

Introducción

Evolución del vidrio y de la óptica oftálmica

La existencia del vidrio se remonta a las antiguas civilizaciones. Ya los egipcios, 1.500 años antes de Cristo lo utilizaban como esmalte, y en el Antiguo Testamento aparecen referencias sobre la utilización del vidrio en utensilios domésticos. Durante el imperio romano, además de surgir las teorías emisionistas e inmisionistas de la visión por parte de filósofos y eruditos como Pitágoras, Sócrates, Platón y Aristóteles, se descubre la propiedad del vidrio de variar el tamaño de las imágenes.

Hacia el siglo X, en el imperio árabe, Alhazen, después de estudiar a griegos y romanos, en su *Optice Thesaurus*, explica las leyes de la refracción de medios gruesos a delgados, y estudia la visión binocular.

Ya en Europa, el monje franciscano Roger Bacon, en su *Opus Major* (1267), reconoce la utilidad de los segmentos de esfera de vidrio como «útil instrumento para las personas ancianas y aquellas que tienen los ojos débiles, pues ellas pueden ver así letras pequeñas con grandor suficiente». Cuando se inventan las gafas, a finales del siglo XIII, sólo son utilizadas por los monjes en visión próxima. Son, pues, gafas de presbicia y generalmente con lentes de geometría biconvexa, sin un diseño determinado.

Las gafas más antiguas que se conservan, halladas en 1953 en el monasterio de Wienhausen, son de madera de tilo, una de las lentes es biconvexa de +3,75 D y color amarillo, y la otra verde y de potencia +3,00 D. La diferencia de tonos del vidrio y de simetría en las potencias demuestra la dificultad en la fabricación de vidrio transparente, y que las lentes se aparejaban por aumentos parecidos una vez pulidas.

A mediados del siglo XV, con la invención de la imprenta, los libros salen del ámbito monacal, al popularizarse la lectura, y empiezan a pintarse retratos de «civiles» con gafas, pero siempre para visión próxima. Sólo a finales de este siglo empiezan a utilizarse las lentes cóncavas para visión lejana.

Durante el siglo XVI, se inician los estudios sobre la visión (Maurolico, Della Porta, Platter), pero no es hasta el siglo XVII, con Kepler, Snell, Descartes, y Scheider entre otros, cuando se estudia el sistema dióptrico del ojo.

Daza de Valdés, en 1623, escribe el libro *Uso de los antoios para todo género de vistas*, donde se diferencia la miopía de la presbicia, y se describen distintos grados de ametropía. De esta misma época es el retrato, pintado por Velázquez, de Quevedo con gafas de muelle y lentes negativas, a partir del que todavía hoy se conoce este tipo de gafas como «quevedos».

A principios del siglo XIX, Young describe el astigmatismo a partir del estudio de su propio ojo; será resuelto matemáticamente por Sturm, y corregido con lentes planocilíndricas por Airy. También en esta época, Wollaston plantea la corrección de las aberraciones oblicuas en las lentes oftálmicas, pero las soluciones que obtiene no son fabricables, por no disponer de la tecnología necesaria.

A mediados del siglo XIX, Petzval (1840) diseña para el óptico vienés Vöigtlander, el primer objetivo doble, y establece la condición de anastigmatismo y aplanatismo de campo, que aún son vigentes. Por este motivo, las lentes exentas de curvatura de campo, también llamadas aplanáticas, se conocen como lentes de Petzval.

A finales del siglo XIX se establecen las bases de lo que es la óptica fisiológica moderna (Purkinje, Listing, Von Helmholtz, Javal y Donders). Ostwald replantea los estudios de Wollaston y halla solución al astigmatismo marginal.

Ya entrado el siglo XX, Von Rohr, a partir de los estudios de Tscherning, fabrica las primeras lentes menisco, conocidas como lentes puntuales, que son comercializadas por Zeiss. Durante todo este siglo se han estado utilizando variaciones sobre estos primeros diseños, hasta que la aparición de generadores de superficies ópticas por control numérico permite, desde hace 15 años, la utilización de superficies esféricas en lentes oftálmicas.

Capítulo 1

Fabricación de lentes oftálmicas

J. Caum, M. Lupón

En este capítulo se presentan los materiales utilizados para la fabricación de lentes y prismas (vidrio y plásticos), y se analizan sus propiedades no de forma exhaustiva, puesto que existe una extensa bibliografía que se ocupa de ello, sino exclusivamente haciendo referencia a aquellas características de aplicación directa en la óptica oftálmica.

Vidrio inorgánico

El vidrio utilizado en óptica oftálmica es un material formado por la fusión de óxidos inorgánicos, de los cuales la sílice normalmente es una parte sustancial. Debe ser incoloro, con un valor definido de índice de refracción, libre de burbujas, nódulos, estrías y tensiones, y altamente transparente y homogéneo. La facilidad con que se pueden trabajar sus superficies y el hecho de que sea transparente a la radiación visible lo hacen especialmente adecuado para su utilización en la compensación.

21

1.1 Tipos de vidrio óptico y propiedades

Propiedades ópticas

Índice de refracción

El índice de refracción caracteriza el medio por el que se propaga la luz y se define como

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío (aprox. 300.000 km/s), y v la velocidad de la luz en el medio de propagación, siempre inferior a c , con lo que n siempre es un número superior a 1.

Para cuantificarlo debemos referirlo a una longitud de onda determinada (λ), y para ello se asigna un subíndice que la indica (n_λ). Los más comúnmente utilizados en óptica oftálmica son n_d y n_e , que corresponden respectivamente a la línea amarilla del helio y a la línea verde del mercurio.

La exactitud en el valor del índice de refracción en medidas estándar es de $\pm 3 \cdot 10^{-5}$, en medidas de precisión de $\pm 10^{-5}$, y en medidas de alta precisión de $\pm 5 \cdot 10^{-6}$. Para conocer el índice de refracción para una longitud de onda determinada, con una precisión de $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ en el visible, podemos utilizar la fórmula expresada en la ecuación (1.2) donde A_i son constantes estipuladas en función del tipo de vidrio.

$$n^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \quad (1.2)$$

En la tabla 1.1 se indican las longitudes de onda con las que se opera más frecuentemente, con su notación.

Tabla 1.1

| Línea espectral | λ (nm) | Color | Elemento |
|-----------------|----------------|----------|----------|
| F' | 479,9914 | azul | Cd |
| F | 486,1327 | azul | H |
| e | 546,0740 | verde | Hg |
| d | 587,5618 | amarillo | He |
| C' | 643,8469 | rojo | Cd |
| C | 656,2725 | rojo | H |

El vidrio oftálmico toma valores de n_d que oscilan entre 1.52300 y 1.88500. Como veremos más adelante esta propiedad está fuertemente relacionada con la densidad del material y será uno de los factores determinantes a la hora de escoger un material. Los índices elevados implican dioptrios de curvas planas, por lo tanto las lentes de alto índice son más delgadas que las de bajo índice.

Dispersión relativa. Número de Abbe

La dispersión es un fenómeno que pone de manifiesto que el índice de refracción depende de la longitud de onda (1.3).

$$D = \frac{dn}{d\lambda} = \frac{n_F - n_C}{n_d - 1} \quad (1.3)$$

En óptica oftálmica, sin embargo, se utiliza habitualmente su valor inverso, que se denomina número de Abbe y se simboliza por una v , porque es mucho más fácil de manejar (1.4). Tanto la dispersión relativa como el número de Abbe, son adimensionales. Valores elevados de v indican menor dispersión que los valores menores, y son los más deseables en lentes oftálmicas.

$$v_d = \frac{1}{D} = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1.4)$$

Tradicionalmente se ha establecido una clasificación en dos grandes grupos de vidrio según el valor del número de Abbe: *crown* cuando $v \geq 50$, y *flint* cuando $v < 50$.

La exactitud requerida para la dispersión en medidas estándares, de precisión y de alta precisión, es de $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, $\pm 3 \cdot 10^{-6}$, $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ respectivamente.

Transmisión. Reflexión. Absorción

Cuando un haz de luz incide sobre una superficie transparente y lisa como lo es la de un dioptrio, una parte se transmite o refracta, otra parte es reflejada y otra parte la absorbe el material (también pueden ocurrir otros fenómenos como la difusión, la polarización o las interferencias a los que no haremos referencia). En función de lo expuesto, el flujo incidente (Φ) puede expresarse como sigue:

$$\phi = \phi_T + \phi_R + \phi_A \quad (1.5)$$

donde Φ_T , Φ_R y Φ_A son los flujos transmitido, reflejado y absorbido respectivamente. A partir de la relación entre cada uno de estos flujos y el flujo total, se definen los coeficientes de transmisión o transmitancia (T), de reflexión o reflectancia (R) y de absorción o absorptancia (A):

$$T = \frac{\phi_T}{\phi}; R = \frac{\phi_R}{\phi}; A = \frac{\phi_A}{\phi} \quad (1.6)$$

de manera que $T + R + A = 1$.

Cuando la luz incidente es monocromática, existe otra expresión para el coeficiente de reflexión R, calculado a partir de la fórmula de Fresnel:

$$R = \left(\frac{n - n'}{n + n'} \right)^2 \quad (1.7) \quad \text{—————} \quad 23$$

donde n es el índice de refracción del vidrio, y n' el índice de refracción del medio incidente. Para un vidrio de índice n, sumergido en aire:

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (1.8)$$

Cuando queremos saber la reflectancia total en un sistema de m superficies, si consideramos nula la absorción, la expresión que se utiliza es:

$$R = 1 - \left[1 - \left(\frac{n - n'}{n + n'} \right)^2 \right]^m \quad (1.9)$$

En óptica oftálmica cuando nos movemos en el rango del visible son importantes sobretodo T y R, y se puede despreciar A. Al tratar las lentes de protección frente a la radiación veremos que el rango de espectro que nos ocupa es más amplio (incluye el ultravioleta y el infrarrojo) y la absorptancia tomará mayor relevancia. De la expresión (1.7) se desprende que cuanto más elevado es el índice de refracción, mayores son las pérdidas por reflexión. Para un vidrio de índice 1.500, $R = 0,04$. Esto quiere decir que las pérdidas de luz por reflexión en cada superficie de una lente fabricada con dicho vidrio son del 4%. En la tabla 1.2 se indica el porcentaje de pérdidas por reflexión en una lente, en función del índice del material y, en consecuencia, el porcentaje de transmisión.

Tabla 1.2 Porcentajes de reflexión en función del material

| n | % R | % T |
|-------|--------|--------|
| 1.523 | 8.41% | 91.59% |
| 1.600 | 10.37% | 89.63% |
| 1.700 | 13.00% | 87.00% |

Propiedades físicas

Densidad

Es la relación entre la masa y el volumen que ocupa. Se expresa generalmente en g/cm^3 y a una temperatura de 25°C . Este parámetro está directamente relacionado con el peso y, por lo tanto, es importante tenerlo en cuenta. En general se asocia densidad elevada a alto índice de refracción y elevada dispersión (bajo número de Abbe) pero, como veremos más adelante, actualmente se consiguen materiales densos con un valor de número de Abbe medio y materiales muy ligeros con índice de refracción medio.

Coefficiente de dilatación lineal. Conductividad térmica

24

La conductividad térmica es la cantidad de calor transmitido durante un tiempo y para un intervalo de temperaturas determinados, en la dirección perpendicular a la superficie. El vidrio es muy mal conductor a bajas temperaturas (vidrio en estado sólido) y por lo tanto se comporta como aislante térmico mientras que a temperaturas elevadas (hornos de fusión) tiene una conductividad térmica similar a la del hierro.

El coeficiente de dilatación térmica es la expresión del alargamiento del vidrio por unidad de longitud (l) con la variación de temperatura. Se expresa en $1/^\circ\text{C}$ en un intervalo de temperaturas que en vidrio óptico va de 25°C a 300°C .

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \quad (1.10)$$

Se trata de una característica importante en óptica oftálmica, puesto que influye en procesos como el templado térmico, la fusión, la fusión del segmento en bifocales, el recocido durante la fabricación del vidrio y el depósito de multicapas.

Viscosidad

La podemos definir como el rozamiento interno de los fluidos. Un sólido se supone que tiene viscosidad infinita mientras que a un fluido perfecto se le supone una viscosidad nula. Hablar de viscosidad del vidrio sólo tiene sentido durante su proceso de fabricación, a temperaturas que superan los 500°C , donde realmente será un parámetro que se debe controlar perfectamente. En la tabla 1.3 se muestra los valores de viscosidad de algunos materiales en comparación con la del vidrio a distintas temperaturas.

Tabla 1.3 Valores de viscosidad (en poisses) para distintos materiales

| Material | Viscosidad (P) |
|-----------------------|------------------|
| agua (a 20°C) | 0,01 |
| aceite oliva (a 20°C) | 0,98 |
| glicerina (a 20°C) | 2,34 |
| vidrio (a 20°C) | 10 ¹⁸ |
| vidrio (a 1500°C) | 100 |

El comportamiento del vidrio al aumentar la temperatura, y por tanto su proceso de fusión (figura 1.1), se ilustra mediante una curva característica de temperatura frente a una escala logarítmica de la viscosidad (en la tabla 1.3 se puede comprobar la necesidad de utilizar logη, debido al orden de magnitud de variación de la viscosidad en un intervalo de temperatura de 20°C a 1.500°C). En esta curva se ponen de manifiesto las temperaturas que corresponden a las viscosidades que debe tomar el vidrio en las distintas etapas de su fabricación: punto de transformación, punto de ablandamiento y punto de hundimiento, entre otros.

Elasticidad. Resistencia mecánica

El vidrio es un material elástico casi ideal pues cuando se aplica una fuerza externa y se deforma, una vez se deja de aplicar, recupera su forma inicial, aunque si la fuerza que se le aplica supera un límite determinado, se rompe. El valor de la fuerza aplicada que produce la fractura del vidrio se denomina resistencia mecánica, y su valor teórico es muy elevado; sin embargo su valor en los ensayos de laboratorio siempre es dos o tres órdenes de magnitud inferior, con lo que resulta un material frágil sobretodo frente a los golpes. Para conocer la resistencia mecánica de un vidrio, se somete a ensayos de compresión, tracción, flexión, impacto y de resistencia al choque térmico.

