

CAPITULO 1

Preparaciones minerales para estudio microscópico

Tipos de preparaciones. La preparación de los minerales para su estudio microscópico está condicionada, principalmente, a la clase de microscopio utilizado. Si solamente se desea examinar las características superficiales, como cuándo se emplea un microscopio binocular, es necesaria poca preparación. En este caso, pueden ser examinados, sin montaje especial, cristales pequeños, minerales en grano y aun muestras de algunos centímetros de espesor, ya sean opacas o transparentes, en un orden de ampliación de hasta unas 100 veces.

En otros estudios, el microscopio que se utiliza, es distinto para los minerales opacos que para los transparentes. Los minerales opacos se cortan de forma que se obtenga una superficie plana, se montan de modo conveniente para su manipulación y se pulimentan hasta obtener una brillante superficie especular. Tales superficies se examinan con el microscopio de reflexión. Los minerales transparentes se pegan generalmente a los cristales portaobjeto con bálsamo de Canadá u otro material de montaje, transparente y similar. Los cristales pequeños, los granos o los fragmentos se colocan sobre la porción central del portaobjetos y se observan sin ulterior preparación; las arenas y los concentrados minerales son particularmente apropiados para este sistema. Las preparaciones, una vez montadas, se examinan con luz transmitida en el microscopio polarizante.

Una forma habitual de examen microscópico, empleada con los minerales transparentes, incluye la utilización de secciones delgadas. Este texto está principalmente dedicado a tales tipos de estudios. Las secciones delgadas tienen, ordinariamente, unos 0,03 mm de grueso y una superficie de algunos centímetros cuadrados.

Son muchos los minerales que pueden ser estudiados ventajosamente en secciones delgadas con el microscopio polarizante. Probablemente, la aplicación más ampliamente utilizada es el examen de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Sin embargo, la técnica es apta para una utilización muy amplia: con las impregnaciones convenientes, pueden ser preparadas para esta forma de estudio tierras, arcillas y muchas clases de materiales poco consolidados. Los fragmentos minerales también pueden cementarse en una briqueta y pulimentarse en lámina delgada.

Los cristales minerales, o los compuestos químicos artificiales, son a menudo orientados y cortados según ángulos determinados con objeto de acentuar ciertas propiedades ópticas. Frecuentemente, es cuidadosamente

marcada la posición de la muestra rocosa respecto al afloramiento en que fue tomada, cuando se desea relacionar la orientación de los cristales individuales en una sección delgada con la masa rocosa de la que proviene la sección.

Materiales para las secciones delgadas. Son pocos los estudiantes de mineralogía que preparan por sí mismos las secciones delgadas, pero es conveniente que todos conozcan cómo se efectúa esta preparación. Con paciencia y destreza manual ordinaria pueden los estudiantes aprender a realizar secciones delgadas lo mismo que las efectúan los profesionales¹. La rapidez puede no ser la misma que la de un profesional, pero con un poco de cuidado la sección cortada puede ser igualmente satisfactoria.

La técnica a emplear varía con la naturaleza del material. El esmerilado de secciones delgadas de rocas compactas (ígneas, sedimentarias o metamórficas) es un proceso rutinario. Las rocas friables o fracturadas deben ser firmemente cementadas con una sustancia penetrante aglomerante

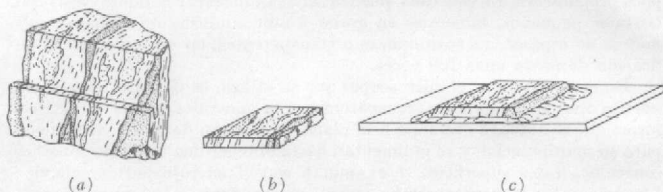


FIG. 1-1. (a) Una roca seleccionada para sección delgada y serrada para obtener una esquirla. (b) Esquirla de dimensiones adecuadas cortada para sección delgada (la superficie de fondo, plana). (c) La esquirla montada sobre un cristal portaobjetos con bálsamo de Canadá, preparada para la primera etapa de pulimentado.

