parte del plano objeto que se puede ver cuando, como máximo, se reduce a la mitad el haz entrante.

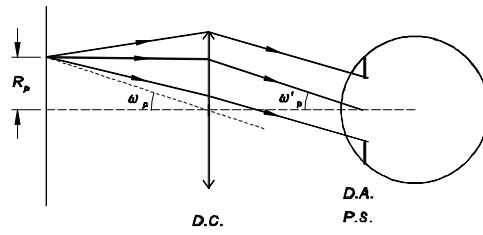


Fig. 4.4

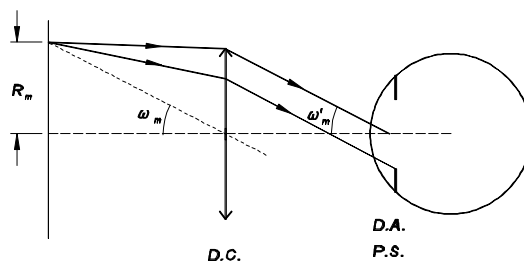


Fig. 4.5

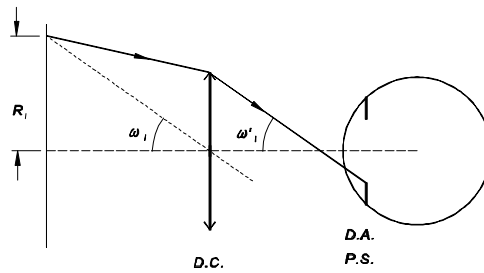


Fig. 4.6

Si la montura de la lupa es circular, el campo de iluminación medio es circular. Su diámetro es el campo de iluminación medio. La parte del plano imagen conjugado del campo medio se verá desde el ojo bajo un ángulo de $2\omega'$, que se llama campo angular aparente. Corresponde al determinado por el diafragma que es visto bajo el ángulo más pequeño desde el ojo, considerándolo situado en el espacio imagen (lucarna de salida).

El campo lineal $d = 2R_m$ corresponde a un campo angular de nitidez $2\omega'$. Para un tipo determinado de lupa es proporcional a la distancia focal. En efecto, de la figura 4.5:

$$\operatorname{tg} \omega'_m = \frac{R_m}{f'} \rightarrow R_m = f' \operatorname{tg} \omega'_m \rightarrow d = 2R_m = 2 f' \operatorname{tg} \omega'_m$$

En lupas de muchos aumentos (de focal corta) puede pasar que la lente sea de dimensiones más pequeñas que el ojo, y por tanto hará de diafragma de apertura, pupila de entrada y pupila de salida a la vez. La luminosidad es más pequeña que en el caso anterior ya que el ojo no trabaja a plena apertura. Este caso no es usual en la práctica, ya que en estos casos se usa el microscopio compuesto, que se estudiará más adelante.

Es fácil ver que si el ojo coincide con F' de la lupa, el campo lineal es igual al diámetro de apertura de la lupa y el campo angular a su apertura relativa.

4.1.5 Tipos de lupas

1. Aberraciones. Campo aparente de nitidez

Parece que sea fácil obtener un gran campo lineal y un gran campo angular aparente. Bastaría con aumentar el diámetro de la lupa. Pero a medida que ω' aumenta, las aberraciones de campo aumentan y llega un momento en que el astigmatismo, la distorsión, la curvatura de campo y la aberración cromática ya no son despreciables. Las aberraciones de apertura no intervienen mientras la razón de apertura se mantenga débil, es decir, mientras la potencia de la lupa no sea demasiado grande. El límite de campo aceptable se llama campo aparente de nitidez.

Las lupas dejan de ser lentes simples para aumentar su campo aparente de nitidez (las lentes simples tienen un campo débil, $2T' = 1/3$). Con una combinación adecuada de lentes se puede llegar a campos de 30° y 40° .

2. Tipos más usuales de lupas

En las lupas de poco aumento, la focal es larga y la apertura pequeña y, por tanto, se corrigen preferentemente las aberraciones de campo: coma, astigmatismo, distorsión y cromática de aumento. Por contra, en las lupas potentes de focal corta, la apertura es fuerte y se deben corregir, además, las aberraciones de esférica y cromática del eje.

Desde el punto de vista constructivo, las lupas son de formas muy variadas; las de poco aumento, hasta

$M = 6$, suelen ser lentes sencillas de gran diámetro, como las de la figura 4.7 (A). Para aumentos mayores se utilizan lupas del tipo de Fraunhofer o de Wilson, que es una variedad acromática del tipo anterior (Fig. 4.7 (B) y 4.7 (C)).

Una semiesfera de vidrio (Fig. 4.7.(D)), en contacto por su cara plana con el objeto, da resultados excelentes como lupa de pocos aumentos; si la lupa tiene la forma de esfera, preferentemente diafragmada en su interior (Fig. 4.7 (E)), es una lupa Coddington.

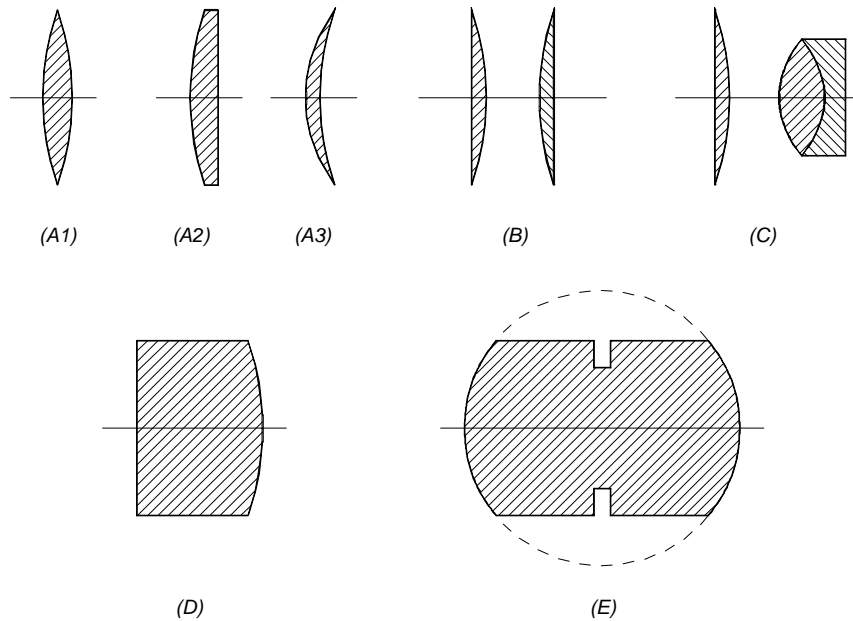


Fig. 4.7

Los espejos cóncavos (espejos de aumento) también se consideran lupas y se colocan, por ejemplo, en los tocadores.

No se suelen construir lupas con aumentos superiores a 15, ya que a partir de este valor la distancia frontal es muy pequeña. La profundidad de enfoque exige un soporte especial y la corrección de aberración es muy difícil. En estos casos lo que se hace es construir microscopios de gran distancia frontal, y se les llama lupas porque tienen el mismo tipo de utilidades.

4.2 Oculares

4.2.1 Generalidades

1. Definición y papel de un instrumento

Un objetivo (por ejemplo, un objetivo fotográfico de gran distancia focal) forma, de un objeto muy alejado, una imagen real muy pequeña situada en su plano focal imagen. Para ver los detalles de esta imagen se puede examinar con una lupa, después de haber sacado la placa o la película. Con otro tipo de objetivo, por ejemplo uno de proyección, con una distancia focal muy corta, se obtiene de un objeto pequeño muy cercano situado ligeramente antes de su foco objeto una imagen real mucho mayor que el objeto. También se puede utilizar una lupa para observar mejor los detalles de esta imagen proyectada.

Una lupa asociada a un objetivo se denomina ocular. En el primer caso (objeto alejado), el objetivo y el ocular forman un antejo. En el segundo caso (objeto cercano) forman un microscopio.

2. Marcha de rayos

Supondremos que el ojo del observador es emétrepe o amétrepe corregido y que no acomoda. En estas condiciones los haces emergentes del ocular son cilíndricos y la imagen que nos proporciona el objetivo, que sirve de objeto para el ocular, está en el plano focal objeto de este último.

Inversamente a lo que pasa con la lupa, en general, los haces emergentes no están determinados para la pupila de entrada del ojo. Conjugados como son de los haces incidentes que proceden de la pupila de salida del objetivo, pasan necesariamente por la imagen de esta pupila a través del ocular, el llamado círculo ocular (Fig. 4.8).

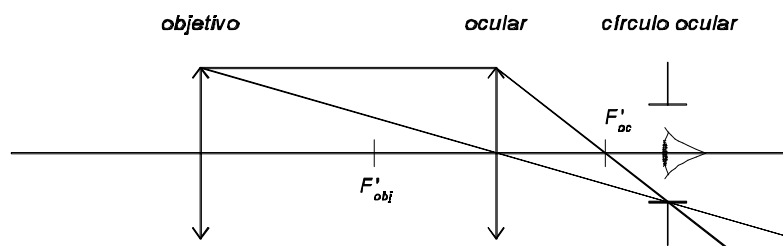


Fig. 4.8

El círculo ocular diafragma los haces emergentes y limita la apertura ya que casi siempre es más pequeña que la pupila del ojo. Cuando estudiamos el microscopio y los anteojos, se verá que el ojo debe situarse en el plano donde se encuentra el círculo ocular. También se verá que los haces incidentes sobre el ocular acostumbran a estar, en general, poco inclinados respecto al eje y que el círculo ocular está detrás y muy cerca del plano focal imagen del ocular.

3. Campo de nitidez

a) Como en el caso de la lupa, los haces son poco abiertos y las aberraciones que se tienen que corregir son, además de la aberración cromática de aumento, las tres aberraciones de campo. Estas tres aberraciones son más importantes cuanto más se aleja el objeto del eje y el haz emergente se inclina sobre el eje. Cuando estas aberraciones dejan de ser tolerables se dice que el objeto ha salido del campo de nitidez, dentro del cual R_m marca el límite práctico (Fig. 4.9).

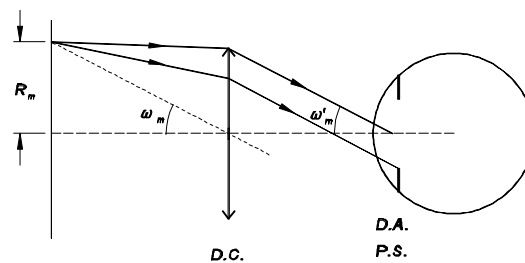


Fig. 4.9

Como en la lupa, se define el campo angular aparente de nitidez $2\omega'$ que está ligado al campo lineal $d = 2R_m$ por la relación

$$R_m = f' \operatorname{tg} \omega' \quad \text{o} \quad d = 2R_m = \frac{2 \operatorname{tg} \omega'}{P} \quad (4.4)$$

donde ω' será la máxima inclinación aceptable de un haz luminoso emergente para un ocular dado. P es la potencia intrínseca del ocular, $1/f'$.

b) Para un tipo determinado de ocular, $2T'$ tiene un valor determinado independiente de la potencia. $2T'$ mide el parámetro más esencial de la calidad para un ocular dado.

c) Si el ocular es una lente simple (ocular de Kepler, tal y como se muestra en la figura 4.10), es necesario

que su diámetro de apertura sea como mínimo igual al diámetro del campo lineal de nitidez. Es inútil, por tanto, que sea mayor.

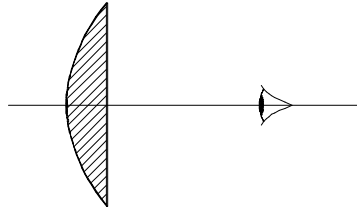


Fig. 4.10

4.2.2 Oculares compuestos más corrientes

1. Notas preliminares

Una lente simple tiene un campo aparente pequeño. La forma que da mejor campo es la plano-convexa con la cara plana dirigida hacia el ojo. Sin embargo, el campo aparente de nitidez $2\omega'$ no supera los 15° (se toma como razón de apertura del ocular $1/3$).

Tal y como se verá, en muchos casos (por ejemplo en prismáticos) es necesario que $2\omega'$ sea mayor. Esto ha conducido a la construcción de oculares compuestos por el mismo motivo que ha sido necesario construir lupas compuestas. Pero un ocular no necesita tener una distancia frontal objeto negativa y suficientemente grande, tal como debe ser en la lupa. Para la lupa, en efecto, el objeto es real y no puede estar demasiado cerca de la cara frontal. Para un ocular, el objeto, que es la imagen que nos proporciona el objetivo, puede ser virtual y puede estar en cualquier posición.