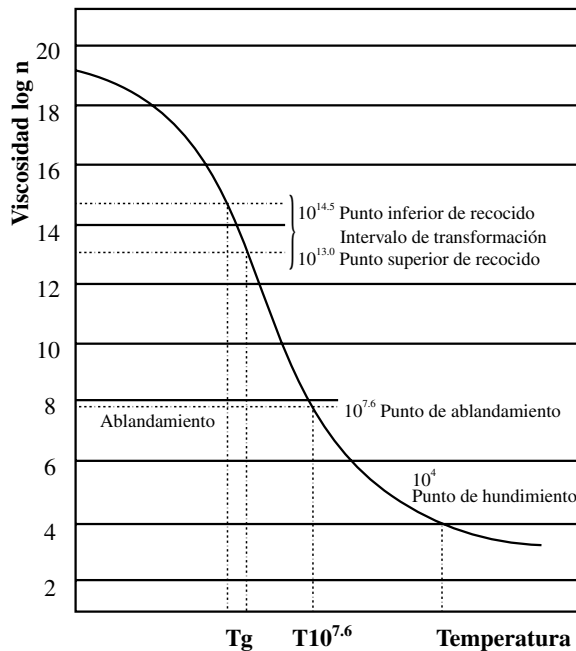


Fig. 1.1 Curva de viscosidad del vidrio en función de la temperatura

Dureza

En general al hablar de vidrio nos referimos a la dureza al rayado, que es la resistencia que opone el material a ser rayado, y a la dureza a la abrasión, que está relacionada con la facilidad con que puede tallarse. En la escala de dureza de Mohs, el vidrio se sitúa entre los valores 5 y 6.

Propiedades químicas

Resistencia al ataque químico y a los agentes atmosféricos

En general el vidrio es resistente a los productos químicos pero lo atacan el ácido fluorhídrico, el ácido fosfórico y los álcalis concentrados a elevada temperatura, y pierde transparencia. Asimismo, es resistente a los agentes atmosféricos y solamente es vulnerable si se somete a condiciones muy extremas de humedad y temperatura.

1.2 Requerimientos del vidrio ideal

El requisito más importante para el vidrio óptico es la homogeneidad en la composición química y en el estado físico. Además debe tener unos valores de índice y número de Abbe adecuados para su utilización y ser transparente e incoloro, libre de burbujas, estrías y cuerdas. También debe tener un elevado grado de estabilidad física y química (dureza, resistencia mecánica, poca dependencia de la temperatura).

Cuando se trata de condiciones ideales para lentes oftálmicas, básicamente nos referimos a los conceptos de estética, comodidad de uso y comodidad visual. Para ello es lógico pensar en superficies lo más planas posible, materiales ligeros (baja densidad), espesores delgados y calidad óptica (ausencia de aberraciones). Todo ello es difícil de reunir en un solo material y por eso es necesario encontrar una solución de compromiso que suponga el mayor número de ventajas con el menor número de inconvenientes.

26

1.3 Presentación del vidrio óptico: nomenclatura, catálogos y mapas

Para la clasificación del vidrio, los fabricantes se refieren preferentemente al índice de refracción y al número de Abbe. En las figuras 1.2a y 1.2b se muestra la información que proporcionan dos fabricantes de vidrio en el caso de un material *crown*.

Como se puede observar, los fabricantes aportan datos referentes a las propiedades tratadas anteriormente: índice de refracción para diferentes longitudes de onda, número de Abbe, densidad, coeficiente de dilatación lineal, conductividad térmica, viscosidad, dureza transmitancia, resistencia mecánica y química.

El fabricante Corning clasifica sus vidrios en *crown*, índices medios y elevados, *crown de bario*, y fotocromáticos. Utiliza un código identificador y especifica si el material es blanco o de color. Además de indicaciones sobre su utilización y tratamientos para la óptica oftálmica (bloques, segmentos, templado). También proporciona las curvas de transmitancia espectral para las longitudes de onda desde 250 nm hasta 1800 nm.

La firma Schott en su código utiliza unas letras que indican si el material es *crown* (K) o *flint* (F) y además caracteriza su composición (por ejemplo BAK = *crown de bario*). A continuación indica un número que especifica su posición en un mapa $n_d = f(v_d)$ del que posteriormente hablaremos. Por último incorpora seis dígitos, los tres primeros son los tres primeros decimales ajustados del n_d y los tres últimos indican el número de Abbe (número entero de dos cifras más el primer decimal ajustado). En la figura 1.3 se presenta un diagrama donde se agrupan los vidrios por familias, en función de la composición.

CORNING FRANCE Nº de Código: 800.01

TIPO DE VIDRIO

COLOR: BLANCO

BLANCO BL

FORMAS USUALES: BLANKS-SEGMENTOS-GOBS

APLICACIÓN: Visión simple-Bifocal fundido

DENSIDAD A 25° C

en g/cm³ 2.54

COEFICIENTE DE EXPANSIÓN LINEAL

20°C/300°C $\alpha \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ 94

VISCOSIDAD

| | Temperatura en °C |
|-----------------------------------|--|
| T _C 10 ^{14.5} | 500 |
| T _R 10 ¹³ | 540 |
| T _L 10 ^{7.85} | 710 |
| Temperatura de trabajo | 1160 |
| 10 ⁵ | 885 |
| 10 ⁴ | 995 |
| 10 ³ | 1160 |

ÍNDICES DE REFRACCIÓN

| Líneas espectrales | λ mm | Color | Valor |
|--------------------|--------------|----------|---|
| F' cadmio | 480.0 | azul | 1.52965 |
| F hidrogeno | 486.1 | azul | 1.52916 |
| e mercurio | 546.1 | verde | 1.52511 |
| d helio | 587.6 | amarillo | 1.52300 |
| C' cadmio | 643.8 | naranja | 1.52075 |
| C hidrogeno | 658.3 | rojo | 1.52034 |

CONSTRINGENCIA

| | |
|-----|--|
| v e | 59.0 |
| v d | 59.3 |

TRANSMITANCIA (Grosor mínimo 2 mm)

| | | |
|--|----|---|
| U.V.Corte (T=1%) | nm | 280 |
| Transmitancia a 350 nm | | 88% |
| Factor de transmitancia en la región visible (380-780nm.-Iluminante A) | | 91.4% |
| Factor de transmitancia en la región I.R. (Iluminante A) | | 90.3% |

DURABILIDAD QUIMICA

| | |
|---|--|
| .-al agua Norma AFNOR(NF B 35601) | 3 |
| .-a ácidos ⁽¹⁾ Norma DIN (12.116) | 1 |
| Test AO - Pérdida de peso en mg/cm ² | <0.01 |
| .-a Álcalis ⁽¹⁾ Norma AFNOR(NF B 35602) | 1 |

(1)Método DIN idéntico al método ANFOR

USO PARA MULTIFOCALLES FUNDIDOS:

SÍ con
Ba 653 Ba 858
Ba 683 Ba 750A

A remarcar:

POSIBLES TRATAMIENTOS

.Templado químico: NO
.Templado térmico: SI
. Tratamientos de vacío: SI
(Antireflectante y coloración)

CORNING-FRANCE

Fig. 1.2a Información suministrada por Corning (Francia)

| | | | |
|-----------------|---------------|------------------------------|---------------------|
| $n_d = 1.52249$ | $v_d = 59.48$ | $n_F - n_C = 0.008784$ | K 5 - 522595 |
| $n_e = 1.52458$ | $v_e = 59.22$ | $n_{F'} - n_{C'} = 0.008858$ | |

| | λ (nm) | |
|--------------|----------------|---------|
| $n_{2325.4}$ | 2325.4 | 1.49653 |
| $n_{1970.1}$ | 1970.1 | 1.50143 |
| $n_{1529.6}$ | 1529.6 | 1.50663 |
| $n_{1060.0}$ | 1060.0 | 1.51197 |
| n_d | 1011.0 | 1.51257 |
| n_k | 852.1 | 1.51507 |
| n_r | 706.5 | 1.51829 |
| n_c | 656.3 | 1.51982 |
| n_C | 643.8 | 1.52024 |
| $n_{632.8}$ | 632.8 | 1.52064 |
| n_D | 589.3 | 1.52241 |
| n_D | 587.6 | 1.52249 |
| n_e | 546.1 | 1.52458 |
| n_F | 486.1 | 1.52860 |
| $n_{F'}$ | 480.0 | 1.52910 |
| n_g | 435.8 | 1.53338 |
| n_h | 404.7 | 1.53735 |
| n_i | 365.0 | 1.54412 |

| | |
|-------------|--------|
| P_{st} | 0.2846 |
| $P_{C,s}$ | 0.5401 |
| $P_{d,c}$ | 0.3043 |
| $P_{e,d}$ | 0.2384 |
| $P_{F,F'}$ | 0.5438 |
| $P_{h,h'}$ | 0.7715 |
| P'_{st} | 0.2822 |
| $P'_{C,s}$ | 0.5840 |
| $P'_{d,c'}$ | 0.2537 |
| $P'_{e,d'}$ | 0.2364 |
| $P'_{F,F'}$ | 0.4825 |
| $P'_{h,h'}$ | 0.7651 |

| λ (nm) | T_i (5mm) | T_i (25mm) |
|----------------|-------------|--------------|
| 2325.4 | 0.91 | 0.62 |
| 1970.1 | 0.968 | 0.85 |
| 1529.6 | 0.999 | 0.988 |
| 1060.0 | 0.999 | 0.998 |
| 700 | 0.999 | 0.998 |
| 660 | 0.999 | 0.998 |
| 620 | 0.999 | 0.998 |
| 580 | 0.999 | 0.998 |
| 546.1 | 0.999 | 0.998 |
| 500 | 0.999 | 0.998 |
| 460 | 0.999 | 0.996 |
| 435.8 | 0.999 | 0.995 |
| 420 | 0.999 | 0.995 |
| 404.7 | 0.998 | 0.990 |
| 400 | 0.997 | 0.984 |
| 390 | 0.996 | 0.980 |
| 380 | 0.996 | 0.980 |
| 370 | 0.996 | 0.979 |
| 365.0 | 0.995 | 0.974 |
| 350 | 0.986 | 0.93 |
| 334.1 | 0.94 | 0.74 |
| 320 | 0.78 | 0.29 |
| 310 | 0.50 | |
| 300 | 0.15 | |
| 290 | | |
| 280 | | |

| | |
|--|-------|
| $\alpha_{30/+70^\circ C}$ [10 ⁻⁶ /K] | 8.2 |
| $\alpha_{20/+300^\circ C}$ [10 ⁻⁶ /K] | 9.6 |
| T_g (°C) | 543 |
| $T_{107.6}$ (°C) | 720 |
| c_p (J/g.K) | 0.783 |
| λ [W/m.K] | 0.950 |
| ρ [g/cm ³] | 2.59 |
| E [10 ³ N/mm ²] | 71 |
| μ | 0.227 |
| HK | 450 |
| B | 0-1 |
| CR | 1 |
| FR | 0 |
| SR | 1 |
| AR | 1.0 |

| | |
|-------|-----------------------------|
| A_0 | 2.2850299 |
| A_1 | -8.6010725.10 ⁻³ |
| A_2 | 1.1806783.10 ⁻⁵ |
| A_3 | 2.0765657.10 ⁻⁴ |
| A_4 | -2.1314913.10 ⁻⁶ |
| A_5 | 3.2131234.10 ⁻⁷ |

| | |
|------------------|---------|
| $\Delta P_{C,d}$ | -0.0022 |
| $\Delta P_{C,s}$ | -0.0011 |
| $\Delta P_{F,e}$ | 0.0001 |
| $\Delta P_{F,f}$ | 0.0001 |
| $\Delta P_{i,g}$ | -0.0021 |

| [°C] | $\Delta n/\Delta T_{relativa}$ [10 ⁻⁶ /K] | | | | | $\Delta n/\Delta T_{absoluta}$ [10 ⁻⁶ /K] | | | | |
|---------|--|-----|-----|-----|-----|--|------|------|-----|-----|
| | 1060.0 | s | C' | e | g | 1060.0 | s | C' | e | g |
| -40/-20 | | | | | | | | | | |
| -20/0 | | | | | | | | | | |
| 0/+20 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.7 | 2.4 | -0.4 | -0.3 | -0.1 | 0.2 | 0.8 |
| +20/+40 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.7 | 2.4 | -0.2 | -0.1 | 0.1 | 0.4 | 1.0 |
| +40/+60 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.7 | 2.4 | -0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.5 | 1.2 |
| +60/+80 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.7 | 2.4 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.7 | 1.3 |

Fig. 1.2b Información suministrada por Schott (Alemania)

Se puede observar que, en general, un aumento de índice de refracción supone una disminución del número de Abbe (SF57-847238) pero existe una franja donde podemos encontrar vidrios con alto índice de refracción y baja dispersión (LaF3-717480).

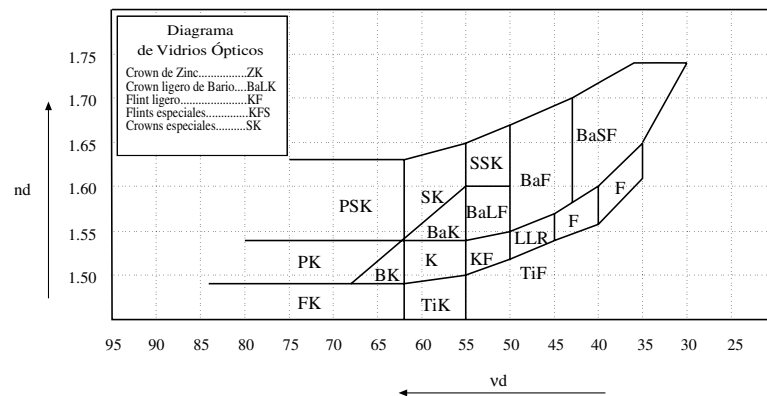


Fig. 1.3 Diagrama de vidrios ópticos según Schott

1.4. Proceso de fabricación de lentes minerales

Obtención de una superficie. Generalidades

Las superficies que delimitan las lentes oftálmicas se caracterizan por su geometría (radio de curvatura, diámetro) y por su rugosidad.

El fabricante, a partir de un bloque de vidrio, deberá obtener en cada una de sus caras una determinada superficie para conseguir la lente terminada. En este apartado se analizan los distintos pasos a seguir para la obtención de una de estas superficies.