antes de montarlas sobre un cristal portaobjetos. Uno de los métodos incluye un calentamiento preliminar de la muestra mineral sumergida en bálsamo de Canadá, ya sea en plato abierto o bajo una campana de vacío. El metil metacrilato «lucita» ha sido utilizado por Bell (1939) para impregnar en el vacío los minerales friables. Exley (1956) ha impregnado muestras de caolín friable con una resina sintética suministrada por la Bakelite, Ltd. La muestra friable es cementada con una mezcla de (1) resina, (2) un agente modificante, (3) un catalizador y (4) un acelerador. Los cuatro materiales (con su correspondiente número de venta) se mezclan en la proporción siguiente: resina, 100 g (SR 17431); agente modificador, de 10 a 15 g (Z 17453); catalizador, 1 g (Q 17447); acelerador, 2 g (Q 17448). Se dice que a 25° gela-

¹ La lista siguiente se da para información de los lectores que deseen los nombres de los técnicos fabricantes de secciones delgadas:

D. M. Organist, Box 176, Newark, Del.

George Rév, 324 Schermerhorn Hall, 119 St. and Amsterdam Ave., New York 27, N.Y.

Fred Roberts, 1300 S. Monterey Pass Rd., Monterey Park, Calif.

Alexander Tihonravov, 954 Russel Ave., Los Altos, Calif.

Rudolph von Huene, 865 N. Mentor Ave., Pasadena, Calif.

tiniza la mezcla en 2 horas. A 50° endurecería en seis horas, y a 100° en una. Secciones delgadas cortadas de un granito descompuesto, en el que la caolinita había remplazado al feldespato, conservaban con este tratamiento cristales agudos en los bordes.

Las primeras etapas en la preparación de una muestra rocosa están indicadas en la Figura 1-1. El primer problema reside en escoger el material y decidir la dirección del corte. Si ya se ha elegido una muestra adecuada para su efectivo estudio microscópico, tal muestra debe contener materiales de grano fino no estudiables a simple vista, estructuras que se aclaren prontamente mediante el examen microscópico o algunas de las características secundarias tan efectivamente reveladas por la observación microscópica. La dirección en que la sección debe ser cortada, debe marcarse claramente en la muestra.

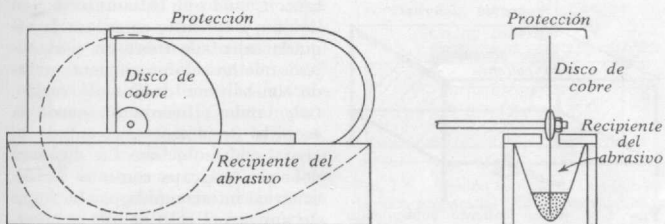


FIG. 1-2. Una sierra mineralógica, formada por un disco laminado de cobre duro que emplea carborundum.

La esquirra mineral. El primer paso en la fabricación de una sección delgada incluye la preparación de una esquirra mineral con una superficie lisa apta para ser colocada sobre un portaobjetos. Esta esquirra puede ser arrancada de la muestra y alisada por uno de sus lados, o aserrarse directamente de ella una lámina de dimensiones adecuadas. Una esquirra ideal tiene unos 2 cm² y 3 mm de espesor.

Cuando se desea cortar esquirras pueden utilizarse varios tipos de sierras. En cada caso, sin embargo, la acción de corte es más bien una abrasión, a lo largo de una ranura, que un corte, en el sentido usual de la palabra. La acción de abrasión es efectuada por un polvo abrasivo; la sierra, propiamente dicha, es generalmente un disco metálico. Este disco puede ser alimentado de abrasivo en partículas sueltas o puede estar embebido de él en su borde exterior. Los materiales abrasivos pueden ser carborundum o polvo de diamante.