Lo que se acaba de exponer hace pensar que es más fácil resolver el problema. De hecho los oculares compuestos más usuales están formados por dos lentes plano-convexas en crown ordinario, de índice 1,52-1,53, separadas una cierta distancia de aire y centradas sobre el mismo eje.

Todos los oculares de un mismo tipo son geoméricamente análogos. Es por esto que, cuando son de un mismo tipo, se suelen caracterizar por tres números que son proporcionales, respectivamente, a la distancia focal de la primera lente (la lente de campo), a la distancia entre el plano principal imagen de esta y el plano principal objeto de la segunda lente, y a la distancia focal de la última.

Así, en el ocular (3,2,3) las distancias focales son iguales a $3k$ y la separación entre las lentes es de $2k$, donde k es un número arbitrario. Para cada valor de k se tendrá una potencia determinada.

2. Ocular positivo de Ramsden

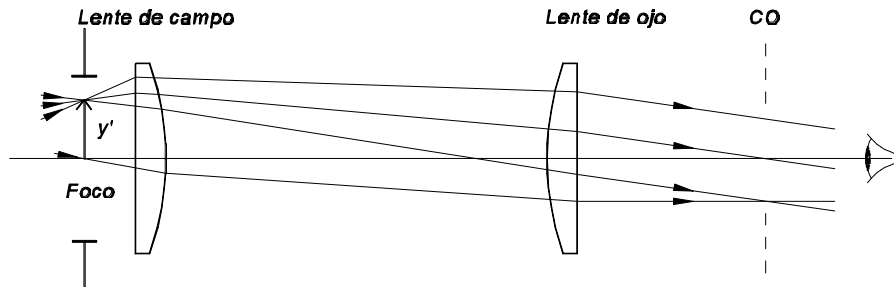


Fig. 4.11

El ocular de la figura 4.11 se denomina positivo ya que el plano focal objeto está delante de la primera superficie de entrada. La imagen objetiva y' (imagen del objeto que nos proporciona el objetivo) juega el papel de objeto real respecto al ocular.

Existen diversos tipos de oculares positivos. El caso de la figura es un ocular de Ramsden (3,2,3); por tanto, se cumple la relación:

$$\frac{f'_1}{3} = \frac{e}{2} = \frac{f'_2}{3} = k$$

Está constituido por dos lentes delgadas plano-convexas con sus dos caras convexas una delante de la otra a fin de reducir aberraciones. Las dos lentes tienen la misma distancia focal, y están separadas por una distancia igual a dos tercios de esta distancia focal.

Este ocular no es acromático ya que $f'_1 + f'_2 \dots 2d$ y tiene una aberración esférica residual notable.

Calculemos los elementos cardinales de este ocular.

La focal total del ocular, f' , se determina con la fórmula:

$$f'_T = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e}$$

En este caso $f'_1 = f'_2 = 3k$ y $e = 2k$, por tanto,

$$f'_T = \frac{3k \cdot 3k}{3k + 3k - 2k} = \frac{9}{4} k$$

La posición de los planos principales se determina con las fórmulas

$$H_1H = \frac{f'_T e}{f'_2} ; \quad H'_2H' = \frac{f'_T e}{-f'_1}$$

Si sustituimos los valores correspondientes al ocular de Ramsden, tenemos que

$$H_1H = \frac{\frac{9}{4}k \cdot 2k}{3k} = \frac{3}{2} k$$

$$H'_2H' = \frac{\frac{9}{4}k \cdot 2k}{-3k} = -\frac{3}{2} k$$

Tomando el valor de f'_T desde H' y el valor de $f_T = -f'_T$ desde H , la situación de los elementos cardinales es la que nos muestra la figura 4.12.

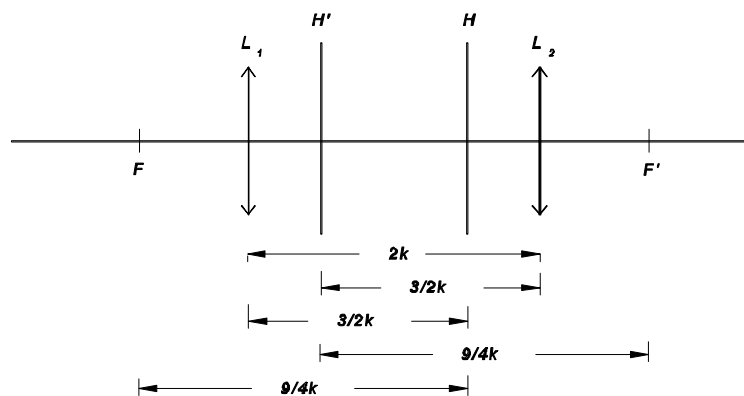


Fig. 4.12

El foco objeto F y el plano principal objeto H son simétricos a los elementos imagen correspondientes respecto del sistema.

La potencia intrínseca de este ocular vale:

$$P = \frac{1}{f_T} = \frac{4}{9k} = \frac{4}{3} \frac{1}{3k}$$

Es decir, solo los $4/3$ de la potencia de cada una de las lentes,

$$f_T = \frac{3f'_1}{4} = \frac{3f'_2}{4}$$

Esta pérdida de potencia está compensada por la disminución de las aberraciones geométricas respecto a una única lente de igual potencia y de igual apertura.

El foco real objeto F está delante de la primera lente L_1 . Es por esto que este ocular se puede utilizar de lupa para mirar un objeto real situado entre F y L_1 , y de aquí su nombre de ocular positivo. El diafragma y el retículo de un antejo o de un microscopio podrán situarse en el lugar donde se encuentra la imagen objetivo.

Sobre la figura 4.13 se ha trazado la imagen y' de un objeto y .

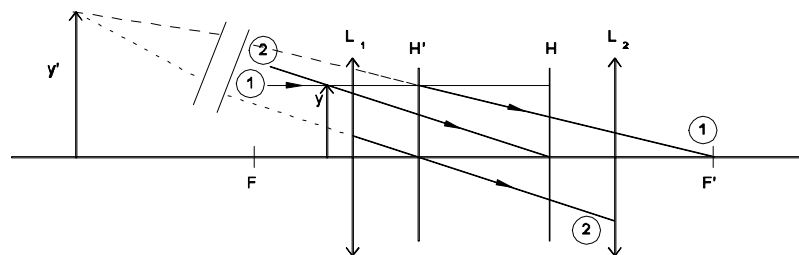


Fig. 4.13

El ocular de Ramsdem puede mejorar con la sustitución de la lente ocular por dos lentes unidas, de las cuales una es divergente y donde la cara de emergencia siempre es plana. Se obtiene así el ocular de Kellner, que se utiliza casi siempre en los anteojos (Fig. 4.14).

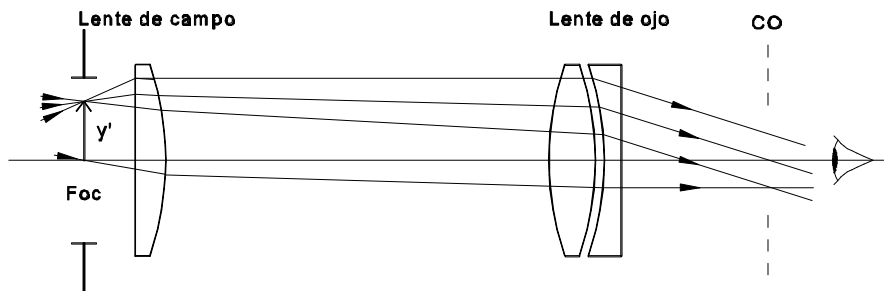


Fig. 4.14

3. Ocular negativo de Huygens

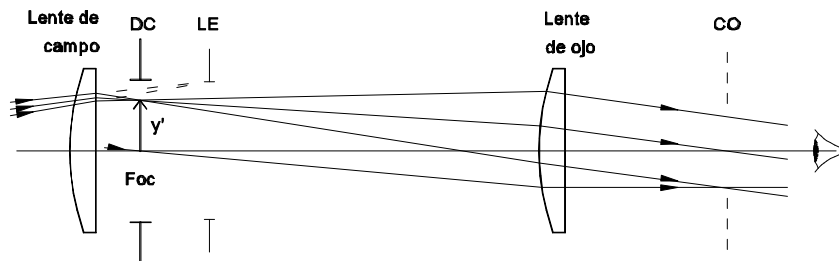


Fig. 4.15

Este ocular (Fig. 4.15) se llama negativo porque su plano focal objeto está detrás de la primera lente. La imagen proporcionada por el objetivo juega el papel de objeto virtual respecto al ocular.

Está constituido por dos lentes plano-convexas separadas con las caras convexas hacia la luz incidente. Por tanto, no es simétrico pero sí que es acromático, ya que $f'_1 + f'_2 = 2k$. Se utiliza casi exclusivamente en los microscopios.

El ocular de Huygens más habitual es el que tiene como símbolo (3,2,1), es decir,

$$\frac{f'_1}{3} = \frac{e}{2} = \frac{f'_2}{1} = k$$

Existen otros oculares de Huygens de características (4,3,2) o (5,4,3).

Para determinar los elementos cardinales resultantes del ocular de Huygens (3,2,1) se utilizan los valores siguientes:

$$f'_1 = 3k; f'_2 = k; e = 2k.$$

De aquí se encuentra:

$$f'_T = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \frac{3k \cdot k}{3k + k - 2k} = \frac{3}{2} k$$

$$H_1 H = \frac{f'_T e}{f'_2} = \frac{3/2k \cdot 2k}{k} = 3k$$

$$H'_2 H' = \frac{f'_T e}{-f'_1} = \frac{3/2k \cdot 2k}{-3k} = -k$$

El foco imagen F' es real y el ocular es convergente y positivo. La potencia intrínseca de este ocular vale:

$$P = \frac{1}{f'} = \frac{2}{3k}$$

Es decir, los dos tercios de la potencia de la lente ocular L_2 o el doble de la potencia de la lente de campo L_1 .

Como F no está situado antes de la primera lente (Fig. 4.16), este ocular funciona como una lupa para un objeto virtual y situado entre la lente de campo y F , y de aquí su nombre de ocular negativo, aunque como sistema sea positivo.

La imagen virtual y , es decir la formada por el haz 1 y 2, cuando sale del objetivo se formará entre F y L_2 . La obtención de la imagen y' de y y el trayecto del haz 1 y 2 se describe en la figura 4.17.

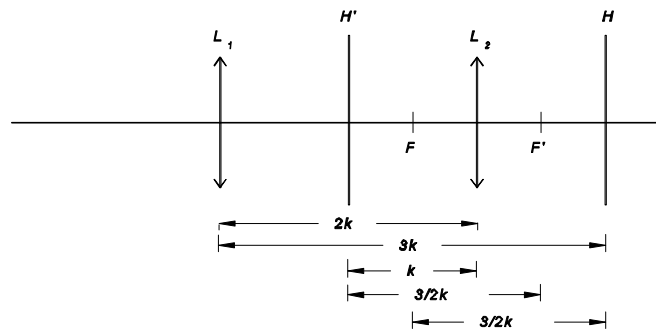


Fig. 4.16

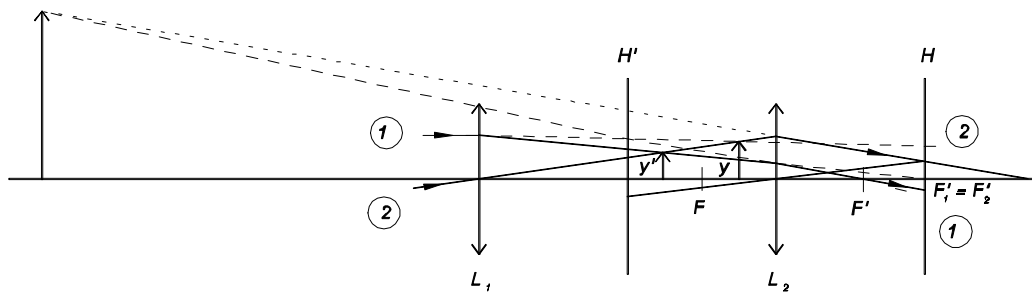


Fig. 4.17

Los rayos 1 y 2 se cruzan en un punto. Existe, entonces, entre L_1 (lente de campo) y L_2 (lente ocular) una imagen real y_1 .

En estos oculares negativos es difícil colocar un retículo. Por contra, satisfacen la condición de acromatismo aparente y aseguran un campo relativamente extenso. El diafragma de campo se sitúa en el plano donde se forma la imagen real y_1 . Si el objeto virtual P se encuentra en F del ocular, entonces la imagen real y_1 , y por tanto el diafragma de campo P , estarán situados en F_2 .