En un estudio previo se definen los parámetros propios de la superficie, y a partir de aquí se conocerá: el radio de curvatura (sagita) y el diámetro de la lente. Simultáneamente se impone que la rugosidad superficial media sea menor que 0.1 μm.

Se parte del bloque de vidrio del que se desea obtener la lente. La geometría de este bloque es la de un cilindro macizo, en el que la superficie que consideraremos superior es convexa y la superficie inferior es cóncava; el diámetro de este cilindro debe de ser mayor o igual al de la lente que pretendemos obtener. Las rugosidades de las superficies superior e inferior antes de ser trabajadas pueden ser de algunas décimas de milímetro.

Bloqueado

El objetivo de este proceso es adaptar al bloque de vidrio un suplemento que permita su sujeción en las máquinas de cada una de las etapas a seguir para la obtención de una superficie óptica.

Para proceder al bloqueado se recubre la superficie opuesta a la que se va a trabajar con una laca o una lámina plástica autoadhesiva, con lo que se mejora su adherencia a la vez que se protege de posibles agresiones que la podrían deteriorar. Con una aleación, cuyos componentes principales son: Bi, Pb, Sn y Cd; y cuya temperatura de fusión oscila entre 45 y 80°C; el fabricante obtiene un cilindro que queda perfectamente adherido sobre la lámina plástica. En la parte central, este cilindro posee un agujero pasante a través del cual se podrá efectuar la medida del espesor de centro de la lente. En la parte superior del suplemento existen los anclajes necesarios para la adaptación del conjunto a las distintas máquinas. El desbloqueo del vidrio y el consiguiente reciclado de la aleación se consiguen sumergiendo todo el conjunto en un recipiente termostataado, con agua a una temperatura mayor de 80°C,

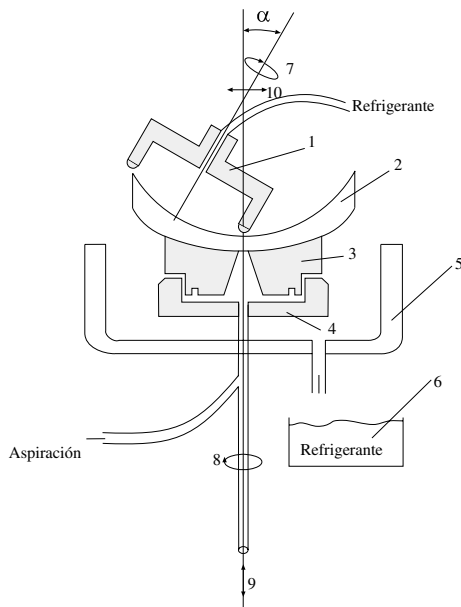


Fig. 1.4 Esquema de un generador de superficies

el suplemento se separa del vidrio y se deposita en el fondo del recipiente, lo que permite una fácil separación y posible reutilización de la aleación.

Generado

El objetivo de este proceso es conseguir que la superficie posea un radio de curvatura igual o muy parecido al deseado, así como uniformizar la superficie hasta obtener una rugosidad media inferior a $10\ \mu\text{m}$.

El procedimiento es el arranque de material por medios mecánicos, y se lleva a cabo en máquinas diseñadas especialmente denominadas generadores. El tiempo de proceso depende de la diferencia de curvas entre la superficie del bloque de vidrio y la superficie deseada, así como de la dureza del material a trabajar y de la efectividad de la herramienta de corte incorporada en el generador.

La figura 1.4 es una descripción gráfica del generador, y en ella se indican los principales componentes del mismo. Se ha escogido la configuración

más sencilla, que corresponde a un generador de superficies esféricas.

A partir de la figura 1.4, se pueden distinguir las siguientes partes de un *generador*.

La función de la *muela diamantada* (1) es la de arranque de material, y se explicará en profundidad más adelante.

La superficie del *bloque de vidrio* (2) que se va a trabajar estará en contacto con la muela.

El *suplemento de aleación* (3) está perfectamente adherido al bloque de vidrio y permite su sujeción al generador.

La función del *soporte de sujeción* (4) es la sujeción del suplemento de aleación, de tal manera que el bloque de vidrio no pueda girar respecto a este soporte y se mantenga perfectamente apoyado en él. Los sistemas de sujeción que incorporan los distintos generadores existentes en el mercado son de muy diversa índole, el representado es el de aspiración producido por una bomba de vacío.

La *cuba* (5) forma parte del cuerpo principal del generador. Su función es la de recoger el refrigerante, así como las partículas de vidrio que se van arrancando.

El *depósito del refrigerante* (6) almacena el refrigerante que constantemente es bombeado y evacuado por el centro de la muela. Este depósito debe incluir un decantador para evitar que las partículas de vidrio sean bombeadas de nuevo con el refrigerante.

El *movimiento de rotación de la muela* (7) presenta una velocidad de rotación de la muela respecto al eje indicado que oscila entre 5.000 y 25.000 rpm.

El *movimiento de rotación del bloque* (8) se realiza en sentido de giro contrario al de la muela. La velocidad de rotación oscilará entre 5 y 25 rpm.

El *desplazamiento vertical del bloque* (9) permite regular el espesor de la capa de vidrio arrancado en todo el proceso. Consecuentemente, con este desplazamiento se podrá ajustar el espesor de la lente.

El ajuste del *desplazamiento horizontal de la muela* (10) posibilita la generación de superficies cóncavas o convexas.

Muela diamantada: (1) en la figura 1.4. Mediante una descripción muy genérica se puede decir

que una muela es un cilindro de bronce hueco cuyo diámetro exterior oscila entre 50 y 120 mm y el ancho de pared puede ser de 3 a 6 mm. En la figura 1.5 se representa una sección. El *sistema de sujeción*, que corresponde a la parte más estrecha, normalmente posee una rosca interior y el agujero es pasante, pues debe permitir la evacuación del refrigerante. La *zona diamantada*, que corresponde a la parte inferior de la muela, es la que está en contacto con la superficie de vidrio y está recubierta de partículas de diamante sintético, adheridas al bronce con un aglutinante; su tamaño medio oscila entre 50 y 100 μm; de él dependerá el grado de rugosidad de la superficie una vez generada. La terminación de esta zona es circular, con radio r.

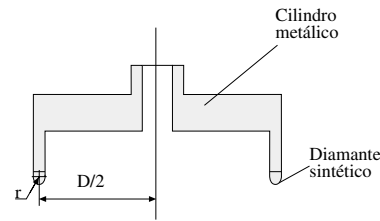


Fig. 1.5 Sección de una muela

El *radio de curvatura* (R), generado en la superficie, depende del diámetro efectivo de la muela (D), del radio (r) de la zona diamantada y del ángulo α que forman los dos ejes de rotación. Las relaciones entre estos tres parámetros en el caso de generar una superficie convexa es:

$$\text{sen } \alpha = \frac{D}{R + r} \tag{1.11}$$

Y en el caso de generar una superficie cóncava es:

$$\text{sen } \alpha = \frac{D}{R - r} \tag{1.12}$$

La justificación de estas expresiones se encuentra en varias de las referencias bibliográficas de este capítulo.

El *refrigerante*, compuesto por una mezcla de agua con taladrina, permite que la temperatura en la zona del vidrio donde se produce el arranque de material, y la temperatura en la zona diamantada de la muela no sea excesiva para estos componentes. También produce un arrastre del polvo de vidrio que se deposita entre las partículas de diamante de la muela.

Tipos de generadores: en el mercado actual, los generadores más modernos son máquinas equipadas con control numérico (CNC), que permiten generar todo tipo de superficies de revolución (esféricas, esféricas y tóricas) y de no revolución (progresivas), con lo que puede obtenerse así cualquier tipo de superficie de las empleadas en las lentes oftálmicas. Antes de la aparición de los generadores equipados con CNC, la generación de superficies tóricas se resolvía motorizando el desplazamiento horizontal de la muela, (10) en la figura 1.4, que debe describir una trayectoria curvilínea, cuyo radio de curvatura es el de la base del toro que se pretende generar. En este caso el radio del cilindro se obtiene ajustando el valor del ángulo α (los conceptos de radio de base y cilindro de una superficie tórica se desarrollarán en el capítulo 5). En la actualidad se han desarrollado generadores equipados con CNC que generan la superficie punto a punto; principalmente se emplean en la talla de lentes de policarbonato.

Afinado

El objetivo del proceso es conseguir que el radio de curvatura de la superficie sea exactamente el deseado, además de reducir la rugosidad superficial hasta obtener un valor medio de 1 μm. El proceso del afinado consiste en el arranque de material por medios mecánicos, y se consigue por fricción entre la superficie a afinar y un molde. El tiempo de proceso oscila entre 10 y 30 segundos, en función de varios factores, tales

como la diferencia entre el radio de la superficie de vidrio y el del molde, la rugosidad media de la superficie antes del afino, la presión de trabajo y el tipo de abrasivo como factores más significativos.

Descripción del molde: los moldes se construyen a partir de cilindros metálicos, en los que una de las superficies se mecaniza de tal manera que permite su anclado en la máquina de afino, y la opuesta, que denominaremos superficie activa del molde, se mecaniza de manera que sea un negativo de la superficie que pretendemos afinar.

Hablaremos de molde diamantado cuando en la superficie activa del mismo se adhieren partículas de diamante sintético para producir la abrasión sobre el vidrio. Este tipo de moldes deben de ser refrigerados correctamente para evitar el desprendimiento del diamante y la acumulación de partículas de vidrio entre las de diamante pues si esto sucede se reduce mucho la efectividad del molde. Como refrigerante se empleará una mezcla de agua y taladrina.

Existe otro tipo de molde, en el que la superficie activa se recubre con una chapa (*pad*) cuyo espesor es de 0.5 mm y de un material más blando que el propio molde, por ejemplo de latón, aluminio o zinc, con el objetivo de que el desgaste que se produce durante el proceso de afino sólo afecte a la chapa y no a su superficie activa. Periódicamente esta chapa debe de sustituirse, consiguiéndose así una mayor duración del molde. Si se emplean este tipo de moldes, el abrasivo, compuesto de óxidos metálicos, se añade al agua que actúa como refrigerante.

En la figura 1.6 se representa una vista superior de un molde con chapa pegada, donde se pueden observar los canales de evacuación del refrigerante y abrasivo. También se indica una sección

32

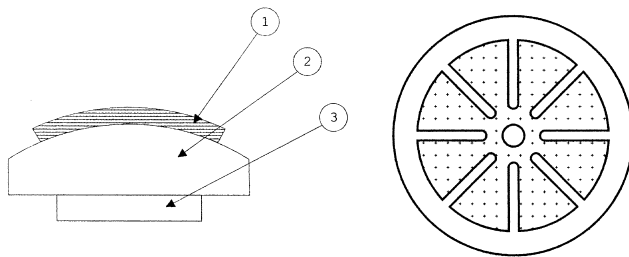


Fig. 1.6 Vista lateral y superior de un molde con pad

transversal donde se aprecia la localización de la chapa protectora (1), el cuerpo del molde (2) y la zona que permite la sujeción del molde (3).

La estructura básica de una *afinadora* consta de las siguientes partes, tal como se indica en la figura 1.7. El *sistema de anclaje* (1) transmite el movimiento al bloque de aleación que sujeta la lente que se está afinando.

El *soporte de aleación* (2) adherido a la lente permite su sujeción en las distintas máquinas que intervienen en el proceso de obtención de una superficie terminada.

La *lente en proceso* (3).

El *molde* (4).

El *sistema de sujeción* del molde a la máquina de afino (5). Las máquinas modernas incorporan elementos neumáticos que permiten una rápida sustitución del molde. En algunos modelos, a este conjunto se le imprime un movimiento igual que a la lente pero de amplitud menor y sentidos opuestos, con el fin de reducir el tiempo de proceso.

El *cuerpo principal de la máquina* (6).

El *depósito* (7) donde se almacena la suspensión compuesta por el refrigerante y el abrasivo o la taladrina.

El arranque de material se consigue por el efecto del abrasivo, el movimiento entre la superficie a afinar y el molde, y se favorece con el aumento de presión que se ejerce entre el vidrio y el molde. La trayectoria del movimiento entre la superficie a afinar y el molde se representa en la figura 1.8. En el caso de afinar superficies de revolución, el bloque de vidrio puede tener un movimiento de rotación alrededor de su eje, tal y como ya se ha comentado en la generación de la superficie.

Pulido

Los objetivos de este proceso son reducir la rugosidad media superficial por debajo de 0.1 μm , a la vez que mantener el radio de curvatura obtenido en el afinado.

Los mecanismos que producen el pulido de una superficie de vidrio son de diversa índole, por una parte, el efecto mecánico de arrastre de material que uniformiza la superficie, a la vez que la elevación local de la temperatura, que reduce la viscosidad del vidrio, lo que favorece este arrastre de material. Existen estudios que justifican la presencia de un tercer efecto, denominado físico-químico, que debe de existir para conseguir el pulido de la superficie del vidrio. El tiempo de proceso oscila entre 1 y 5 minutos.

El pulido de superficies de lentes destinadas a usos oftálmicos se lleva a cabo en máquinas iguales a las empleadas en el afino, utilizando otro tipo de moldes y abrasivos.

Los moldes que se utilizan en el pulido se diferencian de los del afino en el acabado de su superficie activa, pues ahora, si en el afino hemos empleado un molde diamantado, en el pulido el molde estará recubierto con una capa de poliuretano, cuyo espesor oscilará entre 1 y 2 mm. En el caso de haber empleado en el afino un molde con chapa de latón protectora, en el pulido podemos emplear el mismo molde añadiéndole sobre la chapa un papel o una tela autoadhesiva con una textura muy áspera y a la vez muy porosa, lo que favorece la retención de partículas de abrasivo.

El abrasivo que se emplea actualmente es un compuesto cuyo componente principal es el óxido de cerio. Se comercializan muchos tipos de compuestos, cada uno de los cuales, combinado con un determinado *pad*, proporcionan el grado de pulido idóneo para cada tipo de material. Como refrigerante y vehículo de transporte del abrasivo se emplea agua.