La Figura 1-2 muestra una sierra mineralógica ordinaria. Esta puede ser un disco de cobre laminado, endurecido, que gira dentro de una artesa llena de carborundum y lodo; el borde del disco rotativo recoge el carborundum y produce una fricción contra la muestra. Manteniendo una mezcla adecuada de carborundum, barro y agua es posible cortar completamente en pocos minutos un canal delgado de unos dos centímetros en cuarzo.

Cuando una esquirla está ya lista, se pule por un lado una superficie plana, utilizando sucesivamente carborundum 100, FFF y 600 y terminando con esmeril 302 $\frac{1}{2}$ de la American Optical Company. En el caso de una roca muy blanda, se omite el primer pulido con carborundum 100; ya que es muy grueso y tiende a destruir los materiales blandos.

La superficie de fondo, plana, pero no pulimentada, es lavada y secada, y después se monta sobre un cristal portaobjetos empleando como cementante bálamo del Canadá o Lakeside 70. El bálamo debe ser cocido a 160° durante unos dos minutos hasta obtener un botón sólido y tenaz; la esquirla

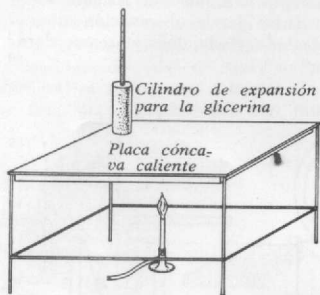


FIG. 1-3. Placa caliente conteniendo una cámara de glicerina y un termómetro adecuado para el control de la cocción del bálamo de Canadá. (Desarrollado por Paul H. Bird.)

debe ser calentada también a 120° antes de su montura. El bálamo no debe ser sobrecocido, pues entonces llega a ser demasiado quebradizo y hasta puede volverse castaño. Cuando el bálamo está aún líquido y caliente, se coloca la esquirla calentada sobre un portaobjetos que ha sido previamente untado con bálamo de Canadá cocido. Calentando el conjunto, queda la esquirla firmemente cementada al cristal portaobjetos. La ligadura debe ser una capa continua de bálamo no interrumpida por burbujas de aire; en el caso de que se observen burbujas de aire, la esquirla debe ser calentada, desmontada y montada de nuevo. El problema de la correcta cocción del bálamo

puede ser resuelto utilizando una plancha caliente con termostato de control o una placa con glicerina como se ve en la Figura 1-3. El Lakeside 70, calentado a 140°, puede usarse como cemento directamente, sin cocer. Su índice de refracción, $n = 1,540$, es muy próximo, pero ligeramente más alto que el del bálamo (1,537). Las bolsas de aire que pueden formarse entre la esquirla y el cristal portaobjeto son menos frecuentes que con el bálamo.

Corte de la esquirla hasta una sección delgada. Se ha dedicado mucha atención al problema de producir una lámina delgada uniforme de 0,03 mm a partir de una esquirla de algunos centímetros de grosor. En general, esto puede realizarse utilizando dos caminos. En el primer método, la esquirla es pulida en etapas sucesivas con carborundum y esmeril sobre una pulidora, de un modo similar al empleado para producir una superficie especular en la esquirla. En el segundo método, se corta la esquirla en una sierra cuidadosamente ajustada a unos 0,06 mm y luego se termina en una pulidora hasta 0,03 mm.

El pulido mecánico de las esquirlas montadas tiene lugar sobre ruedas pulidoras de metal o sobre una superficie plana. Estas ruedas pulidoras deben tener un diámetro mínimo de 30 cm y girar a una velocidad de

600 r.p.m. El cojinete de apoyo debe estar protegido contra el polvo abrasivo. Las muelas para el pulido fino deben ser de cobre o latón y deben estar ranuradas; los tipos de ranura helicoidal resultan muy efectivos. Cuando se utilizan sierras de precisión de diamantes para el corte inicial de las esquiras, hasta seis u ocho centésimas, pueden terminarse las esquiras a mano sobre un cristal plano con polvo abrasivo o, en última instancia, con papel abrasivo.