Cuando un microscopio, en el cual se encuentra el ocular, se desplaza para enfocararlo, a veces se puede disponer de un micrómetro en el plano del diafragma de campo. Entonces, la lente de ojo es la que puede

ser ligeramente desplazada para un enfoque preciso de las divisiones.

Cuando el ocular está precedido de un objetivo (por ejemplo de microscopio), la apertura primitiva del haz de rayos que emana de un punto del objeto se hace mucho más pequeña en el espacio imagen del objetivo y solo se utiliza una pequeña parte de las lentes del ocular. Es por esto que el objetivo debe estar corregido de las aberraciones que dependen sobre todo de la apertura (aberración esférica y coma), mientras que el ocular estará sobre todo corregido para el astigmatismo, la curvatura de campo y la distorsión.

Estos defectos pueden ser difícilmente corregidos solo con dos lentes. Normalmente son poco importantes y el uso de los oculares de Ramsdem y de Huygens es suficiente. De todas maneras la aberración cromática tiene que estar mínimamente corregida.

Otra ventaja es la pupila de salida del instrumento (microscopio), que debe estar situada alrededor de 15 mm de la lente del ojo; aquí es donde se situará la pupila del ojo, sin ninguna molestia para el observador.

Gracias a la lente de campo, el campo de visión será suficientemente grande. El campo imagen o aparente del ocular tipo Huygens en un microscopio tiene alrededor de 30° . El ocular de tipo Huygens o Kellner en un antejo tiene un campo aparente de 45° .

4. Otros oculares

- Ocular de Huygens acromático

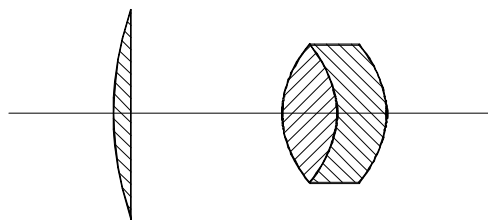


Fig. 4.18

- Ocular de Huygens - Mittenzwey

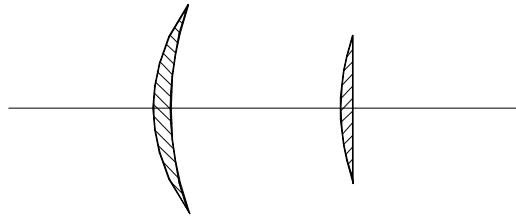


Fig. 4.19

- Ocular de Steinheil

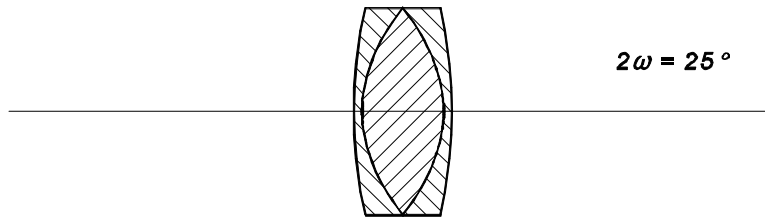


Fig. 4.20

- Ocular ortoscópico

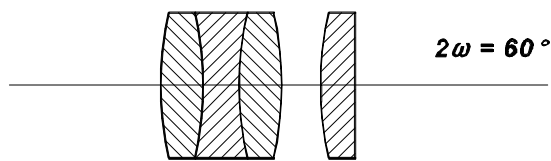


Fig. 4.21

- Ocular de Erfle

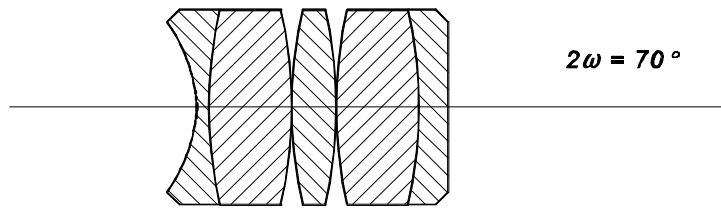


Fig. 4.22

- Ocular de Ploesl

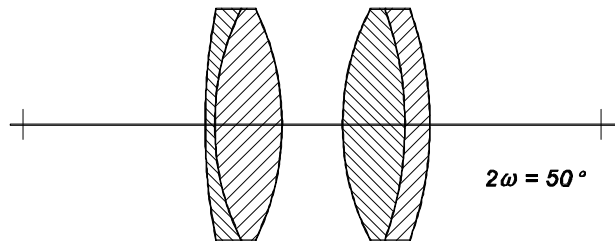


Fig. 4.23

4.3 Microscopio compuesto I

4.3.1 Generalidades

1. Introducción

Al estudiar la lupa, se vio que el aumento que se obtenía crecía a medida que disminuía la distancia focal de la lupa. Así, si se quieren aumentos muy grandes, son necesarias focales muy cortas. Por ejemplo, para tener 100 aumentos se necesita una focal de 2,5 mm. La lente necesaria para alcanzar este valor es como una cabeza de alfiler, sin apenas dimensiones para cogerla. Por tanto, esta lupa es muy difícil de construir.

Sin embargo, estas focales tan pequeñas se pueden conseguir con dos lentes separadas de manera que cada una tenga una focal y un diámetro mayor. Si f'_1 y f'_2 son las focales de las lentes y e es la separación entre ellas, la focal total f'_T vale:

$$f'_T = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} \quad (4.5)$$

Los valores de $f'_1 = 16 \text{ mm}$, $f'_2 = 25 \text{ mm}$ y $e = 201 \text{ mm}$ dan el valor anterior de la focal de $f'_T = 2,5 \text{ mm}$.

Este dispositivo es el que recibe el nombre de microscopio compuesto, en contraposición al simple que es una lupa de gran potencia.

2. Definición. Experiencia

a) Definición

Así pues, un microscopio compuesto está constituido por dos sistemas convergentes. Uno llamado objetivo, con una distancia focal muy pequeña, que da una imagen real y aumentada (sistema de proyección) de un objeto pequeño del cual se quieren distinguir detalles. El otro es el ocular, gracias al cual el ojo examina esta imagen objetiva y que funciona como una lupa.

b) Experiencia

Se puede montar un microscopio, a escala 10 aproximadamente, por medio de dos lentes: una lente L_1 , de algunos centímetros de distancia focal, que hace de objetivo (de algunos milímetros de focal) y una lente L_2 , de algunos decímetros de focal, que hace de ocular (de algunos centímetros de focal).

El objeto puede ser un filamento de lámpara colocado cerca del foco de L_1 . L_1 da, de este objeto, una imagen real muy grande sobre una pantalla colocada a 150 cm aproximadamente detrás de L_1 . Esta imagen es la imagen objetivo. Si se saca la pantalla y se coloca L_2 detrás de la imagen, de manera que esté cercana al foco objeto de L_2 , se observa (detrás de L_2) una imagen S'_1 de L_1 . A continuación, si se dispone el ojo experimental de manera que la pupila coincida aproximadamente con S'_1 , se observa la imagen de una parte del filamento objeto sobre la retina del ojo experimental.

Si se suprime el microscopio, se aleja progresivamente la lámpara del ojo (al cual se acopla una lente de una dioptría, para simular una acomodación de 10 dioptrías). Para una cierta posición del filamento objeto se consigue enfocar nuevamente la imagen sobre la retina, donde en este caso la imagen resulta ser mucho más pequeña que antes.

3. Construcción de las imágenes

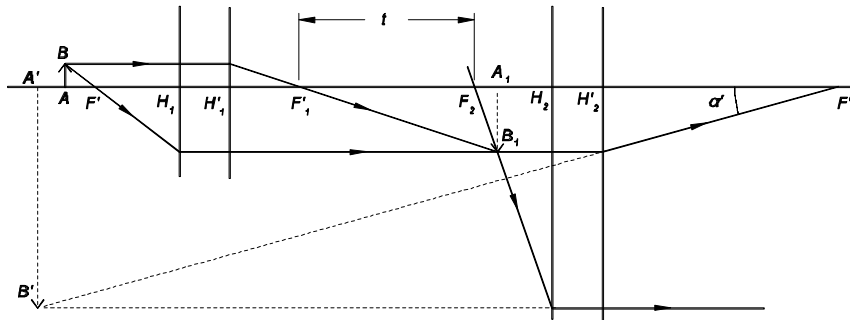


Fig. 4.24

Consideremos la figura 4.24. El objetivo está representado por los planos principales H_1, H'_1 y por los focos F_1, F'_1 . De un objeto AB se forma una imagen A_1, B_1 . El ocular también está representado por los focos F_2 y F'_2 y por los planos principales H_2 y H'_2 . Suponiendo que A_1 cae justo detrás de F_2 y se construye la imagen $A'B'$ de A_1, B_1 , que es la imagen referida a el ocular, nos damos cuenta, que $A'B'$ es vista por el ojo con un ángulo α' mucho mayor que con el ángulo α por donde el ojo vería AB directamente.

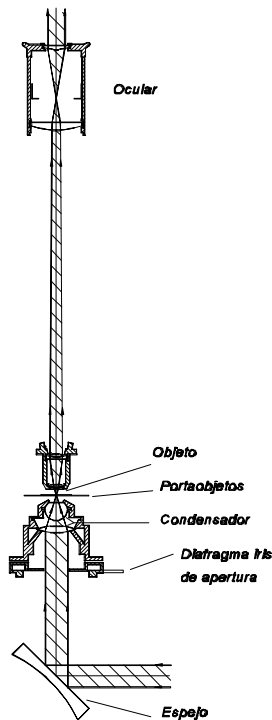


Fig. 4.25

4. Descripción resumida

Un microscopio compuesto clásico está formado por:

- Un soporte pesado y rígido que hace de pie, donde se fija un espejo orientable y un sistema óptico convergente (condensador), destinados a formar la imagen de una fuente luminosa sobre el objeto, a fin de iluminarlo fuertemente.
- Una placa rígida, la platina, que soporta el objeto y que tiene un orificio por donde pasan los rayos que lo iluminan.
- Un cuerpo (orientable o no) que soporta el tubo microscópico propiamente dicho, donde está el ocular (en la parte superior) y el objetivo (en la inferior).

La distancia focal del objetivo L'_1 varía entre 1,3 y 50 mm, la

potencia del ocular P_2 varía entre 20 y 60 dioptrías, y el intervalo óptico $t = F'_1 F_2$ varía entre 140 y 180 mm.

4.3.2 Potencia y aumento

1. Potencia

a) Definición. La potencia de un microscopio es la aptitud del instrumento para hacer aparecer, con un ángulo visual α' , una longitud determinada AB del objeto. La potencia se mide por el número que se obtiene del ángulo α' desde donde se ve la imagen $A'B'$, expresado en radianes, dividido por la longitud del objeto expresado en metros. Así se obtiene:

$$P = \frac{\alpha'}{AB} \quad \text{o} \quad \alpha' = P AB \quad (4.6)$$

La definición es la misma que para la lupa.

b) Deducción. Según la definición de la potencia P_2 del ocular, y tomando la imagen intermedia A_1B_1 como objeto para este último, se obtiene:

$$\alpha' = P_2 A_1B_1$$

Si se considera que el aumento lateral del objetivo es

$$m_1 = \frac{A_1B_1}{AB}$$

se obtiene:

$$A_1B_1 = m_1 AB$$

de donde,

$$\alpha' = P_2 m_1 AB$$

y, como consecuencia,

$$P = \frac{\alpha'}{AB} = P_2 m_1$$

La potencia es igual al producto de la potencia del ocular por el aumento lateral del objetivo:

$$P = m_1 P_2$$

c) Constancia de la potencia. La potencia del microscopio es rigurosamente constante, suponiendo el ojo colocado siempre en su foco imagen.

- para construir los elementos cardinales del microscopio se debe buscar la posición AB tal que su imagen $A'B'$ esté en el infinito. Para esto se considera el rayo paralelo al eje que pasa por B ($H_1Q_1 = AB$), que da como rayo emergente del objetivo el $Q'_1F'_1$.

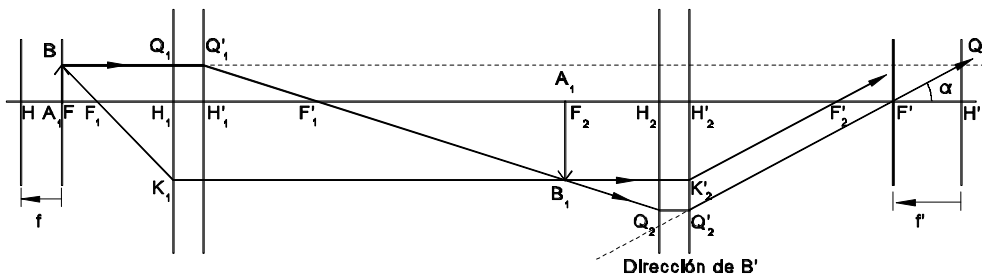


Fig. 4.26

Entonces, se considera K_1F_1 su conjugado K_1B_1 , que será paralelo al eje del sistema. Su intersección con el anterior determina B_1 , que es la imagen de B respecto al objetivo.