Obtención de una lente mineral

La situación del mercado actual (plazos de entrega de lente terminada lo más cortos posible, muy elevado número de variables en cuanto a potencia, índice de refracción, tratamientos superficiales, etc.) obliga al fabricante de lentes oftálmicas a adoptar una solución de compromiso entre el número de lentes terminadas que debe de tener almacenadas y el grado de eficacia que deben de tener sus talleres de terminado de lentes. En la actualidad se está imponiendo la fabricación de lentes semiterminadas, en las que se ha generado, afinado y pulido la superficie convexa, y se ha dejado en bruto la superficie cóncava, así como un determinado espesor de centro y diámetro. Estas lentes semiterminadas son sometidas a un control de parámetros y de calidad superficial antes de ser almacenadas.

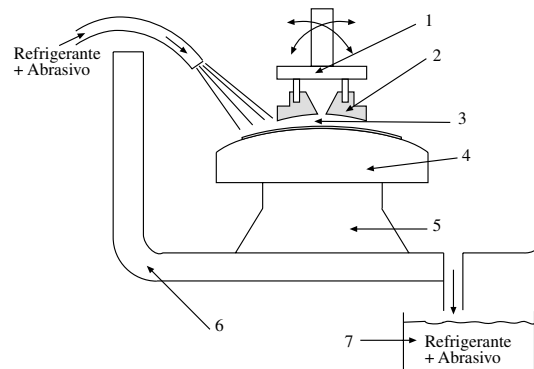


Fig. 1.7 Estructura de una afinadora

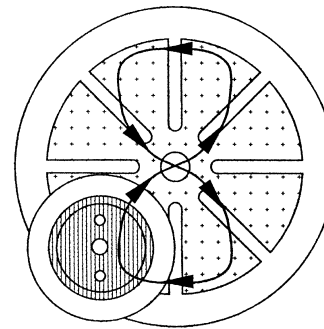


Fig. 1.8 Proceso de afinado

Teniendo en cuenta lo dicho hasta ahora, si miramos el contenido de un almacén deberemos encontrar tres tipos distintos de productos: *bloques de vidrio*, *lentes semiterminadas* y *lentes totalmente terminadas*. Éstas últimas corresponden al tipo de lente de mayor demanda (generalmente de baja potencia, normalmente monofocal, diámetro grande).

Las lentes semiterminadas y algunas totalmente terminadas se fabrican en lotes en que el número de lentes iguales es elevado (puede ser de algunos centenares), y al conjunto de procesos y operaciones necesarias para su obtención se le denomina fabricación seriada. Empleando estos procesos el fabricante pretende reducir al máximo el coste de cada lente; por lo tanto le interesará un elevado grado de automatización en los procesos, tiempos de procesado lo más cortos posible y el menor mantenimiento posible de la maquinaria y los utillajes que intervienen. Los fabricantes han optado, con el fin de cubrir todo el conjunto de combinaciones en cuanto a potencias, índices de refracción, diámetros y geometrías, por almacenar un gran número de lentes semiterminadas, en las que sólo se ha terminado la primera superficie. Cuando el fabricante recibe un pedido, si no posee la lente terminada en el almacén, escoge el semiterminado óptimo de entre los que tiene almacenados y trabaja la segunda superficie hasta obtener la lente deseada totalmente terminada. En casos extremos fabricará la lente partiendo de un bloque de vidrio. A este tipo de fabricación se le denomina fabricación por encargo. La maquinaria empleada en la fabricación de lentes por encargo debe de poder generar, afinar y pulir cualquier geometría, por lo tanto la versatilidad será uno de los requisitos imprescindibles, quedando en un segundo lugar el tiempo de proceso.

A continuación, las tablas 1.4 y 1.5 representan un resumen en el que se describen los pasos que se deben seguir en cada tipo de fabricación.

Tabla 1.4

34

Fabricación de lentes minerales por encargo

| Partiendo de un bloque | Partiendo de un semiterminado |
|---|---|
| <i>Objetivo:</i> | <i>Objetivo:</i> |
| Obtención de <i>una</i> lente terminada | Obtención de <i>una</i> lente terminada |
| <i>Procedimiento</i> | <i>Procedimiento</i> |
| <i>Elección del bloque y utillajes necesarios:</i> | <i>Elección del semiterminado y utillajes necesarios:</i> |
| Se escoge el bloque más adecuado (material, diámetro, espesores) | Se escoge el semiterminado más adecuado (P_{IN} , material, diámetro, espesores) |
| Se escogen los moldes para el afino y pulido para cada superficie | Se escogen los moldes para el afino y pulido para la superficie posterior |
| <i>Generación de la superficie anterior:</i> | <i>Generación de la superficie posterior:</i> |
| Consta de cuatro etapas: sujeción, generado, afinado y pulido. Rugosidad superficial $\leq 0.1 \mu\text{m}$ | Consta de cuatro etapas: sujeción, generado, afinado y pulido. Rugosidad superficial $\leq 0.1 \mu\text{m}$ |
| <i>Control:</i> | <i>Control:</i> |
| Se controla la sagita de la 1ª superficie y el espesor de centro | Control de la calidad de las superficies y de la masa Control de potencias y espesores |
| <i>Generación de la superficie posterior:</i> | <i>Empaquetado y almacenaje</i> |
| Consta de cuatro etapas: sujeción, generado, afinado y pulido. Rugosidad superficial $\leq 0.1 \mu\text{m}$ | |
| <i>Control:</i> | |
| Control de la calidad de las superficies y de la masa Control de potencias y espesores | |
| <i>Empaquetado y almacenaje</i> | |

Tabla 1.5

Fabricación de lentes minerales en serie

| Terminadas | Semiterminadas |
|--|--|
| <p><i>Objetivo:</i> Obtención de un gran número de lentes iguales totalmente terminadas</p> <p><i>Elección del diseño de la lente:</i> Se fijan los parámetros de la lente Un sistema informático relaciona estos parámetros para conseguir el diseño más adecuado</p> <p><i>Elección del bloque y utillajes necesarios:</i> Se escoge el bloque más adecuado (material, diámetro, espesores) Se escogen los moldes para el afino y pulido para cada superficie</p> <p><i>Preparación maquinaria:</i> Maquinaria muy rápida y automatizada La puesta en marcha del proceso es escalonada Se emplean moldes diamantados en el afino y con recubrimiento de poliuretano en el pulido</p> <p><i>Generación de la superficie anterior:</i> Consta de cuatro etapas: sujeción, generado, afinado y pulido</p> <p><i>Control:</i> Muestreado, con una frecuencia que depende de la fiabilidad de la maquinaria</p> <p><i>Generación de la superficie posterior:</i> Consta de cuatro etapas: sujeción, generado, afinado y pulido</p> <p><i>Control:</i> Unitario, control de la calidad de las superficies y de la masa Control de potencias y espesores</p> <p><i>Empaquetado y almacenaje</i></p> | <p><i>Objetivo:</i> Obtención de un gran número de semiterminados iguales</p> <p><i>Definición de la geometría del semiterminado:</i> Determinación del radio de la superficie anterior y de los espesores</p> <p><i>Elección del bloque y utillajes necesarios:</i> Se escoge el bloque más adecuado (material, diámetro, espesores) Se escogen los moldes para el afino y pulido</p> <p><i>Preparación maquinaria:</i> Maquinaria muy rápida y automatizada. La puesta en marcha del proceso es escalonada Se emplean moldes diamantados en el afino y con recubrimiento de poliuretano en el pulido</p> <p><i>Generación de la superficie anterior:</i> Consta de cuatro etapas: sujeción, generado, afinado y pulido</p> <p><i>Control:</i> Unitario, se controla la calidad superficial, la sagita de la superficie anterior y los espesores</p> <p><i>Empaquetado y almacenaje</i></p> |

Materiales orgánicos

1.5. Tipos de materiales orgánicos y propiedades

Los materiales que denominamos orgánicos o plásticos son producto de la polimerización de cadenas que contienen básicamente carbono, hidrógeno y oxígeno.

Aunque las primeras materias plásticas aparecieron a finales del siglo XIX, no es hasta el segundo tercio del siglo XX cuando aparecen productos utilizables en óptica oftálmica. El primero en utilizarse fue el polimetilmetacrilato (PMMA) aunque en el campo de la óptica oftálmica actualmente se utiliza poco.

Los materiales que cobran mayor importancia en el segundo tercio del siglo XX en el campo de las lentes oftálmicas (de prescripción y de protección) son el carbonato de dialilglicol (CR-39) de $n_d = 1.498$, $v_d = 55.30$ y el policarbonato (PC) de $n_d = 1.585$, $v_d = 30$.

Actualmente se están desarrollando una gran variedad de materiales orgánicos de índices más elevados (1.500, 1.523, 1.600, 1.700) que les permite competir con los productos minerales.

Para describir las propiedades de los materiales plásticos estableceremos una relación con las que se han descrito al tratar el vidrio mineral, comparando ambos materiales. En términos generales los materiales plásticos tienen índices de refracción inferiores a los minerales. Aunque actualmente está totalmente normalizado el uso de material orgánico de índice 1.600 ya se han comercializado lentes con material cuyo índice es 1.700.

El CR-39 y los materiales plásticos con índice medio no son muy dispersores (número de Abbe similar al del *crown*) pero los de alto índice son tan dispersores como el material *flint*.

El porcentaje de transmisión, tal y como hemos visto anteriormente, solamente depende del índice de refracción y no de que el material sea inorgánico u orgánico. El corte en el ultravioleta (UV) suele ser más elevado y más en el PC que en el CR-39.

La densidad es el parámetro característico de los materiales orgánicos, puesto que es del orden del 40% menor que la de los minerales ($\rho_{\text{CR-39}} = 1.32 \text{ gr/cm}^3$, mientras que $\rho_{\text{crown}} = 2.54 \text{ gr/cm}^3$), y en este caso aunque el índice de refracción varíe, la variación de densidad es casi despreciable. Por ello el gran argumento de las lentes orgánicas frente a las minerales es la reducción de peso.

Al ser mejores conductores del calor, presentan la ventaja de empañarse menos cuando se someten a cambios bruscos de temperatura.

La otra gran ventaja de los materiales orgánicos es la resistencia a los golpes (baja fragilidad). El CR-39 es unas veinte veces más resistente a la rotura que el vidrio y el PC todavía lo es más, por lo que se utiliza básicamente en lentes de protección.

Uno de los peores inconvenientes que aún hoy en día no se ha conseguido superar es la poca dureza que ofrecen los materiales plásticos, que hace que se rayen con gran facilidad. El PC es más blando aún que el CR-39.

Los plásticos en general son resistentes a los agentes químicos y por su estructura interna son muy fáciles de colorear y de decolorar.

En la tabla 1.6 se refleja el valor de algunas propiedades que se han expuesto a fin de poder comparar los distintos materiales.

Tabla 1.6

| Tipo | n_d | n° de Abbe | % T_{vis} | Densidad (g/cm^3) |
|-----------------------|---------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| crown | 1,52300 | 59,3 | 91,40 | 2,54 |
| crown alto índice | 1,60050 | 41,2 | 89,50 | 2,65 |
| flint | 1,70000 | 34,6 | 86,80 | 3,21 |
| flint denso | 1,80400 | 34,7 | 84,50 | 3,66 |
| flint alto índice | 1,88500 | 30,6 | 82,60 | 3,99 |
| CR-39 | 1,49800 | 55,3 | 92,10 | 1,32 |
| orgánico índice medio | 1,52300 | 48,0 | 91,00 | 1,30 |
| orgánico alto índice | 1,60000 | 36,0 | 89,63 | 1,34 |
| policarbonato | 1,58500 | 30,0 | 89,63 | 1,20 |

1.6. Proceso de fabricación de lentes orgánicas en serie

El proceso de fabricación en serie de lentes orgánicas empleadas como compensadoras o bien como protectoras de radiaciones solares sigue las siguientes etapas:

(1) *Cálculo de los parámetros de la lente:* con un soporte informático se calculan los parámetros de la lente a fabricar (radios de curvatura, espesores de centro y borde).

(2) *Elección y preparación del molde adecuado:* a partir del diseño del apartado (1) se definen los parámetros del molde necesario para fabricar la lente (figura 1.9).

Este molde está constituido por dos bloques de vidrio unidos por una anilla de material plástico, proporcionando un compartimiento estanco. Las superficies internas de los bloques de vidrio deben de estar perfectamente pulidas, siendo un negativo perfecto de las superficies de la lente que queremos obtener.

La obtención de la superficie de cada bloque situada en el interior del molde se consigue con el mismo proceso que el empleado en la fabricación de lentes minerales, añadiendo después del pulido un proceso de endurecido químico con el objetivo de prolongar la vida del molde. Estos bloques pueden emplearse para la fabricación de un determinado número de lentes, que depende del espesor de la lente y del grado de deterioro de la superficie pulida del bloque. Las superficies externas de estos bloques pueden tener cualquier tipo de acabado.

La anilla plástica que une los dos bloques de vidrio tiene como función el mantener entre ellos una separación igual a los espesores deseados en la lente terminada y también cierra el volumen donde posteriormente se alojará el prepolímero. Debe de disponer de un orificio por el que introduciremos el prepolímero y que a la vez servirá para la evacuación del aire del interior del molde.

Todo este conjunto se mantiene montado mediante una pinza que presiona las caras externas de los bloques de vidrio, asegurando el cierre del molde.

Una vez se dispone de todos sus componentes, se somete el molde a una exhaustiva limpieza y se procede a su ensamblaje, eliminando todas las impurezas que pudieran quedar en su interior.

(3) *Preparación de la mezcla a polimerizar:* la mezcla a polimerizar está constituida básicamente por dos productos, el monómero y el catalizador. Esta mezcla convenientemente preparada la denominaremos prepolímero, y deberá almacenarse a baja temperatura con el fin de prolongar el tiempo en que posee una viscosidad óptima para ser introducida en el interior del molde.

Diariamente se planifica el número de veces que se preparará prepolímero para inyectar, en función del número de lentes que se quieran fabricar, la cantidad de moldes disponibles y del tiempo que el prepolímero mantiene las propiedades óptimas para su manipulación.

(4) *Llenado del molde:* el llenado del molde se lleva a cabo en una sala blanca. El prepolímero se introduce en el molde a baja presión y a temperatura ambiente, a través del orificio de la anilla plástica. Por este mismo orificio se evacúa el aire del interior del molde y posteriormente se somete a todo el conjunto a una agitación con el fin de eliminar burbujas de aire.