Durante todo el proceso deben tomarse grandes precauciones respecto a la limpieza. A menudo puede destrozarse una sección delgada por el simple efecto, en un momento inoportuno, de un grano de goma de borrar dura contra la lámina.

El lado descubierto de la esqirila montada es pulimentado por rotación sobre carborundum medio, fino y alundo. El alundo se emplea cuando la esqirila ha sido reducida a un espesor de unos 0,1 mm. La muestra puede apoyarse sobre una pulidora estriada rotativa o acabarse a mano sobre una placa de cristal bruñido. Para el pulido final se utiliza alundo fino o pasta esmeril. Generalmente se emplea agua para hacer la pasta, pero los materiales solubles exigen el uso de keroseno o glicol. La última etapa requiere una considerable destreza manual. La lámina delgada debe conservar un espesor uniforme

durante todo el desgaste y éste debe continuarse hasta obtener un grueso de unos 0,03 mm. Este espesor de la lámina debe controlarse durante esta última etapa por la observación microscópica de los colores de interferencia que dan algunos minerales conocidos que contenga la sección, cuando se la cubre con una película de agua. Generalmente está presente el cuarzo; en este caso, los colores de interferencia deben ser casi totalmente blancos o grises. Algunos prefieren grandes secciones en las que el espesor puede ser de 0,04 mm. Una sección delgada, correctamente realizada, muestra un notable grado de transparencia.

Pueden utilizarse pequeños asideros para coger la esqirila durante su preparación. Estos asideros mantienen paralelas las caras opuestas de la muestra, facilitando el pulido, y también permiten al operador pulimentar varias secciones al mismo tiempo, hasta llegar a la etapa final. La combinación usual es de tres portaesquiras: uno, para seis muestras a la vez, se usa durante el desbaste hasta unos 0,5 mm; el segundo, para dos muestras, lleva la pulimentación a 0,1 mm; y el tercero, para una sola, completa la preparación. En el caso de que no sea posible el empleo de estos instrumentos, puede pegarse con bálsamo un pequeño corcho por detrás del portaobjetos.

Cuando la sección ha sido pulida hasta su espesor adecuado, se la lava para librarla del polvo de la pulimentación y se la seca. Entonces se unta con bálsamo fresco la superficie de la lámina y se calienta y cubre con un

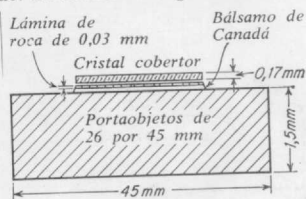


FIG. 1-4. Sección vertical de una lámina de roca preparada. (Escala vertical exagerada.)

cristal cubreobjetos (cuyo espesor es de 0,17 mm o menor). A continuación, es enfriada la preparación y disuelto con xylol el exceso de bálsamo que rodea el borde del cubreobjetos, siguiendo un lavado con keroseno. La sección delgada queda así protegida y lista para su utilización (Figura 1-4).

En el caso de que la lámina esté formada por material sólido y compacto, puede trasladarse del cristal portaobjetos, en que ha sido pulimentada, a otro libre de arañazos. Para efectuar la transferencia, se unta con bálsamo el portaobjetos que contiene la sección y se calienta en una placa bajo una

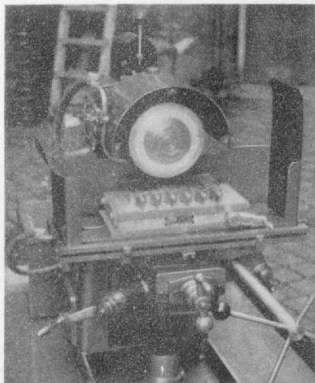


FIG. 1-5. Sierra de diamantes diseñada por E. O. Rowland, para cortar láminas de roca de unos 0,06 mm. (*Cutrock Engineering Co., Ltd., Dollis Mews, Dollis Park, Finchley, London, N. 3, England.*)

campana. Se coloca en la placa caliente, próxima al portaobjetos rayado que contiene al mismo tiempo la esquirla y el bálsamo cocido, un portaobjetos limpio untado con bálsamo². Cuando ambas unturas de bálsamo han cocido, se separa la lámina del portaobjetos rayado con la ayuda de un palillo y se traslada sobre el portaobjetos limpio. A continuación, se tapa con un cubreobjetos del modo habitual.