Ahora se prolonga K_1B_1 , su conjugado respecto al ocular $K'_2F'_2$.

Por otro lado, el rayo F'_1B_1 tiene su conjugado Q'_2F' , que es paralelo a $K'_2F'_2$ (pasa por B) y corta el eje en F' y la prolongación de BQ_1 en Q' .

Se reconoce (construcción clásica) en F' al foco imagen del microscopio y en Q' un punto del plano principal imagen.

- Remarquemos que $H'F' = f$ es negativo. Este resultado no tiene que extrañar; el hecho de que la lupa, un sistema positivo, y el microscopio, un sistema negativo, tengan papeles de la misma naturaleza no implica que tengan convergencias del mismo signo.

- La potencia $P = 1/AB$ (Fig. 4.26) es evidentemente igual a la potencia intrínseca $P_i = 1/f'$ (triángulo $F'Q'H'$). Suponiendo que AB se desplaza en relación al aparato (o inversamente), se ve que B se desplaza sobre Q'_1Q' , B_1 sobre F'_1Q_2 y B' sobre Q'_2F' ; es por esto que α' y en consecuencia P continúa constante e igual a P_i para un AB dado.

- Por tanto, la expresión $P = m_1P_2$ es siempre válida, ya que aunque m_1 y P_2 varíen con la posición del objeto enfocado, su producto permanece constante.

Por otro lado, como $m'_1 = -t/f'_1$ (Fig. 4.26) y $P_2 = 1/f'_2$ (si $A'B'$ están en el infinito) la potencia resultante del microscopio puede expresarse, de acuerdo con (4.5), por

$$P = - \frac{t}{f'_1 f'_2} \quad (4.9)$$

2. Aumento visual

El aumento de un microscopio (como el aumento visual de la lupa) es la relación entre las imágenes retinianas, cuando el ojo observa el objeto, con instrumento y sin él.

Como las imágenes retinianas son proporcionales a los ángulos visuales, se puede dar también la definición siguiente:

Se llama aumento visual la relación M_v entre el ángulo α' por donde se ve la imagen del objeto a través del microscopio y el ángulo por donde se ve a ojo desnudo:

$$M_v = \frac{\alpha'}{\alpha}$$

Tal y como ya se ha visto a propósito de la lupa, α depende de la distancia de observación del ojo desnudo y se ha convenido adoptar una distancia convencional, 250 mm, de manera que M_v solo dependerá del instrumento.

Se tiene:

$$\alpha' = P \cdot AB \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{AB}{0,250} = 4 \cdot AB \quad (4.10)$$

con lo cual,

$$M_v = \frac{P}{4} \quad (4.11)$$

Como

$$P = m_1 \cdot P_2$$

se encuentra

$$M_v = m_1 \cdot \frac{P_2}{4} = m_1 \cdot M_{v_2} \quad (4.12)$$

siendo M_{v_2} el aumento visual comercial del ocular.

Los microscopios comerciales disponen de un juego de diversos objetivos y oculares de diferentes aumentos que se pueden combinar de diversas maneras para dar diferentes aumentos totales.

3. Medida del aumento y de la potencia

a) **Medida de m_1 .** Se observa a través del ocular, después de haber utilizado simultáneamente la imagen de un micrómetro objetivo y la de un micrómetro ocular (el ocular ha de ser un ocular de tipo Ramsden).

Sea n el número de divisiones del micrómetro ocular que cubre exactamente la imagen A_1B_1 de una división AB del micrómetro objetivo. Si una división de este último vale 10^{-2} mm, y una división del micrómetro ocular 10^{-1} mm, se obtiene $AB = 10^{-2}$ mm, y $A_1B_1 = n \cdot 10^{-1}$ mm, de donde:

$$m_1 = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{n \cdot 10^{-1}}{10^{-2}} = 10 \cdot n$$

Solo nos interesa el valor absoluto de m_1 .

Para obtener la potencia (o el aumento) de una combinación objetivo ocular (un microscopio moderno se entregado con un conjunto de objetivos montados sobre el revólver y diversos oculares), se multiplica el aumento m_1 medido para la potencia (o el aumento) del ocular. Si se debiera verificar esta indicación se puede medir la focal del ocular para cualquier método de focometría.

b) **Medida directa de la cámara clara.** La figura 4.27 da el principio del método. El ojo del observador puede ver simultáneamente enfocados, a una distancia finita d , la imagen de un micrómetro objetivo, dada por el microscopio, y la imagen de un papel milimetrado, dada por la cámara clara, que es un conjunto formado por dos espejos paralelos inclinados 45° sobre la dirección del microscopio.

De hecho, una cámara clara es un paralelepípedo de vidrio que tiene dos caras plateadas. La que está cerca del ojo presenta un círculo sin depósito metálico, círculo centrado con el eje del instrumento, cosa que permite la observación del micrómetro objetivo.

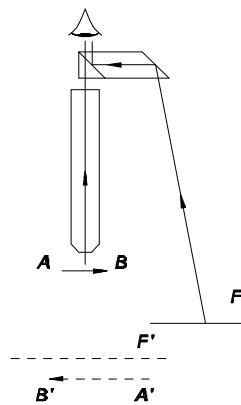


Fig. 4.27

Si la imagen $A'B'$ de una división AB ($AB = 10^{-2} \text{ mm}$) del micrómetro objetivo recubre exactamente n mm, se obtiene evidentemente:

$$AB = 10^{-5} \text{ m} \quad i \quad A'B' = n \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Y como

$$\alpha' = \frac{A'B'}{d} \quad i \quad P = \frac{\alpha'}{AB}$$

$$P = \frac{n \cdot 10^{-3}}{d \cdot 10^{-5}} = \frac{100 \cdot n}{d}$$

d está expresado en m.

El aumento M_v , correspondiente a la distancia d , es

$$M_v = P \cdot d$$

En efecto,

$$\alpha' = \frac{AB}{d} \quad \alpha' = P \cdot AB \quad M_v = \frac{\alpha'}{\alpha} = P \cdot d$$

Se obtiene, por tanto,

$$M_v = 100 \cdot n$$

Si $d = 0,25$ m, M_v es el aumento visual comercial.

4. Órdenes de magnitud

De un microscopio a otro, el intervalo óptico t varía poco. En cambio, la potencia P_2 del ocular varía bastante (de 20 a 60 dioptrías). Pero, sobre todo, el valor mayor o más pequeño de f'_1 (o aumento lateral del objetivo) es el que lleva una gran variedad de la potencia.

a) Ejemplo del microscopio débil

Si

$$f'_1 = 48 \text{ mm} \quad t = 135 \text{ mm} \quad M_{v2} = 5 \quad (P_2 = 20 \text{ dpt})$$

Se obtiene

$$|m_1| = \frac{t}{f'_1} = \frac{135}{48} = 2,8$$

Entonces,

$$P = m_1 P_2 = 2,8 \cdot 20 = 56 \text{ dpt}$$

y, finalmente,

$$M_v = 2,8 \cdot 5 = 14$$

b) Ejemplo del microscopio potente

Si

$$f'_1 = 2,7 \text{ mm} \quad t = 197 \text{ mm} \quad M_{v_2} = 15 \quad (P_2 = 60 \text{ dpt})$$

se obtiene

$$m_1 = \frac{197}{2,7} = 73$$

por tanto,

$$M_v = 73 \cdot 15 = 1.095 \approx 1.100$$

Y al final,

$$P = 4.400 \text{ dpt}$$

Sobre todo, lo que ha aumentado es m_1 . Ha sido multiplicado por 25, y M_{v_2} solamente por 3. Este valor se ha obtenido dividiendo por 18 aproximadamente la distancia focal f'_1 y aumentando t solo un 50 % de su valor.

c) Ejemplo del microscopio muy potente

Si,

$$f_1' = 1,3 \text{ mm} \quad t = 175 \text{ mm} \quad M_{v2} = 15 \quad (P_2 = 60 \text{ dpt})$$

se obtiene

$$m_1 = \frac{175}{1,3} = 135$$

entonces,

$$M_v = 135 \cdot 15 = 2.025$$

y

$$P = 8.100 \text{ dpt}$$

La división por 2 de f_1' ha causado la multiplicación para 2 del aumento, aproximadamente.

Un microscopio potente es el que tiene un objetivo con una distancia focal muy pequeña.

4.3.3 Profundidad de enfoque

1. Definición y cálculo

Para enfocar se desplaza el instrumento entero en relación al objeto, tal como se hace con la lupa. La imagen se ve nítida si está comprendida dentro del intervalo de acomodación del ojo. Cuando esta imagen se desplaza del punto remoto al punto próximo, el objeto se desplaza sobre un pequeño segmento $A_R A_P$ la longitud del cual es la profundidad de enfoque o profundidad de campo del microscopio.

La definición es idéntica a la de la lupa. El cálculo es el mismo si el plano principal objeto del ojo está situado rigurosamente en el foco imagen del conjunto del microscopio.

Se tiene por tanto:

$$A_R A_P = \frac{A}{P^2} \quad (4.15)$$

Un microscopio mediano tiene una potencia de 1.000 dioptrías.

Para $A = 4$ dpt, se obtiene

$$A_R A_P = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 4 \mu$$

La profundidad del campo de un microscopio es muy pequeña.

2. Consecuencias

Esta extrema debilidad de la profundidad de enfoque tiene consecuencias prácticas importantes.

a) Un microscopio permite enfocar con precisión el plano de un objeto real (o incluso virtual) si la distancia frontal objeto del instrumento es suficiente.

b) Los objetos, a fin de poder ser iluminados por transparencia, son cortados en láminas finas de algunas micras de espesor. Para que una de estas láminas sea rigurosamente plana, debido a que el microscopio no se enfoca simultáneamente sobre diversos elementos si no están situados en el mismo plano, se le encierra (*sandwich*) entre dos láminas plano-paralelas trabajadas ópticamente, una de 1 mm de espesor (porta-objetos) y la otra de 0,16 - 0,18 mm de espesor (cubre-objetos). Al conjunto se le llama preparación microscópica.

c) El enfoque, siempre por la misma razón, es difícil, y lo es más cuanto mayor sea la potencia. Para esto se tiene un dispositivo mecánico muy preciso que comporta dos velocidades, una de ellas muy lenta para asegurar un desplazamiento fino del tubo del microscopio respecto a la preparación.

A pesar de esto se suele sobrepasar la posición de enfoque. Es por esto que se aconseja acercar siempre al máximo el objetivo a la preparación y después enfocar alejándolo de la preparación. Operando en sentido inverso, la preparación se podría romper por la cara anterior del objetivo (aunque la mayoría son retráctiles).

La preparación debe mantenerse inmóvil y bien aplicada sobre la platina para realizar un plano perfectamente normal al eje del instrumento, para esto también las platinas tienen que ser muy planas y los portapreparaciones deben tener movimientos planos y precisos.

4.4 Microscopio compuesto II

4.4.1 Limitación de los rayos útiles. Apertura numérica

1. Marcha de rayos

a) Pupila de salida del objetivo

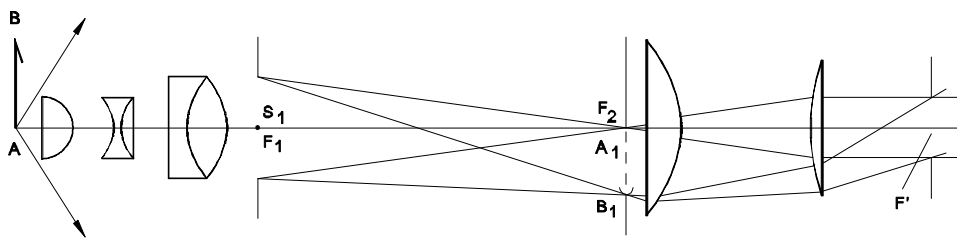


Fig. 4.28

- Tal y como se demostrará posteriormente, el haz de rayos incidentes útiles debe ser muy abierto si se quieren distinguir detalles muy finos.

El hecho es que la inclinación máxima sobre el eje de los rayos útiles puede alcanzar valores elevados (una inclinación de 60° a 70° es normal).

- A esta apertura de rayos incidentes corresponde una apertura de rayos emergentes del objetivo que está determinada por la pupila de salida S_1 de este último, la cual acostumbra a estar colocada prácticamente en el foco imagen de F'_1 del objetivo. Así es como se considerará de ahora en adelante.