(5) *Polimerización:* el proceso de polimerización se lleva a cabo en un baño maría en el que se sumergen entre 50 y 200 moldes colocados ordenadamente con el orificio en posición vertical.

Al elevarse la temperatura se acelera el proceso de la polimerización, y debe mantenerse a unos 40°C durante 12 horas; como la reacción que se produce es exotérmica, se deberá prever la posible evacuación de calor producido por la propia reacción. Transcurrido este tiempo se eleva la temperatura hasta 97°C durante una hora, concluyendo así el polimerizado. Durante la polimerización se produce una reducción del volumen del material (aproximadamente un 15 % para el CR-39), efecto que el fabricante prevé rellenando el agujero de la anilla de prepolímero en el proceso de llenado del molde.

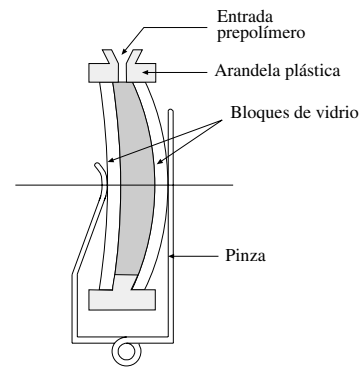


Fig. 1.9 Llenado del molde

(6) *Desmoldeado*: el desmoldeado de la lente consiste en la extracción de la lente del interior del molde. Para ello, se corta la anilla plástica, posteriormente se separan los bloques de vidrio y se extrae la lente totalmente terminada. En este proceso se debe evitar el rayado de la superficie o el lascado de cantos de los bloques de vidrio, ya que una vez lavados pueden reutilizarse.

(7) *Recocido*: en el polimerizado la lente habrá quedado fuertemente tensionada con el fin de eliminar este efecto, se la somete a un recocido calentándola hasta 180°C y posteriormente enfriándola lentamente.

(8) *Control final*: una vez se ha lavado perfectamente la lente, se inspeccionan tanto sus superficies como la masa para detectar algún posible defecto. En caso de detectarse alguna irregularidad la lente se eliminará. Posteriormente se procede al control de parámetros, que normalmente está totalmente automatizado, donde se controla la potencia de vértice posterior (Pvp), los espesores y el diámetro.

(9) *Empaquetado y almacenaje*: la última etapa del proceso consiste en el empaquetado, etiquetado y almacenaje o distribución de la lente.

En el caso de la fabricación de lentes bifocales, progresivas o de ejecuciones especiales, el fabricante sigue las mismas pautas que en la lente mineral. Obtiene un semiterminado siguiendo el proceso que se acaba de describir, se cataloga y se incluye en las existencias. Para conseguir la lente terminada el fabricante deberá generar, afinar y pulir la segunda superficie.

Los procesos de *generado*, *afinado* y *pulido*, en el caso de las lentes orgánicas, se realizan en el taller de encargo, con la misma maquinaria que la empleada en la lente mineral pero usando abrasivos menos agresivos. Las felpas o *pads* de los moldes son más blandos que para las lentes minerales, y la muela del generador no es preciso que sea diamantada. Además se debe prestar especial atención a la protección de la primera superficie de la lente, por la facilidad que presenta el plástico a sufrir incrustaciones o rayaduras.

Bibliografía

- CORNING FRANCE, Departamento de óptica ocular. «El vidrio y la óptica ocular». Tourneville. Spring.
CORNING FRANCE, Optical Division. «Technical Data». Bagnaux-sur-loing, 1994.
FERNÁNDEZ, J.M. *El vidrio*. Madrid, CSIC, 1991.
IZUMITANI, T.S. *Optical Glass*. Nueva York, American Institute of Physycs. Translation Series, 1986.
HORNE D.F. *Spectacle lens technology*. Adam Hilger Ltd, Bristol 1978.
MARI, E.A. *Los vidrios*. Buenos Aires, Americalee, 1982.
SCHOTT, «Optical glass catalogue». Mainz, 1984.

Capítulo 2

Fabricación de monturas

J. Caum

Monturas plásticas

2.1 Materiales para monturas plásticas

Consideraciones generales sobre los plásticos

Con el término plástico se hace referencia a un grupo de materiales sintéticos obtenidos por polimerización. Mediante este proceso, ciertas moléculas orgánicas pequeñas o monómeros se unen formando largas cadenas o polímeros. El grado de reticulación y longitud de las cadenas condicionan las propiedades de los polímeros. Los polímeros lineales son más *cristalinos* que los ramificados o reticulados, resultando más duros, rígidos y resistentes a los disolventes que sus correspondientes no cristalinos. La cristalinidad influye, pues, en la densidad y, por tanto, en el índice de refracción.

En cuanto al comportamiento térmico, cabe decir que los polímeros lineales o ramificados son *termoplásticos*, se ablandan por acción del calor, mientras que los reticulados son *termoestables*, por lo que no se puede modificar su forma con la aplicación de calor. Este fenómeno es importante en el alineamiento y ajuste de las monturas plásticas.

Mientras que los derivados de la celulosa, polimetilmetacrilato (PMMA) y las poliamidas son termoplásticos, las resinas epoxi (optyl), las resinas de poliéster y las resinas fenol-formaldehído (bakelita) son termoestables.

Referente a la solubilidad, ocurre que los polímeros reticulados no se disuelven, únicamente pueden hincharse en presencia de disolventes; en cambio, los polímeros lineales o ramificados pueden disolverse en el disolvente adecuado. Las variables que influyen en la solubilidad son, entre otras, la *temperatura*, cuyo aumento favorece la solubilidad, la *cristalinidad* (los polímeros cristalinos difícilmente son solubles), y la *longitud y ramificación* del polímero. A mayor longitud menor solubilidad, y a mayor ramificación mayor solubilidad.

Aditivos

Raramente un material presenta todas aquellas características que lo hacen idóneo desde la fase de su obtención hasta su utilización. Al polímero base se pueden incorporar aditivos que modifican sus propiedades según sea necesario, tanto en el proceso de obtención como en la utilización del material.

Los *plastificantes* se añaden para mejorar la fluidez, y por tanto la facilidad de procesado, y para reducir la fragilidad. De esta forma se reduce el grado de cristalinidad del polímero y se obtiene un cambio en las propiedades del material. El nuevo material resulta menos duro y menos frágil, pero más flexible y tenaz.

Al mezclar los *reforzantes*, que son sólidos, contribuyen a aumentar la resistencia al impacto, a la tracción, y a la abrasión, y aportan estabilidad dimensional y térmica. Los reforzantes se hallan en forma de partículas o fibras, y son estas últimas las mejores para conseguir elevadas resistencias. Las mezclas polímero-reforzante constituyen un nuevo material al que se denomina en inglés *composite material*, del que se hablará en el próximo apartado.

Los *colorantes* se utilizan en el campo de los plásticos para aplicaciones ópticas para obtener monturas coloreadas o vidrios oftálmicos para gafas de sol o con características filtrantes. Estos colorantes pueden añadirse a la masa del polímero en un momento concreto de su obtención, y también puede realizarse un proceso de tinte superficial una vez obtenido el material.

Otros aditivos que se emplean son los *antioxidantes* y *estabilizadores*.

Composites

Son *materiales compuestos* que se obtienen por mezcla de dos o más materiales diferentes en forma y composición química, e insolubles entre sí. La mezcla da lugar a un nuevo material de características más ajustadas a lo ideal que las características de cada uno de los dos componentes.

Los *composites* más utilizados para fabricar monturas de gafas son los plásticos reforzados con fibras. Constan de una matriz polimérica, que suele ser una resina epoxi o poliéster, y fibra de vidrio, de carbono o de aramid, que le confieren resistencia y rigidez.

40

Consideraciones del material ideal para monturas

Después de revisar a grandes rasgos los tipos de componentes de los materiales plástico, y cómo éstos condicionan las propiedades del material, se analizarán las propiedades que debe reunir el material ideal para la fabricación de monturas plásticas.

La *densidad* debe ser baja, para que el peso sea el menor posible.

Las *propiedades térmicas* condicionan el montaje de las lentes en la montura y la adaptación anatómica al usuario o conformado. El límite inferior del margen de temperaturas a las que la forma de la montura puede ser modificada, se relaciona con la temperatura corporal. Si el límite es cercano a los 37°C, la montura se desadaptará con facilidad. La temperatura de conformado no debe ser demasiado elevada, para no provocar quemaduras al usuario al probarle la montura. De 90 a 110°C se considera el intervalo de conformado del material ideal. Otra consideración que se debe tener en cuenta es la temperatura límite de deformación, entendida como la temperatura sobre la cual se pierden las propiedades plásticas del material. Su valor debe ser unos 20°C superior a la temperatura límite superior de conformado, y evidentemente menor que la temperatura de combustión del material.

En cuanto a las *propiedades mecánicas* del material ideal que interesan en el momento del montaje y adaptación de monturas, la resistencia a la tracción es la resistencia a la ruptura cuando se somete el material a un esfuerzo de tracción desde el exterior, se expresa en unidades de fuerza por unidad de superficie, y debe ser elevada a temperatura ambiente. La resistencia al impacto, entendida como la oposición del material a deteriorarse cuando es sometido a un esfuerzo de compresión en una zona muy

localizada del mismo. Esta especificación es muy importante en las monturas deportivas o de protección en ambientes industriales.

Existe un parámetro importante a la hora de mantener una correcta adaptación de la montura que es el *grado de absorción de agua* del propio material. Cuanto mayor sea éste, peores serán sus propiedades elásticas. Los plastificantes que se añaden a algunos materiales, como los derivados de la celulosa, con el paso del tiempo tienden a migrar o evaporarse, haciendo que el material se vuelva frágil y quebradizo, a la vez que se vuelve amarillento, alterando el coloreado de la montura. Por esta razón, el material debería estar *exento de plastificantes*.

Los materiales empleados en la fabricación de monturas deben poder ser *coloreados*, ya sea en superficie o masivamente, respondiendo a la necesidad de ofrecer variedad en los diseños, para satisfacer la función de montura como complemento estético.

Teniendo en cuenta que las monturas están en contacto directo con la piel del usuario, deben ser inertes, *no interaccionar* con la piel en ningún sentido. Por un lado, no deben provocar irritaciones ni alergias, lo que limita mucho el espectro de materiales utilizables, que cumplen todas las demás condiciones, y por otro lado no pueden ser degradadas por las secreciones de la piel, ni por los cosméticos (ni, por supuesto, por las condiciones ambientales).

Dependiendo del tipo de manipulación que precise el material en el proceso de fabricación de la montura, sea fresado o inyectado, el *coste final* de ésta será mayor o menor respectivamente. Las monturas inyectadas, además de resultar más económicas, suelen adaptarse mejor a las exigencias de los diseñadores a la hora de conseguir formas más complicadas que difícilmente se consiguen por fresado. Relacionado con el coste de la montura está la *posibilidad de reparación* de la misma. Las monturas de precio elevado deben poder ser reparadas en caso de rotura, lo que es equivalente a decir que los materiales con que se fabrican deben ser solubles en algún disolvente, o pegables con algún producto de fácil manipulación.

Polímeros para monturas y sus características

Los polímeros más usuales para monturas de gafas se pueden clasificar en dos grupos principales: los derivados de la celulosa y los plásticos no derivados de ella. Dentro de los *derivados de la celulosa* hablaremos del celuloide (CN), del acetato de celulosa (CA), del propionato de celulosa (CP) y del acetobutirato de celulosa (CAB). En el apartado *otros plásticos*, se tratarán la resina epoxi (EP), las poliamidas (PA), y dentro de ellas, la copoliámidá SPX, el polimetilmetacrilato (PMMA) o plexiglás, y la fibra de carbono (CF).

Derivados de la celulosa

a) Celuloide. Es el plástico más antiguo. Se empezó a utilizar en 1874. Se compone de nitrato de celulosa con alcanfor como plastificante. Dejó de utilizarse debido a su rápido envejecimiento con aparición de grietas, pérdida de elasticidad, rotura y decoloración, todo ello debido a la migración del alcanfor, y su inflamabilidad.

b) Acetato de celulosa. Es el material plástico más utilizado en la fabricación de monturas. Se introdujo en 1945, para sustituir al celuloide, por dos razones. Por una parte, es menos inflamable, y por otra, la incorporación del ester de ácido ftálico como plastificante, que migra menos que el alcanfor, lo hace más estable frente al envejecimiento, aunque también envejece (amarillea) cuando la coloración es clara, y aparece una capa blanca en la superficie cuando el color de la montura es oscuro.

Tiene peores propiedades mecánicas que el celuloide, ya que su contenido de agua es considerable. Su menor elasticidad dificulta el conformado y la adaptación anatómica al usuario, requiriéndose frecuentes reajustes. Por este motivo, las varillas suelen incorporar un alma metálica para garantizar la estabilidad del ajuste. Estas monturas son fácilmente reparables, por el proceso de soldadura, que se consigue disolviendo en acetona las partes que se quieren soldar. La mayoría de monturas de acetato de celulosa se fabrican a partir del fresado de planchas que se obtienen mediante técnicas de extrusionado, o bien a partir de bloques constituidos por varias planchas de acetato que son pegadas entre sí. La necesidad de someter la materia prima a varios procesos de transformación previos a la fabricación de la montura, encarece el material, y por tanto, el producto acabado.

c) *Propionato de celulosa*. Este material surgió después del acetato de celulosa, y se emplea principalmente en monturas de sol económicas. Su proceso de fabricación más común es el inyectado, aunque también se pueden obtener monturas de propionato por fresado. En el mercado existen monturas de propionato, de muy baja calidad, que presentan una temperatura de conformado alrededor de los 50°C, lo que aconseja ensayar el comportamiento térmico de las monturas fabricadas con este material con el extremo de la varilla, antes de proceder al calentamiento de la montura, pues se podría deteriorar irreversiblemente. Como ventajas cabe destacar su ligereza, y que es muy inerte, no causa alergias ni es atacado por el sudor.

d) *Acetobutirato de celulosa*. Sus propiedades son muy parecidas a las del PC, pero no se usa en la fabricación de monturas, sino antiguamente en las lentes de contacto rígidas, y en el proceso de fabricación de montura como protectores de las charnelas en la fase de pulido de las varillas.