Empleando sierras metálicas que contengan, embebido en el canto, polvo de diamante³ (Meyer, 1946) pueden efectuarse cortes rápidos y precisos. La esquirla lisa es pegada al cristal portaobjetos empleándose como cementante Lakeside 70. Una sierra de diamantes bien equilibrada puede cortar en una sola operación las esquirlas bien colocadas a un espesor de unos 0,06 mm; posteriormente son reducidas al espesor standard en una muela acabadora.

Rowland (1953) ha diseñado una sierra semejante a la mostrada en la Figura 1-5. La sierra está montada verticalmente sobre una plataforma que es capaz de desplazarse con precisión horizontal y verticalmente. Un soporte especial, montado en la plataforma, sujeta los materiales que han de seccionarse. Los equipos de este tipo han sido llamados *petrotomos* por Isachsen (1951).

Secciones delgadas especiales. Las películas delgadas de «costra» arrancadas de superficies planas de arcilla pueden montarse con bálsamo en un cristal portaobjetos y observarse como si fueran secciones delgadas ordinarias; son, en su mayoría, extremadamente finas, aunque deben arrancarse de la masa las partículas gruesas, y debiendo tenerlas en cuenta en el balance de la película.

² El bálsamo precocido debe ser calentado para el montaje a 100°.

³ La Consolidated Diamond Tool Corporation, Yonkers, N.Y. fabrica una hoja de seis pulgadas cargada con polvo de diamante.

Cuidadosamente, se prepara una superficie bruñida mediante pulimentación en placas secas de vidrio deslustrado. Mientras todavía está húmeda, se cubre la superficie con amilacetato y piroxilina. Después de secar la preparación durante 5 ó 6 horas, se quita la película formada por la piroxilina sobre la superficie de arcilla con una hoja de afeitar. Se monta entonces la lámina sobre un portaobjetos y se protege con un cubreobjetos.

Ocasionalmente se realizan secciones delgadas especiales en las que el área de la preparación tiene un máximo de 75×100 mm, aunque su grueso suele ser mayor que de ordinario. Tales preparaciones permiten el estudio de relaciones texturales que se extienden fuera del área normalmente cubierta por una sección delgada. Han sido también utilizadas, de un modo limitado, para reflejarlas con un proyector bien directamente o con luz polarizada derivada de láminas polarizadoras superpuestas.

Es frecuente el que se examinen muestras que contengan conjuntamente minerales opacos y transparentes. La técnica de la pulimentación de los minerales metálicos y los métodos de observación empleados quedan fuera del plan de este libro, pero debemos puntualizar que varios laboratorios consideran más ventajoso el preparar secciones delgadas de doble aplicación. Estas secciones no solo están rebajadas hasta el espesor convencional, sino que también tienen una superficie pulimentada que permite el examen de los componentes metálicos con luz reflejada, además del usual estudio con luz polarizada. (Rankama, 1941; Kennedy, 1945.)