- Con el objeto AB cerca del foco F_1 y la imagen objetivo A_1B_1 relativamente lejos de F'_1 ($F'_1A_1 = m_1 f'_1$ y m_1 vale normalmente diversas decenas), los rayos emergentes son poco abiertos. Se verá que a una inclinación máxima de los rayos incidentes igual a 60° , por ejemplo, corresponde una inclinación máxima de los rayos emergentes del orden de 1° (Fig. 4.29).

b) Círculo ocular

- Los rayos emergentes del objetivo, después de pasar por la pupila de salida S_1 del objetivo, dan unos rayos conjugados respecto al ocular que pasan todos por la imagen S'_1 que el ocular da de S_1 . Esta imagen S'_1 es la pupila de salida del microscopio entero. Casi siempre es más pequeña que

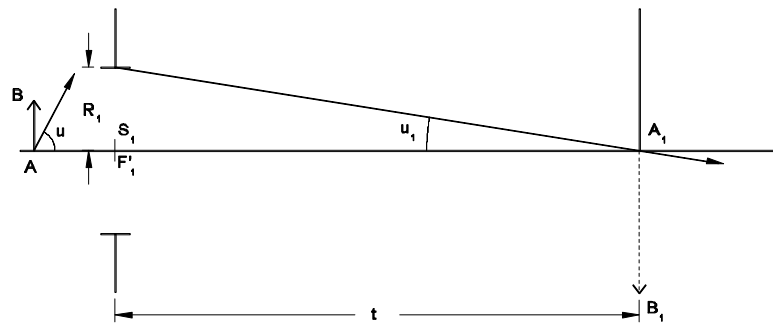


Fig. 4.29

la pupila del ojo. Si se coloca este último en S'_1 recibirá toda la luz que sale del instrumento.

Es por esto que se llama círculo ocular la pupila de salida S'_1 del instrumento (figura 4.30).

- Si se centra la pupila de salida del objetivo sobre F'_1 , S'_1 tendrá como centro la imagen F' de F'_1 respecto al ocular. F' es por tanto el foco imagen del instrumento. Un objeto en el infinito sobre el eje tiene un efecto como imágenes sucesivas F'_1 y después F' .

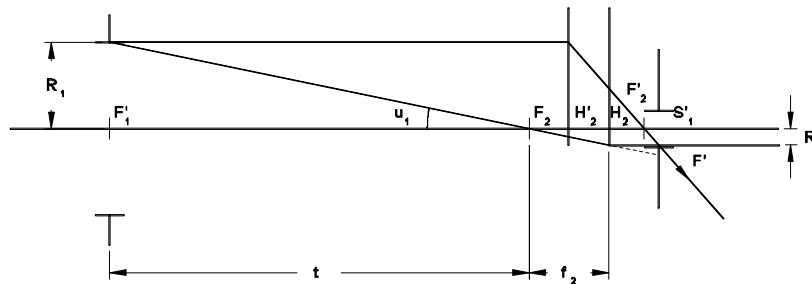


Fig. 4.30

2. Campo

a) Se considera un punto B del plano objeto y se supone que este punto, partiendo de A sobre el eje, se aleja de éste en dirección normal. El haz emergente del objetivo que le corresponde tiene como vértice la imagen B_1 de B (figuras 4.31 y 4.32). Llega un momento en que los rayos de este haz ya no encuentran la lente de campo del ocular y chocan contra la montura. En este momento se dice que B deja el campo de iluminación plena y entra en el campo de contorno, cosa que implica que B' recibe menos luz.

Si B se aleja más, el rayo mediano $F'_1 B_1$ pasa por el borde de la lente de campo. Así, B se encuentra al límite de lo que se llama campo mediano.

Si B se continúa alejando llega un momento en que todos los rayos están parados y no hay imagen de B' . B deja de verse; ha salido del campo total.

b) Admitiendo que el objetivo es perfectamente astigmático para los puntos B y B_1 , el ocular solo dará de B_1 una buena imagen B' , en el caso que B_1 esté en su campo lineal de nitidez. Dicho de otra manera, si ω' es el campo aparente de nitidez del ocular y P_2 su potencia, se debe cumplir que

$$A_1 B_1 \leq \frac{\text{tg } \omega'}{P_2} \quad (4.16)$$

El constructor acostumbra a colocar en el plano de la imagen del objetivo un diafragma donde el diámetro es igual al campo lineal de nitidez del ocular (caso de un ocular positivo).

Por otro lado, a una lente de campo se le suele dar un diámetro tal que el campo sea de iluminación plena ya que el diafragma suprime el campo de contorno (Fig. 4.31).

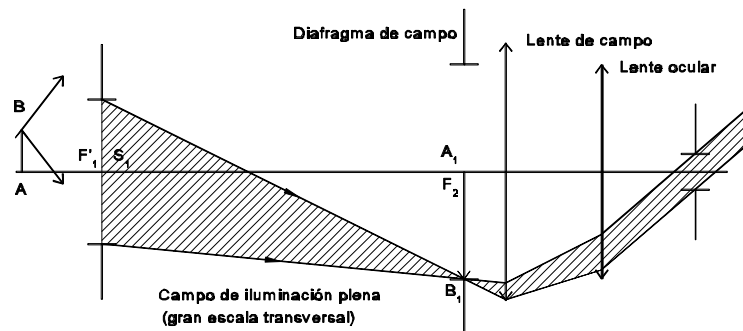


Fig. 4.31

Por ejemplo, si $\text{tg } T' = 1/4$ y $P_2 = 25 D$, el diafragma tendrá un radio:

$$\frac{1}{4 \cdot 25} = \frac{1}{100} \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

El campo que le corresponde en el plano objeto tiene un radio AB :

$$AB = \frac{A_1 B_1}{m_1}$$

Siendo $A_1 B_1$ el radio del diafragma. Si $m_1 = 50$, $AB = 0,2$ cm ya que se ha considerado $A_1 B_1 = 1$ cm.

El radio de la lente de campo del ocular (Fig. 4.31) es ligeramente mayor que la del diafragma. Es fácil calcular el valor mínimo haciendo uso de la figura 4.31 o 4.32.

Cuando el ocular es negativo, el diafragma está colocado en el plano conjugado del plano $A_1 B_1$ respecto a la lente de campo. Es sensiblemente el plano focal de la lente ocular (Fig. 4.32).

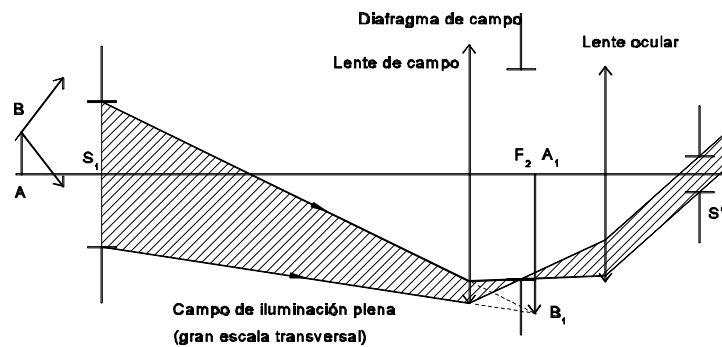


Fig. 4.32

3. Apertura numérica y pupilas

Se ha analizado la naturaleza y la colocación de las pupilas que limitan los haces. Ahora vamos a evaluar los radios de estas pupilas y la apertura de estos haces.

a) Amplitud y apertura de rayos

- Se ha supuesto que el objetivo es astigmático para A y A_1 y que estando un objeto B situado en el plano normal al eje en A , B_1 está en el plano normal al eje en A_1 , incluso si los rayos incidentes son muy abiertos.

El objetivo por construcción es, por tanto, aplanático para A y A_1 , y así se cumple la condición de los senos de Abbe:

$$n AB \operatorname{sen} u = A_1 B_1 \operatorname{sen} u_1$$

n es el índice del medio objeto, que no siempre es el aire; u y u_1 son los semiángulos de apertura de los rayos incidentes (u) y emergentes (u_1) del objetivo.

- La relación se puede escribir:

$$\operatorname{sen} u_1 = \frac{n \operatorname{sen} u}{m_1}$$

siendo

$$m_1 = \frac{A_1 B_1}{AB}$$

Como $n \operatorname{sen} u$ no puede exceder de n , es decir, de 2 (de hecho, se toma $n = 1$ o bien $n = 1,50$), y como m_1 muchas veces excede de 10 y puede llegar hasta 50 o 100, se deduce que u_1 es siempre inferior a 0,2 ($m_1 = 10$) y que se puede confundir $\operatorname{sen} u_1$ y u_1 expresado en radianes.

b) Pupila de salida del objetivo y apertura numérica

- Definición de apertura numérica.

Se llama apertura numérica a la expresión $n \operatorname{sen} u$, donde u es la inclinación máxima sobre el eje de un rayo incidente útil que procede de A .

- Relación de $R_1 = f_1 n \operatorname{sen} u$.

Sea R_1 el radio de la pupila de salida del objetivo. Se ve sobre la figura 4.31 y se supone que A_1 está en F_2 , se puede escribir:

$$R_1 = t u_1$$

siendo

$$u_1 = \frac{n \operatorname{sen} u}{m_1}$$

Por otro lado,

$$|m_1| = \frac{t}{f_1'}$$

Se tiene:

$$R_1 = t \frac{n \operatorname{sen} u}{m_1} = f_1' n \operatorname{sen} u \quad (4.18)$$

Entonces, se ve que

$$n \operatorname{sen} u = \frac{R_1}{f_1'}$$

Esto permite decir que la apertura numérica sería igual a la semiapertura relativa de una lente que tuviera por diámetro de apertura $2R_1$ y como focal la del objetivo.

c) Círculo ocular y apertura numérica

De la construcción de S_1 , en la figura 4.30, y suponiendo A_1 en F_2 ,

$$R' = u_1 H_2 F_2 = \frac{u_1}{P_2} \quad (4.19)$$

Por la relación de Abbe, también se obtiene

$$u_1 = \frac{(n \operatorname{sen} u)}{m_1}$$

Y, en consecuencia,

$$R' = \frac{n \operatorname{sen} u}{m_1 P_2} \quad (4.20)$$

Esto, teniendo en cuenta que

$$P = m_1 P_2$$

da la relación fundamental:

$$R' = \frac{n \operatorname{sen} u}{P} = \frac{n \operatorname{sen} u}{4 M_v} = \frac{250 n \operatorname{sen} u}{M_v}$$

$$D' = \frac{500 An}{M_v} \quad (4.21)$$

El radio del círculo ocular es igual al cociente de la apertura numérica del objetivo por la potencia del microscopio.

Naturalmente R' se expresa en metros y P en dioptrías.

La pupila de salida tiene un diámetro muy pequeño y va decreciendo a medida que crece el aumento del microscopio.

d) Medida de la apertura numérica

- Se toma como medio objeto el aire y se coloca una regla graduada delante del objetivo, en un plano frontal bastante alejado (generalmente con un metro es suficiente). Se desplaza una lámpara desde el centro hacia los bordes a través de la regla. La imagen de la lámpara aparece en el plano focal del objetivo, es decir en el plano de la pupila de salida S_1 de este último.

Para observarlo se saca el ocular y se substituye por una lente de una veintena de centímetros de focal, que da de S_1 una imagen alejada que se observará fácilmente. Se anotan las posiciones de M_1 y M_2 de la lámpara para las cuales la imagen de esta se encuentra sobre el borde de la pupila (M'_1 y M'_2) (Fig. 4.33).

Evidentemente, se tendrá:

$$\operatorname{sen} u = \frac{M_1 M_2}{2 M_1 A}$$

A se confunde ahora con la cara frontal del objetivo y su distancia frontal es despreciable respecto a M_1A .

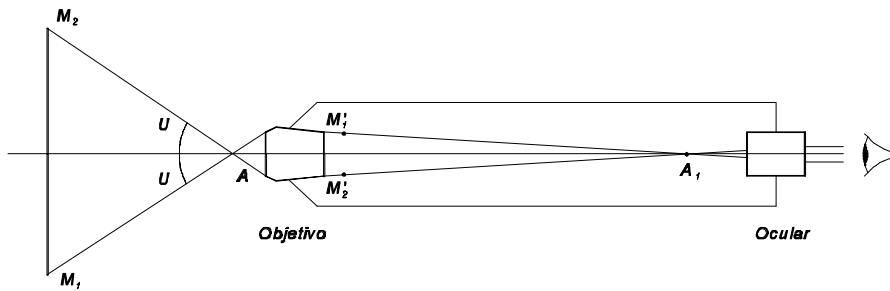


Fig. 4.33

- Para los objetivos de inmersión (ver más adelante) se utiliza un aperturómetro (Fig. 4.34). Es un bloque de cristal graduado directamente en la apertura numérica; puede ser paralelepípedo o hemicilíndrico.