Otros plásticos

42

a) *Resina epoxi*. Las resinas epoxi junto con las poliamidas y el propionato de celulosa son los materiales que mayoritariamente se están empleando en la fabricación de monturas inyectadas. Las resinas epoxi, comercializadas bajo el nombre de «Optyl», aparecieron en el mercado en el año 1968, y puede considerarse el material que mejor se ajusta a todos los criterios expuestos en el apartado del material ideal. Posee muy buenas propiedades mecánicas con una elevada resistencia a la flexión que permite no tener que introducir alambres en las varillas (como ocurría en el caso del acetato de celulosa). Presenta un amplio margen de temperaturas en las que sus propiedades elásticas son buenas, pues recupera su forma al enfriarse, después de haberlo sometido a deformación a elevadas temperaturas, lo que se conoce en el lenguaje comercial como efecto «memoria». Ofrece, además, la posibilidad de ser coloreado masivamente o por inmersión, antes de procederse al barnizado de la montura. Presenta varias peculiaridades en cuanto a su manipulación, que se citan a continuación. La adaptación de la montura al usuario debe hacerse progresivamente, calentándola hasta obtener unas buenas propiedades plásticas, dejándola enfriar manteniendo la nueva forma y repitiendo varias veces este proceso para obtener la forma deseada y una adaptación correcta.

La reparación de este tipo de monturas es un problema, por dos razones. La primera consiste en la imposibilidad de disolver el material, que obliga a pegarlas con algún pegamento acrílico. La segunda razón que hace difícil su reparación se relaciona con la capa de barniz que poseen todas estas monturas, pues fácilmente es eliminada de la zona reparada en el momento de alisar la superficie, con la lima o la pulidora, cosa que provoca la desaparición del color en dicha zona.

b) *Poliamida*. Dentro del grupo de las poliamidas se desarrolló, específicamente para la fabricación de monturas, una copoliamida amorfa comercializada bajo el nombre SPX. En este grupo se incluyen también las monturas de nailon. Debido a sus buenas propiedades mecánicas, este material se emplea en monturas de protección en ambientes industriales o en monturas para el deporte. Su baja

densidad permite aumentar la sección de los aros y el puente sin aumentar excesivamente el peso de la montura, siendo estas secciones de gran diámetro las responsables de la gran resistencia mecánica. Su comportamiento térmico no es muy bueno, pero tiene buenas propiedades elásticas a bajas temperaturas, y por esta razón la introducción de las lentes de protección orgánicas se consigue sin calentar la montura. Las posibilidades de reparación son escasas, por las mismas razones que el optyl, pero en el caso de las monturas de protección está menos justificada la reparación puesto que se debe garantizar en todo momento el mantenimiento de sus propiedades mecánicas.

c) *Polimetilmetacrilato*. Es un material que se empleó en la fabricación de monturas durante un tiempo pero dejó de utilizarse. Presenta una elevada resistencia a la tracción, una gran transparencia que, juntamente con la posibilidad de ser tintado, permite obtener coloraciones espectaculares. Actualmente se utiliza en otro tipo de productos dentro del campo de la óptica oftálmica.

d) *Fibra de carbono*. La monturas de fibra de carbono presentan muy buenas propiedades mecánicas, debido a la constitución interna del material, que está formado de una resina epoxi, con fibra de carbono como material aglomerante. Esto permite fabricar monturas cuyas secciones en aros y puente son muy reducidas, consiguiéndose monturas extremadamente ligeras, aunque la densidad del material en sí sea elevada. Un estrecho margen de temperaturas limita las posibilidades de adaptación de la montura, y por ello la mayoría de monturas llevan las varillas metálicas lacadas del mismo color del frente. La posibilidad de reparación de este tipo de monturas es prácticamente nula, pues con un pegado no se restablecen su resistencia a la tracción, que es su principal ventaja. Por ello, los fabricantes ya tienen prevista la fácil reposición de los frentes de las mismas.

En resumen, las principales diferencias que permiten clasificar los materiales para monturas plásticas en dos grandes grupos, son las siguientes:

a) *Composición química*: los derivados de la celulosa son polímeros naturales transformados, de cadenas lineales y contienen plastificantes, mientras que los otros plásticos son polímeros reticulados tridimensionales, que en ningún caso contienen plastificantes.

b) *Propiedades térmicas*: los derivados de la celulosa son termoplásticos, mientras que los otros plásticos suelen ser termoestables.

c) *Sistema de fabricación*: los derivados de la celulosa pueden fabricarse por fresado e inyectado, mientras que los otros plásticos siempre se fabrican por inyectado.

d) *Posibilidad de reparación*: los derivados de la celulosa son solubles en distintos disolventes, lo que permite su soldadura, mientras que los otros plásticos sólo se pueden reparar por pegado con acrilatos, al no ser solubles.

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de los conceptos expuestos en este apartado. Las propiedades mecánicas hacen referencia a las condiciones de uso de la montura (figura 2.1), mientras que las propiedades térmicas condicionan el montaje de las gafas, en el proceso de introducción de las lentes en la montura, en el alineamiento de la montura y su ajuste anatómico al usuario. El porcentaje de absorción de agua influye en la estabilidad de la adaptación de la montura en la cara del usuario.

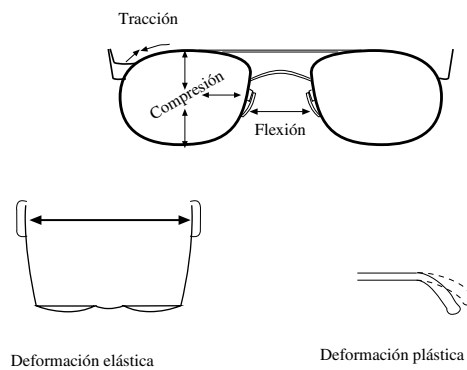


Fig. 2.1 Influencia de las propiedades mecánicas en las condiciones de uso de la montura

Tabla 2.1 Propiedades de los materiales para monturas plásticas

| | CN | CA | CP | EP | PA | PMMA | CF |
|--|---------------------------|--------------------|-----------|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| <i>Densidad (g/cm³)</i> | 1,38 | 1,3 | 1,22 | 1,1 | 1,04 | 1,2 | 1,5 |
| <i>T conformado (°C)</i> | 70 | 80-100 | 80-115 | 100-130 | 50-80 | 100-110 | 110-120 |
| <i>T límite deformación (°C)</i> | 100 | 130 | 150 | 250 | 100-110 | * | 120-260 |
| <i>T combustión (°C)</i> | 140 | 180 | 180 | 350 | 140 | 170 | 350 |
| <i>Resistencia tracción (N/mm₂)</i> | 60-70 | 30-50 | 30-50 | 75 | 75 | 110 | 1800 |
| <i>Resistencia flexión (N/mm₂)</i> | * | * | 40-60 | 110 | * | * | * |
| <i>Resistencia impacto HV60 (N/mm₂)</i> | 60-70 | 50-80 | 50-80 | 130 | 130 | 130 | * |
| <i>Absorción agua (%)</i> | * | 4,2 | 2,6 | 0,2 | 1,2 | 0,4 | 0,2 |
| <i>Procesos fabricación</i> | Fresado Inyectado | Fresado Fresado | Inyectado | Inyectado | Inyectado | Inyectado | Moldeado |
| <i>Reparación</i> | Soluble | Soluble | Soluble | Pegado | Imposible | Pegado | Imposible |
| <i>Interacción piel</i> | * | Media | Baja | Depende barniz | Baja | Baja | Depende barniz |
| <i>Uso común de las gafas</i> | Graduada Sol Desuso | Graduada Sol | Sol | Graduada Sol | Deportes Protección | Graduada Desuso | Graduada |

2.2 Proceso de fabricación de monturas plásticas

Atendiendo al proceso de fabricación de monturas plásticas, las podemos clasificar en dos grupos. Hablaremos de monturas inyectadas cuando la materia prima es introducida en el molde donde endurecerá adoptando la forma del propio molde. El otro grupo de monturas serán las que se obtienen a partir de una plancha de material y mediante diversos procesos de fresado, se consigue la forma deseada.

Monturas plásticas inyectadas

La obtención de éstas se consigue introduciendo el material que constituirá la montura en un molde que conforma el material, obteniéndose así tanto varillas como frentes. Dependiendo del material con que se fabrique la montura y de sus posibilidades de manipulación, se trabajará con la técnica de llenado del molde por diferencia de presiones o bien por medio del extrusionado.

Siendo conscientes de la existencia de una extensa literatura dedicada a los procesos de inyección de plásticos, aquí nos referiremos a algunos de los conceptos aplicables en el campo que nos ocupa.

Un molde para la inyección de monturas está construido a partir de un bloque metálico, dividido en dos mitades, el interior de las mismas se rebaja convenientemente para que una vez ensambladas quede en el interior un vacío con la forma de la montura o varillas que queramos obtener a partir de ese molde. El rebajado del interior del molde se consigue con un proceso de electroerosión y un pulido posterior: el objetivo es que al desmoldear el frente de la montura o las varillas, su calidad superficial sea prácticamente la deseada en el elemento terminado. El molde empleado para la inyec-

ción deberá de tener un orificio de entrada de material y al menos uno para la evacuación del aire confinado en su interior; además de unos encajes localizados en la zona del codo y extremos de las varillas, donde antes de cerrarlo se colocaran las bisagras. Se debe de tener en cuenta que los frentes y varillas una vez desmoldeados salgan preparados para ser pulidos, decorados y ensamblados.

El llenado del molde en el caso de trabajar con acetato de celulosa, propionato de celulosa o poliamidas se consigue por extrusión. El proceso del extrusionado se lleva a cabo dentro de un cilindro termostatado a unos 100°C, uno de cuyos extremos está en contacto con la parte inferior de una tolva donde colocamos el material en forma de granulado. El material fundido se desplaza en el interior del cilindro por la acción de avance producida por un tornillo sin fin, obligando al material a salir por el otro extremo del cilindro, donde se halla ajustado el molde por su entrada. La figura 2.2 presenta un esquema representativo de este proceso.

El material fundido inunda los huecos del molde desplazando el aire que saldrá por los orificios de evacuación. En el caso de trabajar con resinas epoxi, el llenado del molde se consigue por diferencia de presión. En el interior del molde se crea una depresión que favorece la entrada de la mezcla a polimerizar. Al igual que en la inyección de acetato, antes de cerrar el molde se han colocado las bisagras del frente y las varillas. El endurecido del material dentro del molde se consigue sometiendo al molde a una temperatura de unos 100°C durante media hora.

Tanto en el caso de monturas de acetato como de resinas epoxi, después del desmoldeado pasan por un proceso de pulido en bombos (se describirá más adelante). Las monturas fabricadas con resina epoxi son coloreadas en la masa: el colorante se añade a la resina antes de introducirla en el molde, o bien, justo antes de la última etapa del pulido, se colorean por inmersión, técnica que permite obtener degradados u otros tipos de decoraciones. Después del pulido final se procede a su ensamblado, marcado y barnizado, con lo que se obtiene un acabado superficial muy duradero.

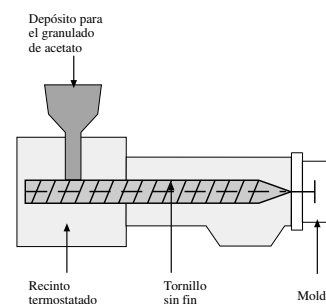


Fig 2.2 Llenado de molde por extrusionado

Monturas plásticas fresadas

El acetato de celulosa ha sido durante mucho tiempo el material empleado por excelencia en la fabricación de monturas plásticas fresadas. Actualmente esta afirmación es vigente y probablemente lo seguirá siendo durante muchos años.

El primer paso en la elaboración de una montura, sea del tipo que sea, es su diseño, que se tratará ampliamente en el capítulo 19. En la actualidad esta parte del proceso se lleva a cabo por el diseñador con sistemas CAD (diseño asistido por computador). A continuación es trabajo del artesano la obtención de un prototipo hecho totalmente a mano. Con el diseño de CAD y el prototipo se analiza la viabilidad del diseño, desde dos puntos de vista, uno el estrictamente de producción, donde se responde a la pregunta de si con la maquinaria disponible es posible fabricar ese diseño, y la otra pregunta es si interesa fabricarlo por cuestiones de mercado. Asumiendo que el diseño es aceptado, se pasa a una fase de generación de utillaje, que consiste en preparar todos aquellos elementos (soportes especiales, fresas, copiadores) que, sin pertenecer a las monturas, permitirán adaptar la maquinaria disponible en el taller para llevar a cabo la producción del diseño.

En la fase siguiente se reúne toda la forniture precisa para la fabricación de un determinado número de unidades del diseño en cuestión. En este sentido se elige el material a emplear (coloreado

de la plancha, espesor), bisagras, varillas y embellecedores entre otros elementos. El fabricante de monturas de acetato fresadas compra el material ya conformado en plachas cuyas dimensiones pueden ser de 3 x 2 m, con espesores que oscilan entre los 4 y 8 mm, posteriormente corta rectángulos cuyas dimensiones serán suficientes para obtener el frente, aproximadamente de 160 x 70 mm, e igualmente recorta rectángulos de 150 x 8 mm aproximadamente para obtener las varillas. Si la plancha está coloreada, se debe de tener la precaución de que al efectuar los cortes, la orientación de las coloraciones sea la adecuada para que tanto el frente como las varillas presenten el aspecto deseado una vez terminadas.

El siguiente paso será el fresado de frentes y varillas. Genéricamente, un fresado consiste en el arranque de material mediante una fresa. Este arranque de material se produce para llevar a cabo rebajes (redondeo de plaquetas o codos) o bien cortes de material (vaciado del interior de los frentes); la fresa es el elemento cortante, y consta de la zona de corte y la de evacuación de material, y para el trabajo con materiales blandos como el acetato de celulosa debe de girar a una velocidad comprendida entre 15.000 y 20.000 revoluciones por minuto. Las operaciones de fresado se llevan a cabo con fresadoras específicas. Actualmente se emplean fresadoras que son máquinas herramientas controladas por control numérico. En la figura 2.3 se representa el esquema de una de ellas, donde se aprecia el soporte de rectángulos de acetato, que posee cuatro grados de libertad, correspondientes a los desplazamientos respecto a los ejes x, y, z, y giro respecto a uno de ellos. Se observa también el cabezal portamotores, al que se adaptan un determinado número de conjuntos motor-portafresas. La colocación del conjunto motor-portafresa adecuado para cada una de las operaciones a efectuar sobre el frente se consigue mediante la rotación del cabezal portamotores. Estas máquinas se equipan con unos sistemas de alimentación de rectángulos y evacuación de frentes que son automáticos, lo que permite un trabajo ininterrumpido sin necesidad de intervención de operarios.