BIBLIOGRAFIA

- Bell, James F.: Notes on the Uses of Methyl Methacrylate «Lucite» in a Geological Laboratory, *Econ. Geol.*, vol. 34, pp. 804-811, 1939.
- Exley, C. S.: A Method of Impregnating Friable Rocks for the Cutting of Thin Sections, *Mineral. Mag.*, vol. 31, pp. 347-349, 1956.
- Isachsen, Y. William: A Petrotome Modification for Cutting Extremely Thin Rock Sections, *Proc. Penn. Acad. Sci.*, vol. 25, pp. 109-112, 1951.
- Kennedy, George C.: The Preparation of Polished Thin Sections, *Econ. Geol.*, vol. 40, pp. 353-360, 1945.
- Keyes, Mary G.: Making Thin Sections of Rocks, *Am. J. Sci.*, 5.^a ed. ser., vol. 10, pp. 538-550, 1925.
- Meyer, Charles: Notes on the Cutting and Polishing of Thin Sections, *Econ. Geol.*, vol. 41, pp. 166-172, 1946.
- Rankama, K.: An Improved Technique for the Making of Thinned Polished Sections, *Econ. Geol.*, vol. 36, pp. 561-563, 1941.
- Ross, C. S.: Methods of Preparation of Sedimentary Materials for Study, *Econ. Geol.*, vol. 21, pp. 454-468, 1926. Véase también *Am. J. Sci.*, 5.^a ser., vol. 7, pp. 483-485, 1924.
- Rowland, E. O.: A Rapid Method for the Preparation of Thin Rock Sections, *Mineral. Mag.*, vol. 30, pp. 254-258, 1953.
- Weatherhead, A. V.: A New Method for the Preparation of Thin Sections of Clays, *Mineral. Mag.*, vol. 25, pp. 529-533, 1940.
- Weymouth, A. Allen: Simple Methods for Marking Thin Sections, *Econ. Geol.*, vol. 23, pp. 323-330, 1928.
- Wilson, D. A. P. y V. L. Bosazza: A Rock Cutting Machine for the Preparation of Specimens for Microscopic Examination, *Can. Mining J.* vol. 59, n.º 10, pp. 549-550, 1938.

CAPITULO 2

El microscopio polarizante

Características generales. El microscopio polarizante se emplea universalmente para examinar los minerales transparentes, aunque para trabajar con formas especiales de minerales se utilizan otros tipos, tales como (1) el microscopio de fase, (2) el microscopio de reflexión y (3) el microscopio binocular. El microscopio de fase se emplea para distinguir partículas oscuras diminutas. El de reflexión sirve para las superficies pulidas de minerales metálicos. Y el microscopio binocular es utilizado principalmente para observar características superficiales.

Aparte de algunas referencias a los otros microscopios, este libro se limita a tratar del microscopio polarizante, ya que éste se aplica a un extenso tipo de estudios¹. Es universalmente empleado para examinar tanto granos minerales, fragmentos y pequeños cristales como secciones delgadas de minerales, rocas y otros cristales. Es particularmente utilizado para determinar las propiedades ópticas de los cristales individuales o agregados y en la interpretación de texturas y relaciones varias de las sustancias naturales o artificiales, tal como aparecen en las secciones delgadas. Entre el considerable número de modelos disponibles, se han seleccionado como ilustración, en las Figuras 2-1 a 2-6, varios microscopios polarizantes. Esta serie de instrumentos útiles va resultando adecuada para mayor número de trabajos a medida que se dispone de mayor número de modelos, especialmente diseñados para la investigación.

El sistema de lentes del microscopio polarizante se corresponde en muchos aspectos al sistema de lentes de los microscopios compuestos corrientes, pero contiene varias modificaciones que incrementan grandemente su utilidad para el trabajo con los minerales. Las características más distintivas son los dispositivos polarizante y analizador, situados respectivamente debajo y encima de la platina. Son así mismo característicos: la platina

¹ He aquí una lista de las firmas que fabrican o distribuyen microscopios polarizantes:

American Optical Company (Scientific Instrument Division), Buffalo 11, N.Y.
Bausch and Lomb Optical Co., Rochester 2, N.Y.
Cooke, Troughton and Simms, York, England.
E. Leitz, Inc., 468 Fourth Ave., New York 16, N.Y.
Reichert, William J. Hacker & Co., Inc., 82 Beaver St., New York 5, N.Y.
Unitron, United Scientific Co., 204-6 Milk St., Boston, Mass.
Zeiss-Winkel (Gottingen), Carl Zeiss, Inc., 485 Fifth Ave., New York 17, N.Y.

rotativa, las lentes Amici-Bertrand y varios accesorios tales como la lámina de mica, la lámina de yeso, la cuña de cuarzo y el compensador.