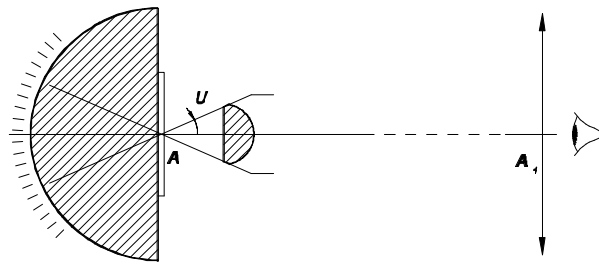


Fig. 4.34

Un diafragma previsto de un agujero pequeño A es acoplable a la cara plana de un aperturómetro que está delante del objetivo. Se enfoca A, después se saca el ocular y se opera como en el caso anterior. Si n' es el índice del cristal del bloque se tiene:

$$n' \operatorname{sen} u' = n \operatorname{sen} u$$

cualquiera que sea n .

Así pues, las graduaciones son válidas, sea cual sea el líquido de inmersión empleado e incluso en ausencia de líquido ($n=1$).

4.4.2 Poder de resolución en el microscopio

1. Poder de resolución solo

Un sistema óptico, incluso si es p

erfectamente estigmático da, tal y como se ha visto en el capítulo 2.6, como imagen de un punto, una mancha circular rodeada de anillos (la mancha de Airy). Es el fenómeno denominado difracción y es consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz, de la existencia inevitable de un diafragma de apertura y de las pupilas de entrada y de salida que son sus conjugadas.

Es evidente que el contraste entre los trazos claros y oscuros de las miras de Foucault se encuentra atenuado por el hecho de existir la mancha de difracción. Incluso puede desaparecer si la mancha se hace muy grande para una mira de paso dado.

Para estudiar el poder resolutivo del microscopio propiamente dicho, basta con analizar el del objetivo, ya que si éste no da imágenes resueltas de dos puntos próximos el ocular no puede hacer nada para separarlos y, en el mejor de los casos, empeorará la resolución con las aberraciones y la difracción propia.

Tal y como ya se ha visto en el capítulo 2.6, el criterio de Rayleigh establece que las imágenes de dos puntos de la preparación A y B , que emiten independientemente uno del otro, estarán resueltas siempre que los centros de las figuras de difracción se vean desde el punto nodal objeto del objetivo bajo un ángulo α con valor:

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (4.22)$$

donde, en un modelo simplificado de microscopio (Fig. 4.35), d es el diámetro del objetivo y λ la longitud de onda de la luz con que se trabaja.

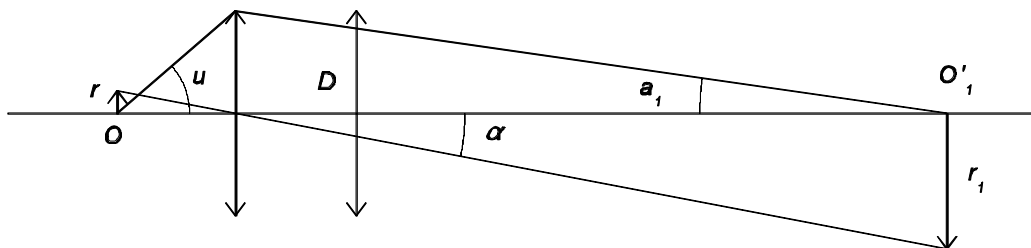


Fig. 4.35

La distancia r_1 donde se encuentran las imágenes teóricas es

$$r_1 = a_1 \alpha = \frac{a_1}{D} 1,22 \lambda$$

Si se tiene en cuenta que el diámetro de los objetivos del microscopio es muy pequeño (de 1 a 4 mm) y la $t = 160$ mm, podemos aceptar que

$$\text{sen } u_1 \approx u_1 \approx \frac{D}{2}$$

y, por tanto,

$$r_1 = \frac{1,22 \lambda}{2 \text{ sen } u_1} = \frac{0,61 \lambda}{\text{sen } u_1} \quad (4.23)$$

Pero si se considera el objetivo estigmático, que, por tanto, debe cumplir la condición del seno: $n r \text{ sen } u = n_1 r_1 \text{ sen } u_1$, se puede escribir:

$$r = \frac{n_1 r_1 \text{ sen } u_1}{n \text{ sen } u}$$

Como $n_1 = 1$, substituyendo en (4.23), se obtiene:

$$r = \frac{0,61 \lambda}{n \text{ sen } u} = \frac{0,61 \lambda}{A_n} \quad (4.24)$$

donde $A_n = n \text{ sen } u$ es la apertura numérica. En el caso particular en que $\lambda = 550$ nm y $A_n = 1,5$:

$$r = \frac{0,61 \cdot 550 \cdot 10^{-9}}{1,5} \approx 0,2 \mu$$

Esta ecuación 4.24 es de las más importantes ya que da la distancia mínima en que pueden estar dos puntos en la preparación para que aparezcan resueltos en la imagen.

Por tanto, cuanto mayor sea la apertura numérica AN y menor sea la longitud de onda de la luz con que se efectúa la observación, más elevado será el poder de resolución del microscopio.

Para reducir la longitud de onda λ , se podría trabajar con luz ultravioleta (de promedio $\lambda = 200$ nm), pero esto implicaría trabajar con ópticas de cuarzo y con pantallas fluorescentes o con placas fotográficas para recoger la imagen, ya que la luz ultravioleta es invisible y nociva para al ojo.

Para este mismo afán de disminuir λ , existen los microscopios electrónicos a causa de la longitud de onda asociada a un electrón. Según De Broglie una partícula, por el hecho de moverse, tiene siempre asociada una onda cuya longitud de onda es

$$\lambda = \frac{h}{m V}$$

siendo h una constante, m la masa y V la velocidad. Cuando ésta esté acelerada a 50 Kv se dice que: $\lambda = 0,005$ nm.

Todo esto ha constituido la gran revolución de las últimas décadas en el campo de la microscopía general.

Volviendo a la microscopía óptica con luz visible es posible mejorar la resolución aumentando solo al máximo la apertura numérica. Se puede conseguir aumentar el ángulo de apertura y el índice de refracción del medio donde se coloca el objeto.

El medio óptico que rellena el espacio entre el objeto y el objetivo se llama líquido de inmersión y el índice de refracción es cercano al del cristal. En calidad de líquidos de inmersión se utiliza el agua, la glicerina, el aceite de cedro, el monobromonaftaleno, etc.

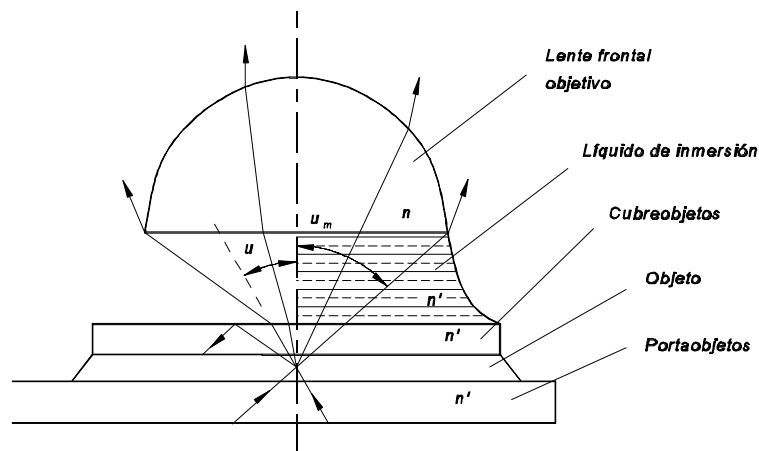


Fig. 4.36

En la figura 4.36 se muestra el papel del líquido de inmersión en el microscopio y se utiliza un cubreobjetos. A la izquierda, se representa un sistema seco, y a la derecha uno de inmersión; ambos sistemas no son energéticamente equivalentes. En el sistema seco, el flujo luminoso está limitado por el

ángulo sólido determinado por el ángulo u , mientras que en el de inmersión está limitado por el ángulo de apertura, u_m .

Es evidente que $u_m > u$, ya que no hay ningún fenómeno de reflexión total que limite u_m ; además, las pérdidas por reflexión interna son superiores en el objetivo seco, ya que dependen de las diferencias de índice de refracción cristal-aire y son siempre mayores que las diferencias cristal-líquido de inmersión.

De esta manera, con una misma fuente de luz y los mismos ángulos de apertura del condensador, el flujo luminoso que entra en la pupila de entrada de un microscopio con objetivo de inmersión será mayor que el flujo luminoso que entra en esta pupila con objetivo seco. Además, y tal y como se ha demostrado antes, y esto es lo más importante, el objetivo de inmersión asegura al microscopio un poder separador mayor, porque para cada punto se obtiene una mancha de difracción menor y porque se tiene una corrección mejor de las aberraciones.

2. Poder de resolución respecto al ojo

La curva de Arnulf y las reglas que de ella se derivan hacen que se tengan que distinguir dos casos según el valor del radio de la pupila del ojo (p):

a) $p > 1 \text{ mm}$

Aproximadamente, se tiene

$$\epsilon_0 = 1,4^{11} \approx 4 \cdot 10^{84}$$

Como que

$$\alpha^1 = P AB$$

AB es el ángulo lineal de la mira.

La condición se escribe

$$P AB \geq 4 \cdot 10^{84} \quad \text{o} \quad AB \geq \frac{4 \cdot 10^{84}}{P}$$

Dicho de otra manera, el límite lineal de resolución r es dado por la relación

$$r = \frac{4 \cdot 10^{84}}{P} m \quad (4.25)$$

que debe ser mayor que el poder de resolución propio del objetivo; o lo que es igual:

$$r \leq 0,61 \frac{\lambda}{n \operatorname{sen} u} \quad (4.26)$$

Por ejemplo, si se tiene

$$n \operatorname{sen} u = 0,15 \quad i \quad P = 100$$

da

$$R') = \frac{n \operatorname{sen} u}{P} = \frac{0,15}{100} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Si la pupila del ojo tiene 2 mm el radio es $p = 1 \text{ mm}$. Se trata, por tanto, del caso en que $p \geq 1 \text{ mm}$, y se tiene, según (4.25), un $r = 4 \cdot 10^{-6} \text{ mm} = 4 \mu\text{m}$. este caso corresponde también al de la lupa, ya que la pupila de salida es la pupila natural del ojo, y el radio de la pupila del ojo es superior a 1 mm en todos los casos.

b) $p < 1 \text{ mm}$

ϵ_0 depende de p , es decir, del radio del círculo ocular que juega el papel de pupila artificial del ojo.

En cada caso particular es necesario calcular P en milímetros, después determinar ϵ_0 sobre la curva de Arnulf, expresada en radianes, y resolver la desigualdad $\alpha' \geq \epsilon_0$, después de haber substituido ϵ_0 por su valor y α' para su expresión $\alpha' = P \cdot AB$

Pero se pueden hacer unas consideraciones generales muy importantes. En efecto, $\alpha' \geq \epsilon_0$, por tanto, análogamente al caso anterior el límite lineal de resolución debido al ojo será

$$r = \frac{\epsilon_0}{P} \quad (4.27)$$

Se expresa ϵ_0 en radianes, P en dioptrías y, por tanto, r en metros.

En el caso extremo en que la diafragmación artificial del ojo es $p = 0,25 \text{ mm}$, $\epsilon_0 = 12 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$; entonces:

$$r = \frac{12 \cdot 10^{-4} \text{ rad}}{P} \text{ m} \leq 0,61 \frac{\lambda}{AN}$$

3. Potencia y aumento de resolución

Para utilizar plenamente el poder de resolución de un microscopio es necesaria una concordancia con el poder de resolución del ojo, que es el que impone las mínimas condiciones de trabajo al instrumento.