46

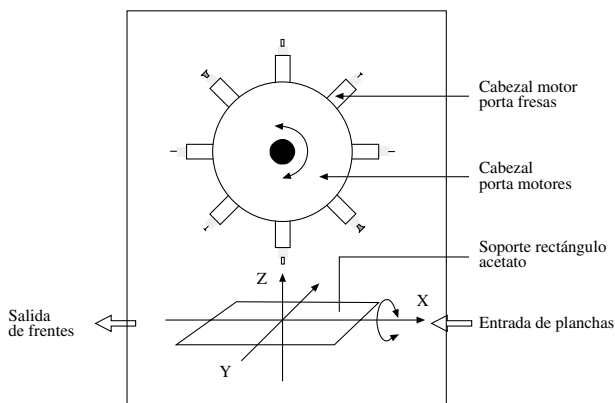


Fig. 2.3 Fresadora automática

Se debe tener en cuenta que las máquinas herramientas controladas por control numérico están destinadas a producciones de grandes series, y su versatilidad es muy elevada, pues para cambiar de modelo de frente a fabricar sólo es preciso ejecutar el programa correspondiente a ese modelo. Hoy en día todavía su coste es muy elevado.

Actualmente se emplean también los pantógrafos para diversas operaciones de fresado. Están constituidos por un copiador y una fresa que se desplazan solidariamente por la acción de un operario. El copiador palpa sobre un útil o plantilla que es una reproducción a escala de la parte

interior o exterior del frente, la fresa sigue su movimiento y va cortando la forma sobre el rectángulo que posteriormente será el frente. En la figura 2.4, se representa el esquema de un pantógrafo.

a) Se debe de tener en cuenta que en la fabricación de un frente pueden haber un total de 15 a 20 operaciones de *fresado* distintas. El orden de operaciones de fresado que se llevan a cabo para la obtención de un frente es el siguiente:

– *Fresado de interiores*: el rectángulo se sujeta por su parte exterior, y se cortan los interiores de los aros, a la vez que son ranurados.

– *Fresado de exteriores*: se debe de sujetar el rectángulo por el interior de los aros, se corta todo el perfil exterior del frente y con fresas específicas se da la forma al puente, a las plaquetas y a los codos. Posteriormente se redondea todo el exterior del frente.

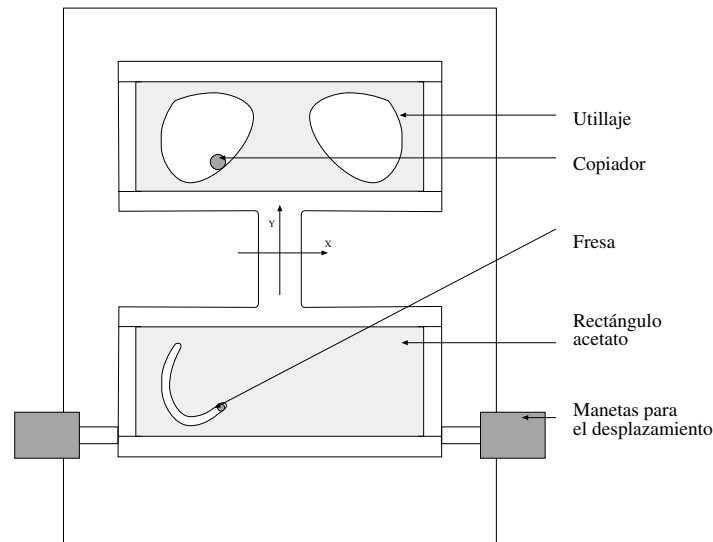


Fig. 2.4 Pantógrafo

b) *Empotrado de las bisagras*: se realiza una vez se han efectuado todas las operaciones de fresado. Para ello se practica un orificio en la parte posterior de cada uno de los codos, teniendo en cuenta que el volumen de material desalojado debe de ser igual al volumen de la parte inferior de la bisagra que empotraremos. Para la operación de empotrado calentaremos la bisagra, introduciéndola verticalmente en el orificio practicado en cada codo del frente.

c) *Fabricación de las varillas*: en primer lugar se fresan los rectángulos, obteniendo la varilla totalmente estirada, y posteriormente se clava un alambre que lleva soldado en uno de sus extremos la bisagra. La función de este alambre es la de mantener la varilla en la posición y forma adecuadas para la correcta adaptación de la montura al usuario.

d) El siguiente paso será el de *proteger las bisagras* del frente y de las varillas, para que no se deterioren durante el pulido. Estas protecciones consisten en recubrir sus goznes con material plástico (acetobutirato de celulosa, CAB) que será eliminado una vez superado el proceso de pulido.

e) *Pulido*, tanto de frentes como de varillas. Para ello se dispone de unos bombos de sección hexagonal, que poseen un movimiento de giro axial, con una velocidad de unas 30 revoluciones por minuto. Su interior contiene tres elementos que conforman el abrasivo: astillas de madera con formas romboidales, pomez o pasta de pulir y aceite que permite la adherencia del pomez en las aristas vivas de las astillas. El proceso de pulido consta de varias etapas (de tres a cinco), cada una las cuales corresponde a un bombo que está cargado con un determinado abrasivo, en el que permanecen los frentes y varillas durante unas doce horas, periodo en el que el bombo está girando ininterrumpidamente. Una vez transcurrido este tiempo se cambia la carga (frentes y varillas) al bombo siguiente, hasta completar todo el proceso.

f) El *ensamblado* (ajuste de varillas al frente), *decorado*, *marcado* y *empaquetado* son las últimas etapas del proceso de fabricación de monturas fresadas.

Monturas metálicas

2.3 Materias primas, metales y aleaciones

Los materiales que componen las distintas partes de una montura metálica son en su mayoría aleaciones de distintos metales, cuyas propiedades las hacen aptas para la construcción de talones, aros, varillas, puentes, etc. Se podrían enumerar los principales requerimientos del material ideal:

a) Debe presentar una *elevada resistencia a la corrosión* producida principalmente por el sudor corporal, los agentes atmosféricos y los cosméticos. Su *dureza*, entendida como la oposición a ser rayada, debe de ser elevada para que la montura mantenga, con el tiempo, un aspecto brillante.

b) Distintas partes de la montura (aros, codos,...) están sometidas a *esfuerzos mecánicos de tracción y compresión* importantes que deberá de ser capaz de soportar. A la vez que deberá presentar unas *buenas propiedades elásticas*, lo que favorecerá el mantenimiento de la buena adaptación de la montura al usuario.

c) Si atendemos al proceso de reparación, tendremos que preveer que sea *fácilmente manipulable y soldable*.

d) El usuario agradecerá siempre que el material sea de *baja densidad*, lo que permite reducir el peso de la montura y lógicamente que su *coste sea reducido*.

En la actualidad no existe un material que cumpla con todos estos requerimientos, razón por la que se emplean unas determinadas aleaciones para cada uno de los distintos elementos que componen la montura (aros, codos, varillas).

48

En la tabla 2.2 se indican las aleaciones derivadas del cobre que tradicionalmente se emplean. En ella se valoran, para cada una de las aleaciones, las características reseñadas entre 1 y 4 (de mejor a peor).

En cambio, también se pueden encontrar monturas que estén compuestas por un metal en todas sus partes. Tradicionalmente estos metales o aleaciones no contienen cobre en su composición, y han sido el aluminio, acero inoxidable, oro y desde hace pocos años el titanio.

a) *Aluminio*. Es un material cuyo principal atractivo es la posibilidad de ser coloreado, por oxidación electroquímica se puede dar una capa de óxido coloreado. Su densidad es baja y la resistencia al rayado se mejora considerablemente aleándolo con otros metales; cabe destacar su elevada maleabilidad y su aceptable resistencia a la corrosión; el principal inconveniente es que los procesos de soldadura que se emplean tradicionalmente en la fabricación y reparación de monturas no son adecuados para este material.

b) *Acero inoxidable*. Durante unos años aparecieron en el mercado monturas fabricadas con este material. Su principal ventaja eran sus muy buenas propiedades mecánicas que permitían que las secciones de aros y varillas fueran más reducidas, hecho que compensaba el incremento de densidad que presenta respecto a otras aleaciones. Se empleaba en monturas de niño, y su elevada resistencia a la corrosión permitía además obtener monturas muy duraderas.

c) *Titanio*. Es un metal que desde hace pocos años ha irrumpido con éxito en el campo de las monturas debido a su muy elevada resistencia a la corrosión, baja densidad y muy buenas propiedades mecánicas gracias a las que se pueden obtener perfiles de aro y varillas con secciones extremadamente pequeñas.

La posibilidad de alearse con otros metales hace que exista una extensa gama de tonos blancos o dorados. El principal inconveniente es la dificultad de manipulación que presenta (en concreto su soldadura sólo es posible en instalaciones específicas).

Tabla 2.2 Propiedades de las aleaciones más empleadas en la fabricación de monturas metálicas

| | <i>Alpaca</i> | <i>Monel</i> | <i>VM-níquel</i> | <i>KM-4</i> |
|---|-----------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------|
| <i>Composición(%)</i> | Cu65% Zn23% Ni12% | Cu30% Ni68% Mn1% Fe1% | Ni98% Mn2% | Cu60% Ni60% Mn2% |
| <i>Dureza Vickers HV 5 (N/mm₂)</i> | 900-1700 | 1250-2350 | 1000-2250 | 1200-2500 |
| <i>Densidad (gr/cm₃)</i> | 8.7 | 8.9 | 8.9 | 8.4 |
| <i>T recocido ablandamiento (°C)</i> | 650 | 780 | 720 | 800 |
| <i>Color</i> | Blanco-amarillo | Gris-blanco | Gris-blanco | Blanco |
| <i>Resistencia corrosión</i> | 4 | 1 | 1 | 2 |
| <i>Maleabilidad</i> | 1 | 2 | 4 | 1 |
| <i>Propiedades plásticas</i> | 1 | 3 | 2 | 2 |
| <i>Soldadura</i> | 1 | 2 | 3 | 1 |
| <i>Pulido</i> | 1 | 2 | 2 | 1 |
| <i>Utilización</i> | Bisagras Tornillos | Varillas Puentes Codos Aros | Aros | Varillas Puentes |

d) *Oro*. El oro puro es un metal muy resistente a la corrosión que se emplea en la fabricación de monturas siempre aleado con otros materiales que mejoran sus propiedades mecánicas, dependiendo del material y de las proporciones se puede obtener una enorme variedad de colores y tonalidades.

Antiguamente se empleó el placado de oro en el que se consigue un alambre cuyo exterior es oro (o una aleación de oro) y en el interior es un metal menos noble que mejora las propiedades mecánicas del conjunto; posteriormente este alambre es conformado para obtener perfiles de aro, varillas, etc.

2.4 Proceso de fabricación de monturas metálicas

Al igual que en el proceso de fabricación de las monturas plásticas, la primera de las acciones es la de realizar un diseño que reúna las condiciones mínimas de estética y funcionalidad. A partir de este diseño, se realiza la selección de materiales de sus componentes y las piezas normalizadas, con lo que se materializa de forma prácticamente artesanal un prototipo, y a partir de éste, se realiza un estudio de la viabilidad de fabricación seriada.

Decidido el modelo que va a ser fabricado en serie, el fabricante se pone en contacto con un distribuidor de fornitura que le pueda proporcionar todos los componentes (bisagras, tornillería, portaplaquetas, puente, perfil de aro) elegidos para ese diseño en concreto.

El perfil que conformará los aros es suministrado en bobinas continuas donde está enrollado, con una longitud de varios metros, y deberá pasar un control de calidad de su uniformidad tanto en su forma y medidas exteriores como en la ranura interior. El perfil se cortará a la medida y con la forma

exacta del aro que se pretende fabricar, de tal manera que sus extremos queden encarados en el punto donde colocaremos la parte central del cierre del aro.

Una vez el fabricante ha reunido todos los componentes de la montura y ha construido los utilajes necesarios para su producción en serie, inicia el proceso de producción siguiendo los pasos siguientes.

Ensamblado y soldado: con un orden preestablecido irá soldando todos los componentes del frente entre sí: normalmente empezará por ensamblar los dos aros al puente, posteriormente colocará los portaplaquetas, y el paso siguiente es soldar el cierre del aro. Para esta operación se pueden emplear dos métodos dependiendo del tipo de cierre elegido:

a) El cierre es de una sola pieza, de modo que una vez soldado a los extremos del aro, éstos quedarán unidos, y posteriormente este cierre se cortará por la mitad.

b) El cierre consta de dos piezas que se soldarán una a cada extremo del aro.

En cualquiera de los dos casos la superficie de contacto del cierre puede ser plana o en forma de V, pero siempre se debe conseguir un perfecto ajuste. En este punto sólo queda el ensamblado del codo, donde previamente se habrá soldado la bisagra, con la parte del cierre correspondiente.

Una vez está el frente ensamblado, éste presentará un aspecto bastante pobre, pues se habrán conjuntado distintas partes de distintos materiales, y en las zonas próximas a las soldaduras quedarán restos de decapante.

En un proceso paralelo se preparan las varillas que partiendo de un alambre y por medio de la estampación se han obtenido con la forma y perfil deseados. En el extremo anterior se suelda la bisagra.

50

Pulido: el pulido de las monturas se lleva a cabo en bombos, que recuerdan a los empleados para las monturas plásticas, pero que presentan diferencias sustanciales con respecto a éstos. Básicamente pueden distinguirse porque sus dimensiones son menores, su interior está recubierto por una chapa metálica que evita un rápido desgaste y la principal diferencia es que los frentes y varillas (antes de ensamblarse) se sujetan ordenadamente en armazones metálicos que a su vez quedan anclados en el interior del bombo, para evitar que se enreden varios frentes y varillas entre sí.

El abrasivo está compuesto por astillas de madera, aceites y partículas de abrasivo de distintos tamaños y durezas, según estemos en las fases de desbaste o pulido. Los tiempos de cada una de las fases del pulido dependen mucho de la dureza del material a pulir.