El microscopio polarizante, tal como se emplea en el examen de los minerales, utiliza indistintamente luz polarizada plana y luz con los planos de polarización cruzados. Para la inspección ordinaria hay un artificio polarizador inferior, colocado bajo el condensador, y el artificio polarizador superior se deja a un lado, fuera de uso. Para el examen entre planos cruzados, se intercalan en el eje óptico placas polarizantes opuestas o prismas nicol² en ángulo recto.

La Figura 2-1 muestra un eficaz microscopio polarizante equipado con placas polarizantes (polaroide). Las secciones delgadas se sujetan a la platina giratoria mediante unas mordazas de muelle. Los polaroides especiales de alta calidad, usados en estos microscopios, proporcionan una viva extinción negra y figuras de interferencia claras.

En la Figura 2-2 se ve un microscopio polarizante con prisma deflector y tubo inclinado para una cómoda observación. Los nombres con que se designan sus diferentes partes figuran a uno y otro lado de la fotografía. La platina no solamente gira, sino que también puede ser subida y bajada. El prisma nicol analizador y las lentes Amici-Bertrand van incluidas en el tubo, entre el objetivo y el ocular.

Una vista general y una sección de un microscopio polarizante con prismas de polarización aparecen en las Figuras 2-3 y 2-4. Como se ve, el tren óptico, a partir del espejo, consiste en el polarizador (tipo Arhens), las lentes fijas inferiores y las renovables superiores del condensador, el objeto colocados sobre la platina, el objetivo, el analizador (tipo Arhens), las lentes Amici-Bertrand y el ocular. Con esta disposición, el aparato da observación conoscópica, utilizada para

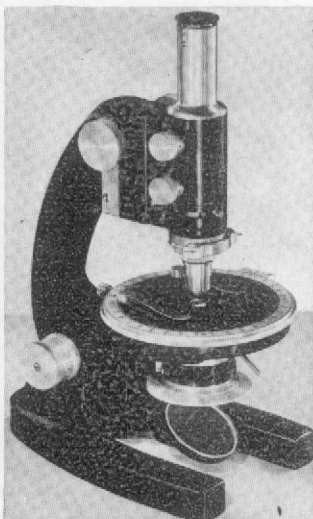


FIG. 2-1. Modelo de microscopio polarizante para estudiantes, provisto de placas polarizadoras. (Bausch and Lomb Optical Co.) La placa analizadora y las lentes Amici-Bertrand están empotradas en el tubo óptico y se sitúan dentro o fuera del eje óptico girando los botones correspondientes. La platina es rotatoria y también puede subirse y bajarse.

² Se emplea a menudo el término *nicol* para designar el artificio polarizante empleado en el microscopio. Esto proviene del prisma primitivamente diseñado por William Nicol. Los prismas, actualmente utilizados, más eficientes, son tipo *Arhens* o similares. Las placas polarizantes pueden ser también sustituidas.

las figuras de interferencia. Eliminando las lentes Amici-Bertrand, el microscopio proporciona observación ortoscópica.

Una sección y una vista general de un microscopio polarizante más complicado, un tipo combinado para investigación y trabajo, aparecen en las Figuras 2-5 y 2-6. En este modelo, el sistema óptico consiste en una placa polarizadora, las lentes inferiores (fijas) del condensador, las renovables superiores del mismo, el objeto (colocado sobre la platina), el objetivo,

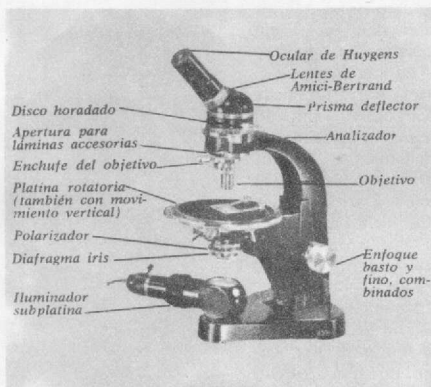


FIG. 2-2. Microscopio polarizante con placas polarizadoras y prisma deflector. (E. Leitz, Inc.). Sus características le hacen aconsejable para la mayoría de los trabajos microscópicos. El tubo ocular está inclinado para permitir la observación según un ángulo conveniente; el analizador y el polarizador son placas polarizadoras; y puede utilizarse, indistintamente, un espejo o un iluminador inferior.