En el caso de total concordancia, se debe comprobar que

$$r_{\text{microscopio sol}} = r_{\text{microscopio + ojo}}$$

o, lo que es lo mismo, que

$$\frac{\epsilon_0}{P} = 0,61 \frac{\lambda}{AN} \quad (4.28)$$

Con esto se obtiene una potencia de resolución o potencia útil:

$$P_u = \frac{\epsilon_0}{0,61 \lambda} AN \quad (4.29)$$

Para

$$p \geq 1 \text{ mm} , \quad \epsilon_0 = 4 \cdot 10^{84} \text{ rad}$$

y como

$$\lambda = 550 \text{ nm}$$

$$P_u = \frac{4 \cdot 10^{84} \text{ rad}}{0,61 \cdot 550 \cdot 10^{-9} \text{ m}} AN \approx 1.200 AN \quad (4.30)$$

y el aumento de resolución útil será

$$Mn = 300 AN$$

Para $p < 1 \text{ mm}$ este valor debe ser mayor; así, en el caso extremo que

$$P = 0,25 \text{ mm} \quad \epsilon_0 = 12 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

se obtiene una potencia de resolución denominada potencia óptica, P_0 , y un aumento de resolución óptimo, A'_0 ,

$$P_0 = 4.800 \text{ An} \quad M'_0 = 1.200 \text{ An}$$

El intervalo entre $1200 \text{ AN} < P_u < 4800 \text{ AN}$ o $300 \text{ AN} < Mu < 1200 \text{ AN}$ se denomina, respectivamente, zona de potencia o aumento útil. En la práctica, se suele tomar como zona de potencia útil un intervalo más pequeño:

$$500 \text{ M} < Mu' < 1.000 \text{ AN}$$

Esta es la zona de aumentos aconsejable en un microscopio. El sentido es que un aumento útil inferior a 500 AN no permite, en general, revelar toda la información sobre el objeto de observación; en cambio, si es mayor de 1.000 AN resulta inútil. Es la zona de aumentos vacíos ya que no resuelven más la estructura del objeto y en cambio se pierde la claridad en la imagen y disminuye el campo de observación; es como una ampliación fotográfica: lo que no esté resuelto en el negativo no lo estará en la ampliación.

4.4.3 Componentes ópticos de los microscopios

Los sistemas ópticos de los microscopios constan de las partes siguientes: objetivos, oculares, condensadores y colectores. El objetivo y el ocular forman el sistema de observación del microscopio.

1. Objetivos

a) *Generalidades*. De todo lo que se ha dicho hasta ahora se desprende que un microscopio trabaja con una apertura grande y un campo pequeño.

Tomando como ejemplo un microscopio mediano para el cual $P_0 = 1.200$

Por tanto, de $P_0 = 4.000 n \text{ sen } u = 1.200$, se obtiene si $n = 1$ y $n \text{ sen } u = \text{sen } u = 0,3$,

Y como se tiene

$$\frac{R_1}{f'_1} = n \text{ sen } u$$

se deduce que

$$2 R_1 = 0,6 f_1 = \frac{f_1}{1,67}$$

Este objetivo de apertura numérica relativamente pequeña, 0,3, trabaja a $f_1 / 1,67$, que en fotografía sería una apertura muy grande; en cambio el campo es pequeño. Si $T' = 0,25 \text{ rad}$, el radio AB del campo, en el plano de objeto, tiene el valor $AB = tg T'/P$.

Si

$$tg \omega \approx 0,25 \quad P = 1.200$$

$$AB = \frac{1}{4} 800 \approx 0,2 \text{ mm}$$

Si

$$P_2 = 40 \quad y \quad t = 150 \text{ mm}$$

$$m_1 = \frac{t}{f_1} = 30 \quad f_1 = 5 \text{ mm}$$

La inclinación del rayo de campo BB_1 (Fig. 4.26) es por tanto igual a

$$\frac{0,2}{5} = \frac{4}{100} \text{ rad}$$

es decir, muy pequeña, y por tanto las aberraciones de campo casi no influyen en la calidad de la imagen. Así pues, el objetivo, la pieza fundamental del microscopio, tiene que estar corregido de las aberraciones cromáticas de posición y de las de apertura (aberración esférica y coma) y debe satisfacer la condición del seno de Abbe ya que tiene que ser aplanático. Esto es, por otro lado, más difícil cuanto mayor sea la apertura numérica del objetivo.

b) *Tipos diversos.* Tal y como se ha ido diciendo durante todo el capítulo, las características fundamentales de los objetivos de los microscopios son el aumento y la apertura numérica. Los objetivos

más difusos tienen un aumento lateral entre 3 y 100, y una apertura numérica entre 0,01 y 1,40.

Se pueden distinguir dos categorías según que $n \operatorname{sen} u$ sea superior a 0,3 o no:

Si $n \operatorname{sen} u < 0,3$

Los de más baja potencia están formados por un doblete acromático (Fig. 4.37) con una lente flint al principio.

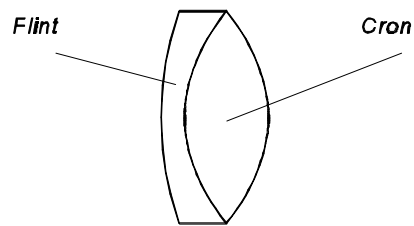


Fig. 4.37

Este objetivo puede dar aumentos hasta 5:1 con una apertura de 0,1. Se puede corregir como los objetivos de los telescopios de esférica y cromática longitudinal, y se puede encontrar una pareja adecuada de cristales para que además se cumpla la condición del seno.

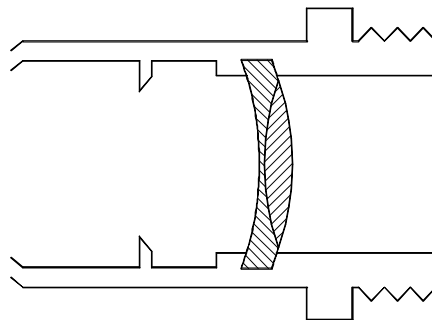


Fig. 4.38

El objetivo de Lister se compone de dos acromáticos (Fig. 4.38), que bastan para asegurar la corrección de las aberraciones porque tienen la apertura relativa pequeña, de 0,25, y poco aumento, 12:1.

Está montado de manera que el foco imagen del primer doblete coincida con el plano principal objeto del segundo doblete. El foco imagen del conjunto se encuentra, por tanto, en el plano principal imagen del segundo doblete, que es sensiblemente el plano de un diafragma que sirve de pupila de salida. La posición del objeto se calcula de manera que esté en uno de los denominados puntos de Lister; de esta manera se obtiene una imagen corregida de aberración esférica. Si, además, cada doblete está corregido de aberración cromática de posición, se tendrá corregida, también, la cromática de aumento en este montaje.

Si $n \sin u > 0,3$

Como objetivo típico de aumento mediano hay el de Amici (Fig. 4.39), que tiene una lente frontal de media esfera y a continuación dos dobletes, con los cuales se puede llegar a $30:1$ y $AN = 0,60$.

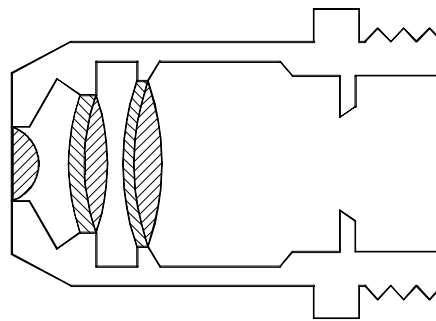


Fig. 4.39

Los objetivos de esta zona de aperturas son modificaciones del de Amici. Generalmente están formados por cuatro lentes como mínimo (Fig. 4.40). La lente más cercana al objeto (lente frontal) es de media bola y permite utilizar las propiedades de los puntos aplanáticos del dioptrio esférico, al menos aproximadamente, ya que la cara plana introduce sus propias aberraciones.

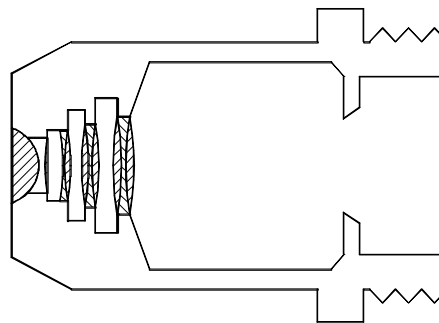


Fig. 4.40

A la salida de la lente frontal, los rayos son mucho menos abiertos y es más fácil corregir las aberraciones. Se debe tener presente la extraordinaria pequeñez de la lente frontal hemisférica: el diámetro de la cara de entrada acostumbra a ser del orden de un milímetro.

Si detrás de la lente frontal de media esfera se pone un menisco aplanático y dos tripletes se puede llegar a $60:1$ y a $AN = 0,80$.

Como objetivos de alta potencia hay los de inmersión homogénea (con índices iguales de refracción para el cubreobjetos, el líquido inmersor y la lente frontal), con una estructura parecida a la de la figura 4.41.

Con estos objetivos se puede llegar a $120:1$ y $Mu = 1,45$. La lente frontal es mayor que media esfera. Las lentes positivas de los tripletes suelen ser de fluorita para poder conseguir el apocromatismo, indispensable en estos tipos de objetivos.

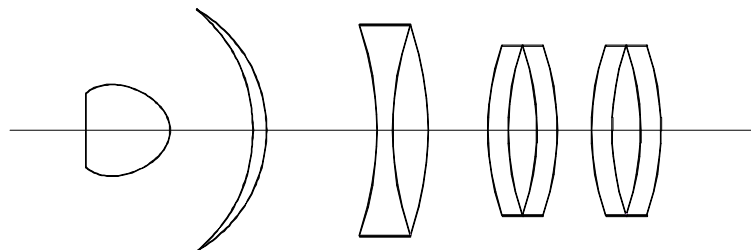


Fig. 4.41

La inmersión (introducción de un líquido que llena el espacio entre la lente frontal del objetivo y el cubreobjetos de la preparación) fue introducida por Amici para aminorar los efectos de las irregularidades del cubreobjetos; más tarde, Abbe descubrió la importancia, ya analizada en el apartado anterior, al aumentar la apertura numérica y el aprovechamiento fotométrico del objetivo.

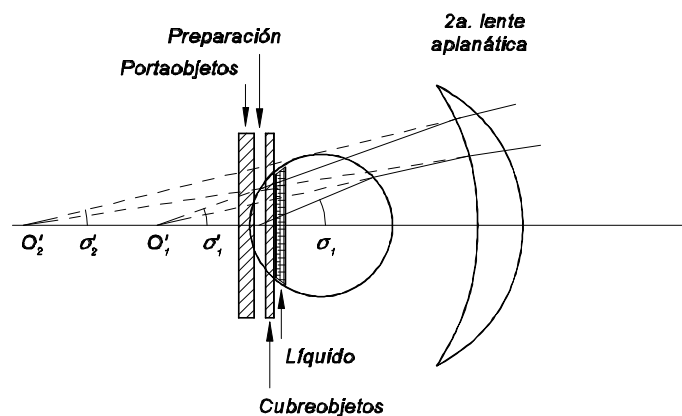
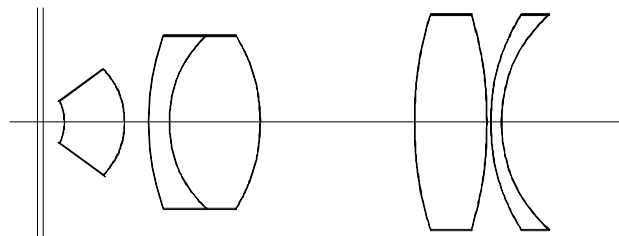


Fig. 4.42

La figura 4.42 muestra los efectos de la inmersión, que consiste en conseguir que el punto aplanático interior a la esfera de la lente frontal esté en el objeto. Esto, que en los objetivos secos es imposible, ya que sería necesario introducir el objeto dentro del cristal, se realiza fácilmente con la inmersión homogénea que consigue, al tener todos los medios con el mismo índice, incluso el de la preparación, una prolongación de la primera lente del objetivo.

Del objeto O_1 , se obtiene una primera imagen virtual O'_1 en el segundo punto aplanático, cosa que significa una imagen libre de aberración esférica y de coma. Esta imagen la recoge una segunda lente aplanática, cuyo primer dioptrio tiene su centro en O'_1 , mientras que el segundo tiene en O'_1 su primer punto aplanático. Con todo esto se llega a la imagen O'_2 que es libre a la vez de esférica y de coma, pero que tiene aberraciones cromáticas considerables, y para corregirlas es necesario todo el sistema que va detrás de la figura 4.41. En estos objetivos el ángulo u_1 es prácticamente de 90° .

Desde hace poco tiempo, y para pocos aumentos, se fabrican objetivos de microscopio con espejos, el montaje Casegrain minimizado (Fig. 4.43). Con esto se cortan los defectos de cromatismo.



Planacromático 40x

Fig. 4.43

Existen los objetivos corregidos respecto a la curvatura de la imagen: son los denominados plano-cromáticos y plano-apocromáticos. Tienen como rasgo distintivo la presencia en el sistema de un componente negativo, o de un menisco grueso. Se fabrican con límites de aumentos y aperturas numéricas desde 6/0,15 (secos) hasta 100/1,35 (de inmersión) (Fig. 4.44).