Ensamblado y decorado: una vez pulidos el frente y las varillas, se procede a su ensamblado, que consiste en montar las varillas a la vez que se ajustan los ingletes. A continuación se desengrasa y lava exhaustivamente toda la montura, y se eliminan los posibles restos de abrasivo.

El decorado de la montura se compone de dos fases: en primer lugar se uniformiza la superficie por medio de un baño galvánico, seguido de algún otro tratamiento superficial. En segundo lugar se añaden los detalles decorativos propios de cada diseño, y posteriormente se identifica la montura, tampografiando en la parte interior de sus varillas el modelo, color y otros datos identificativos como son el calibre, el puente y en ocasiones la longitud de la varilla (todos los datos numéricos en mm).

Ajuste, control de calidad y almacenado: en este punto del proceso de fabricación se colocan los terminales a las varillas y a continuación se procede al curvado y centrado del frente. Para poder dar por terminado el proceso de fabricación, se somete a cada montura a un control de calidad muy estricto, en el que se detectan los posibles defectos tanto en las soldaduras como en el pulido o en los tratamientos superficiales a que ha sido sometida. En caso de no superar el control de calidad, se elimina el defecto. Una vez ha superado el control de calidad, se procede a su empaquetado y distribución.

2.5 Tipos de soldadura

Los metales que intervienen en una montura, debido a que tienen elevados puntos de fusión, sólo se pueden soldar mediante *soldadura dura*, que se denomina así porque que se realiza a temperaturas por encima de los 600°C (siempre inferior a la temperatura de fusión de las piezas a unir). En este grupo podemos distinguir entre la denominada *soldadura dura amarilla* en la que se emplea cobre, latón y zinc como materiales de aportación y las temperaturas oscilan entre los 650°C y los 950°C, y la *soldadura dura blanca*, usada en monturas y que emplea aleaciones de plata con un punto de fusión alrededor de los 600°C.

La composición química de una de las aleaciones utilizadas es la siguiente:

Ag 40%, Cd 20%, Cu 19%, Zn 21% (L-Ag40 Cd).

El proceso de soldadura de dos piezas consiste en unir las por medio de un material que se llama aleación de *aportación*. Para ello se colocan las dos piezas en contacto, y mediante una fuente de calor se eleva la temperatura hasta llegar a la temperatura de fusión de la aleación de aportación, instante en el que se pone en contacto con las dos piezas a soldar. La aportación fluirá sobre las partes a soldar, uniéndolas al enfriarse, consiguiéndose así la soldadura.

El principal problema es que las fuentes de calor (normalmente se obtienen por combustión de una mezcla de gases) provocan la oxidación de las piezas que se quieren soldar. Si es excesiva, las propiedades mecánicas de los materiales de las piezas variarán sustancialmente, y la calidad de la soldadura conseguida será mala. Para reducir este efecto de oxidación y mejorar el flujo de la aportación, antes de calentar es preciso colocar en las zonas a soldar un antioxidante o *fundente*.

La figura 2.5 es un gráfico en el que se representan las temperaturas de fusión de la alpaca y el monel, así como el margen de temperaturas adecuado para el fundente y la aleación de aportación. De ella se concluye que las piezas deben ser calentadas entre 590 y 630°C, si se emplea la aportación L-Ag40 Cd.

Teniendo en cuenta que la montura terminada es el resultado de ensamblar cada uno de sus elementos constitutivos mediante soldadura, se presentan a continuación las tres técnicas más utilizadas en el campo de la óptica oftálmica: la soldadura por resistencia, la soldadura por oxhídrico, y la soldadura por alta frecuencia.

a) *Soldadura por resistencia*: el principio de funcionamiento se basa en el efecto Joule. Se parte de una fuente de baja tensión continua o alterna, y su salida se conecta a dos electrodos que a su vez se conectarán cada uno de ellos a una de las piezas que se van a soldar. Haciendo pasar una cierta intensidad, la zona de mayor resistencia, que corresponde a la zona de contacto entre las dos piezas, se calentará considerablemente. El método más normal para regular la temperatura consiste en variar el voltaje de la fuente de tensión.

Como ventajas de esta técnica destaca la fácil regulación de la cantidad de calor suministrada las piezas, bajo mantenimiento, fácil instalación y precio económico.

Como inconvenientes, la dificultad de posicionamiento de las piezas, largos tiempos de ejecución, y la

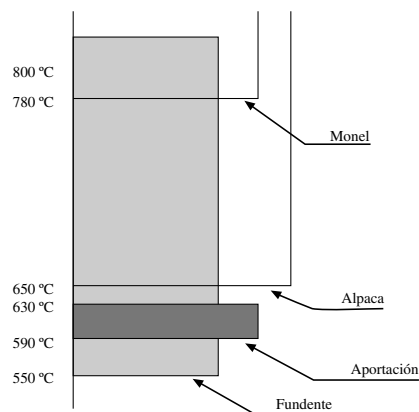


Fig. 2.5 Temperaturas de fusión (soldadura dura, aportación L-Ag 40 Cd)

posibilidad de que queden marcadas las zonas donde hacen contacto los electrodos debido a falsos contactos eléctricos.

Esta técnica se emplea poco en la fabricación de monturas debido sobretodo a su elevada lentitud y dificultad de posicionado de las piezas.

b) Soldadura por oxhídrico: la técnica consiste en obtener una mezcla combustible de gases: oxígeno e hidrógeno en una relación de una parte de oxígeno y dos de hidrógeno. Para la obtención de la mezcla se hace circular una corriente continua a través de una disolución de agua con aditivos. Al paso de esta corriente se desprenden átomos de hidrógeno y de oxígeno, creando una mezcla gaseosa inflamable. Debido al riesgo de explosión, las medidas de seguridad de estos aparatos deben ser elevadas. El gas es conducido a una boquilla de salida intercambiable de diversos diámetros normalmente entre 0.5 y 1 mm, y dependiendo de este diámetro y de la presión del gas, se obtiene una llama más o menos grande. Acercando una llama al extremo de la boquilla se produce la combustión y aparece una llama (también denominada *dardo*, por su forma) de color verde que en la zona más caliente llega a los 2.200°C de temperatura. El color natural de la llama resultante de la combustión de este gas es muy pálido. Por el peligro que supone su manipulación, dadas las elevadas temperaturas de trabajo, es necesario hacerlo más visible, por lo que, en un proceso de filtrado, se le añaden aditivos que le confieren este color verde.

La ventaja de este método es el elevado poder calorífico de la llama, que hace que se caliente muy rápidamente la zona que se quiere soldar. Además, el posicionado de las piezas es fácil y rápido. La temperatura se puede regular mediante la medida de la llama y el acercamiento de ésta a la pieza.

Como inconvenientes podemos destacar el riesgo de explosiones y su mantenimiento relativamente costoso.

Este es el sistema más empleado en procesos de reparación y en fabricación de artesanía.

c) Soldadura por inducción: el principio de funcionamiento se basa en la circulación de corrientes de Foucault. Las piezas que se tienen que soldar se deben situar en el interior de una bobina, a través de la cual se hará circular una corriente alterna de alta frecuencia (unos 50 KHz). Por efecto de la inducción electromagnética se calentarán las piezas.

Este método cuenta con la ventaja de que no presenta dificultad alguna en el posicionamiento de la pieza, es rápido y de bajo mantenimiento. La regulación de la temperatura es muy precisa y se consigue variando la frecuencia del oscilador incorporado a la máquina.

Su máximo inconveniente es el elevado precio del equipo, que a menudo requiere una adecuación de la red a la que se conecta (genera ruido electromagnético en la red). El ajuste de los parámetros de la máquina debe hacerse en función de las dimensiones de la pieza.

Este tipo de proceso es el más empleado en la fabricación de monturas en serie, y por los inconvenientes citados no se usa en el taller de reparación de monturas.

2.6 Tratamientos superficiales

Los objetivos básicos de los recubrimientos de la superficie de la montura son: proteger el material frente a la corrosión, aumentar la resistencia al desgaste y la dureza, uniformizar el color de la montura y posibilitar la decoración.

Para conseguir estos objetivos se pueden emplear alguno o varios de los siguientes métodos:

- a) placado
- b) barnizado
- c) galvanizado
- d) plastificado

El *placado* tiene una clara tendencia a emplearse poco debido al encarecimiento del producto terminado.

Consiste en obtener un alambre en el que su zona central (núcleo) es de alguna aleación de metales con elevado contenido en cobre (como la alpaca o el monel) y la parte externa está constituida por una aleación cuyo principal componente es oro. A partir de este alambre, con procesos de trefilado y prensado se obtienen perfiles de aro, varillas, puentes, etc.

En definitiva se puede obtener una montura compuesta por una base de alpaca que le dará muy buenas propiedades mecánicas y toda ella recubierta por una aleación de oro que la hará altamente resistente a la corrosión, además de ser muy estable su color al paso de los años.

b) El *barnizado* es una técnica que consiste en depositar una capa de barniz sobre el metal, que previamente se ha sometido a un proceso de galvanizado, de aproximadamente unas 100 micras de espesor. La depositación se consigue sumergiendo la montura en el barniz y dejándola secar en una atmósfera exenta de polvo. Los inconvenientes de este método son la mala adherencia del barniz sobre el metal, y la dificultad de que en el secado no se incrusten partículas de polvo y no se produzcan goteos indeseables.

c) El *galvanizado* es el método de recubrimiento que más se emplea. Se basa en la depositación de un metal por medio de la electrólisis. El recipiente en el que tiene lugar el proceso es la célula de electrólisis y la disolución electrolito. Durante el proceso, se produce un trasiego de átomos del metal que está conectado al ánodo hacia el objeto a recubrir. El electrolito contiene principalmente sales del metal a depositar. Este proceso sólo se produce si existe una circulación de corriente entre el ánodo y el cátodo, y esto se consigue a partir de una fuente de tensión continua. La tensión que se aplica es de entre 3 y 15 voltios, por lo que por la montura circulará una determinada intensidad de corriente. Los factores que intervienen en la depositación son la temperatura, la agitación del electrolito, la densidad de corriente (relaciona la intensidad que circula con el área de la superficie a recubrir) y el tiempo. Si la temperatura aumenta, permite aceptar mayores densidades de corriente, con lo que la depositación es de grano más fino y brillante, y un incremento de la agitación o del tiempo, provocan un aumento del espesor de la capa depositada.

En la figura 2.6 se muestra el esquema de un baño galvánico industrial.

El galvanizado tiene la ventaja de que produce una distribución muy regular de la capa, llegando a todas las zonas de la montura. Como inconveniente se puede mencionar la dificultad de obtener espesores superiores a las decenas de micra. En la mayoría de los casos el baño se aplica sobre el material base formándose un *sandwich* (figura 2.7) en el que intervienen distintas capas finas que suelen ser de distintos materiales. Los materiales base suelen ser poco nobles mientras que los de las capas externas suelen ser los más nobles, como el oro, el rodio, el rutenio, el platino o la plata, que le proporcionan un aspecto agradable a la vez que actúan de protección frente a la corrosión. Otros metales usados en los baños galvánicos son el níquel y el cromo, que puede adoptar una coloración blanca o negra mate.

Se debe tener presente que el proceso de galvanizado no consigue dar un mayor brillo a la superficie que se quiere recubrir (a menos que se empleen baños muy específicos); por esa razón, como paso primero se debe conseguir mediante el *pulido* el nivel de brillo que se pretenda que tenga el producto acabado.

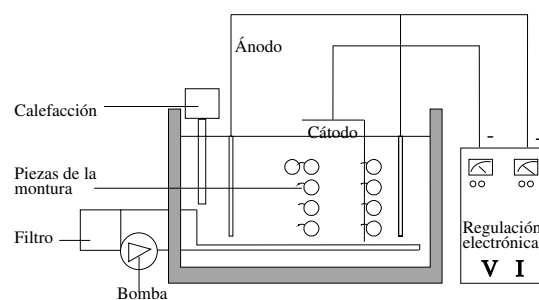


Fig. 2.6 Baño galvánico industrial

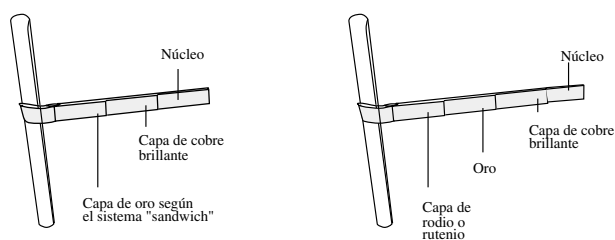


Fig. 2.7 Galvanizado sistema sandwich

En el taller de reparación se utilizan técnicas de depositación por cepillado. Este método consiste en colocar el electrolito sobre la zona a recubrir por medio de un rotulador que está conectado a una fuente de tensión. Al poner en contacto la zona de la montura que se va a someter al baño (previamente conectada a la fuente de tensión), con el rotulador se cierra el

circuito depositándose el baño. Es muy rápido y sencillo de llevar a cabo, pero los espesores de la depositación son muy pequeños, sólo se emplea este método como decoración después de la reparación.

d) El *plastificado* se realiza mediante la depositación en un campo eléctrico de un barniz en forma de polvo, con lo que se puede obtener un espesor de capa muy regular. El polvo de materia plástica que queda adherido a la montura se funde en un horno, y se obtiene una capa de barniz totalmente envolvente del material base de la montura. El polvo de materia plástica se aplica por presión de aire cargándose eléctricamente al abandonar el pulverizador. Por efecto del campo electrostático se desvían las partículas de polvo cargadas negativamente hacia la montura, que está cargada positivamente, quedando por esta razón el polvo perfectamente adherido a la montura. Se suelen conseguir espesores de capa de 50 a 200 μm . La fusión y el horneado se realizan a temperaturas entre 180°C y 200°C durante unos 10 ó 15 minutos. La montura posteriormente se puede colorear por inmersión, consiguiéndose fácilmente degradados.

Bibliografía

- BOHN, H. «Tecnología para ópticos». *Ver y Oír*, nº 79, Puntex, 1989.
 CAUM, J.; TORRENT, J. «Materiales para monturas plásticas», *Ver y Oír*, nº 85, Puntex, 1994.
 GOODFELLOW «Metals, alloys, polymers, composites». Catálogo 1995/96.
 HORNE, D.F. *Spectacle Lens Technology*. Bristol, Adam Hilder Ltd., 1978.