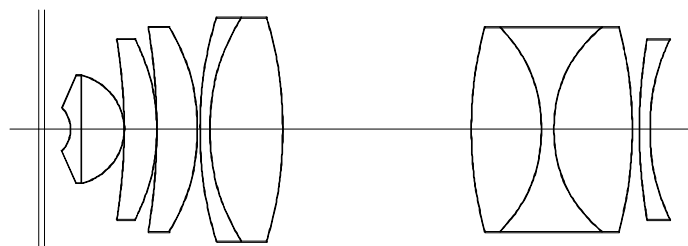


Fig. 4.44

2. Oculares

En los oculares de un microscopio, la búsqueda de un gran campo no es tan esencial como por ejemplo en los anteojos terrestres, ya que el ángulo de campo de los rayos procedentes del objeto que llegan al ocular es siempre muy pequeño. A pesar de ello, se suelen utilizar los oculares Huygens porque el campo de nitidez es superior para una misma calidad de imágenes, y ayuda a compensar el cromatismo de aumento en los objetivos acromáticos de gran aumento, apocromáticos y plano-objetivos.

Los oculares de Ramsden solo se utilizan cuando el microscopio debe llevar un ocular micrométrico para poder medir con precisión las longitudes situadas en el plano objeto. El micrómetro, en efecto, tiene que estar en el plano de la imagen real del objetivo, pero hace falta también que su imagen sea buena, que esté en el plano focal objeto del ocular y no en el plano focal objeto de la lente de ojo, como pasaría en un ocular negativo.

Cuando se quiera medir con precisión la dimensión de un objeto a través de su imagen se utilizará un ocular ortoscópico.

En los microscopios muy potentes, sobre todo con los objetivos de inmersión, se utilizan los oculares de compensación, que se calculan de forma que compensen las aberraciones residuales que afectan a la imagen objetiva, sobre todo la aberración cromática de aumento que acaba por no ser despreciable cuando la apertura y la potencia se hacen muy grandes. Uno de los elementos de estos oculares debe ser necesariamente un doblete pegado.

Para la microproyección y la microfotografía se utilizan oculares de proyección con aumento lateral entre 7 y 40, y campo visual de 12 a 18 mm. Se calculan como los sistemas de proyección y tienen distancias focales entre 17 y 36 mm.

Para obtener la imagen real de un objeto en una pantalla, en la capa fotosensible de la película o en el tubo analizador de televisión se debe variar la disposición recíproca del objetivo y del ocular, de manera que la imagen objetiva y_1 se forme antes que el foco objeto del ocular. Esto se consigue desplazando el ocular respecto al objetivo. Si la distancia desplazada es z_2 , la imagen real final se formará a una distancia $f'_2 + z'_2$, donde

$$z_2 = \frac{f_2 f_2}{z_2}$$

Por tanto, el aumento lateral del microscopio de proyección será

$$m = m_1 m_2 = m_1 \frac{z_2}{f_2} \quad (4.33)$$

En microfotografía, la distancia $f'_2 + z'_2$ se denomina longitud de cámara.

3. Condensadores

La mayoría de los objetos que se observan mediante un microscopio deben estar iluminados, con un sistema de iluminación, que asegure el mantenimiento del poder separador del microscopio y la obtención de una imagen uniformemente iluminada, bien contrastada.

En función de los objetos que se observan, la iluminación se realiza tanto en campo claro como en campo oscuro por transparencia, cuando la preparación es transparente, o por reflexión, cuando es opaca, como en el caso de los microscopios metalográficos o petrográficos.

La iluminación, según el método del campo claro, se efectúa con los rayos que se desprenden de la fuente de luz y pasan a través de un objeto transparente, o bien que se reflejan en un objeto opaco, y que más tarde llegan a la lente frontal del objetivo. Con ello, el fondo sobre el cual se observa el objeto es claro.

La iluminación, según el método del campo oscuro, se realiza por los rayos difractados difusamente por el objeto. Los rayos que salen de la fuente de luz no pueden llegar directamente al objetivo. Por esta razón, al iluminar según este método las partes del objeto que tienen la debida iluminación respecto al objetivo parecen más claras que las partes en que los rayos de luz no llegan al objetivo. La imagen de estas partes y el fondo quedan oscuros.

En ambos métodos existe, como parte fundamental del sistema de iluminación, el condensador, que es un sistema óptico que tiene por misión dirigir la luz de la fuente puntual o extensa hacia la preparación para iluminarla.

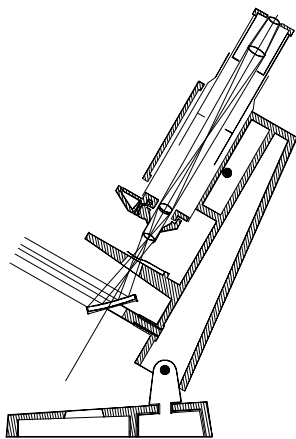


Fig. 4.45

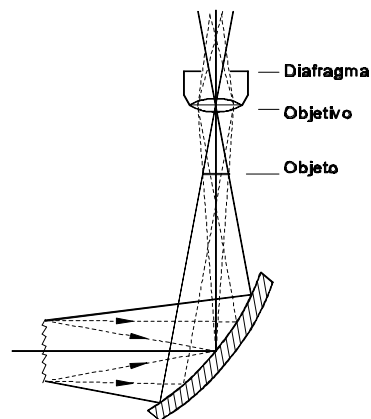


Fig. 4.46

Los sistemas de condensación más sencillos están formados solo por un espejo plano o por un espejo cóncavo (Fig. 4.45 y 4.46), según sea una fuente de luz lejana grande (luz diurna) o cercana y pequeña (fuente artificial), que son utilizados solo con objetivos de baja apertura, hasta a 0,1.

Pero en general, y para objetivos de mayor apertura, se utilizan combinaciones con un sistema dióptrico, que es el condensador propiamente dicho.

Los condensadores llevan un diafragma iris (diafragma de apertura) para regular la apertura del haz de iluminación, ya que debe coincidir con la apertura del objetivo con que trabaja, porque si no consiguen llenar el diámetro del objetivo se pierde el poder de resolución de este, y si lo excede se producen reflexiones parásitas que siempre hacen disminuir la calidad de la imagen. El condensador funciona como un objetivo invertido, pero sin tantas exigencias de corrección.

Las figuras 4.47 y 4.48 representan condensadores con diferente complejidad.

Cuando la preparación es opaca, la iluminación se hace a través del objetivo (epiiluminación o iluminación por encima de la preparación), con un sistema lateral y una lámina semitransparente, tal y como se indica en la figura 4.49.

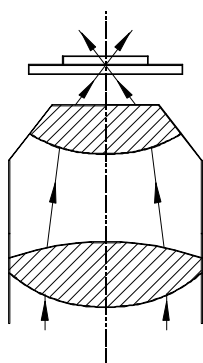


Fig. 4.47

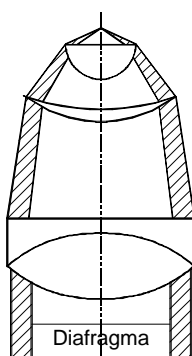


Fig. 4.48

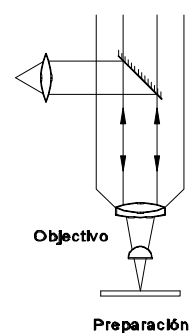


Fig. 4.49

Con los tipos de condensadores descritos hasta ahora se puede realizar el llamado sistema de iluminación crítica, que consiste en proyectar mediante el condensador la imagen de una fuente extensa de luz (un filamento de bombilla, o un filtro difusor delante de ella, lámpara opal, lámpara de mercurio, etc.), sobre la preparación (Fig. 4.50). Sin embargo, la fuente de luz en la iluminación crítica puede imponer su estructura geométrica en la preparación, lo cual se puede evitar poniendo

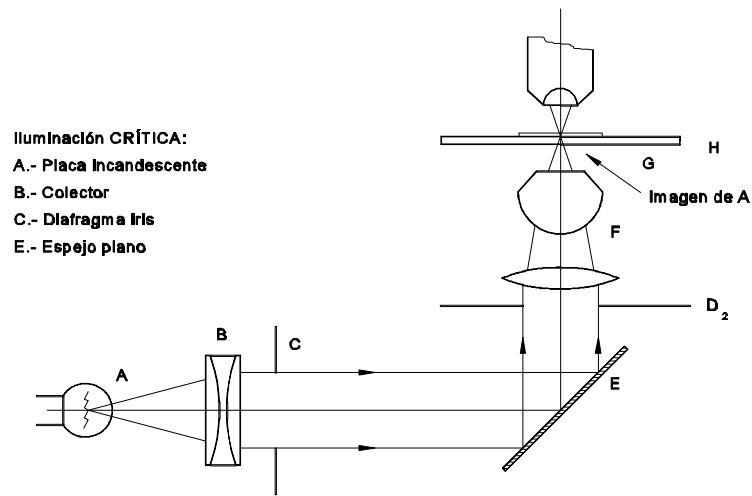


Fig. 4.50

filtros difusores en el sistema de iluminación. Pero si se quiere aprovechar al máximo la energía luminosa emitida, por ejemplo, por el filamento de una lámpara y si se quiere que su geometría no se imponga a la iluminación de la preparación, es necesario pasar a la llamada iluminación Köhler (Fig. 4.51).

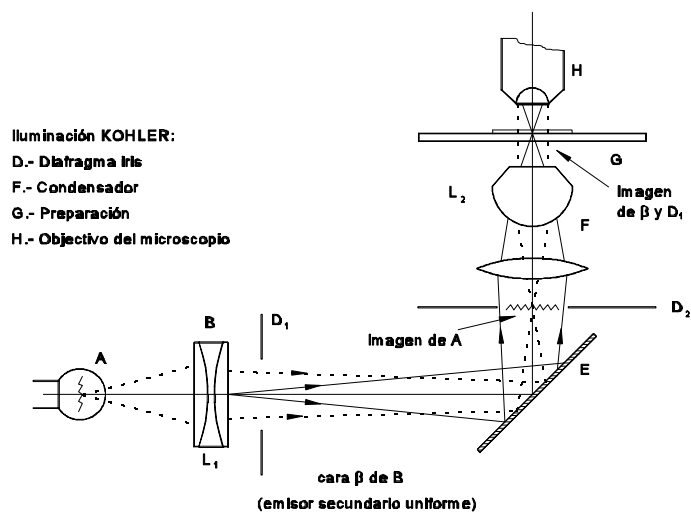


Fig. 4.51

Para realizarla es necesario añadir al condensador propiamente dicho un sistema dióptrico, el colector (L_1 en la figura 4.51), que proyecta el filamento de la lámpara en un plano diferente al de la preparación, concretamente en el plano focal objeto del condensador (L_2 en la figura 4.51), que tiene la misión de proyectar a la vez el diafragma de campo D' . Abriendo o cerrando D_1 se ilumina justamente la zona de la preparación que se quiere observar, y así se evitan haces parásitos difusores que hacen mermar mucho el poder resolutivo del microscopio al disminuir los contrastes de la imagen.

El diafragma D_2 situado en el foco objeto del condensador continúa siendo el diafragma de apertura del sistema, porque abriendo y cerrando el diafragma se consigue que más o menos puntos del filamento de la lámpara contribuyan a la iluminación de cada punto de la preparación, aparte de controlar el ángulo de apertura del cono de luz que entra en el objetivo de cada uno de ellos, y permite tal y como hemos dicho antes adaptarlos exactamente a su apertura numérica.

Los condensadores de campo oscuro, como utilizan el método de iluminación lateral (o dispositivo de Siszsigmondy), dan el carácter de ultramicroscopio al microscopio, mal llamado así ya que no le confiere ni más poder resolutivo ni más aumentos.

Este tipo de iluminación se puede obtener con un condensador que tenga una apertura numérica mucho mayor que la del objetivo, ya que obtura la parte central del haz. La figura 4.52 representa un condensador que opera en estas condiciones. Es el llamado condensador paraboloide, que consiste en un bloque de cristal en forma de paraboloide interiormente espejado. Un sistema previo produce luz paralela que después va estigmáticamente al foco del paraboloide, donde se encuentra la preparación. Si se obtura con un disco opaco, D , la parte central, se priva al objetivo de luz directa.

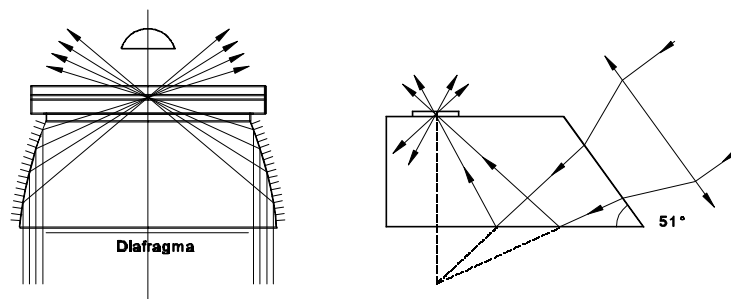


Fig. 4.52

Para este mismo fin existen otros dispositivos como el condensador cardiode.