la placa analizadora, el prisma deflector y el ocular. Según esta disposición, el instrumento es adecuado para observación ortoscópica. El prisma deflector y el tubo inclinado rempazan a la junta y disposición de inclinación de la Figura 2-4, con ellos la platina permanece siempre horizontal. Se emplean placas tanto para el polarizador como para el analizador. Este y las lentes Amici-Bertrand son giratorios, para entrar y salir del eje óptico, en sustitución del sistema de deslizadera de los instrumentos precedentes.

Sistema óptico. El microscopio polarizante puede disponerse bien para observación ortoscópica o bien para observación conosocópica. La observación ortoscópica proporciona una imagen virtual con un campo plano del objeto sobre la platina del microscopio; los minerales pueden examinarse con luz polarizada simple o con los nicoles cruzados. La observación conosocópica capta las figuras de interferencia, que representan un efecto óptico originado por el paso de la luz a través de los cristales individuales; estas figuras se forman en el plano focal posterior del objetivo, por lo que pueden observarse a simple vista quitando el objetivo y eliminando las

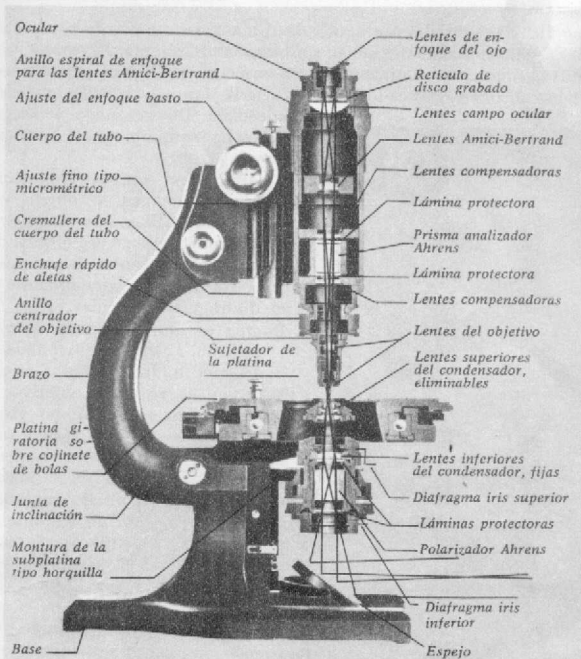


FIG. 2-3. Sección de un microscopio polarizante standard (*American Optical Co.*). El instrumento está equipado con prismas nicol (tipo Ahrens), con un sistema vertical continuo y resulta adecuado, tanto para la observación ortoscópica como para la conoscópica. Los nombres de sus diferentes partes se indican a ambos lados de la figura.

lentes Amici-Bertrand, o como una imagen ampliada con el objetivo en su lugar y las lentes Amici-Bertrand insertadas. En la Figura 2-7a, b, se comparan las trayectorias de los rayos en las observaciones conoscópica y ortoscópica. Además de los artificios polarizantes, la disposición óptica en la observación ortoscópica incluye: una fuente de iluminación, un sistema de concentración de la luz, un condensador bajo la platina, el objeto a observar sobre ella, el objetivo, el ocular con la imagen del campo y el anillo del objetivo.

Si se intenta obtener los mejores resultados posibles, es importante, no considerando la fuente de iluminación empleada, regular la luz que entre en el microscopio con respecto al sistema óptico. Para conseguir estos resultados, la fuente de iluminación debe estar provista de los correspon-

dientes filtros, el iluminador equipado con un diafragma-iris y es conveniente que el condensador también contenga un diafragma. El campo visual del microscopio debe limitarse cuidadosamente con estos diafragmas y el sistema de filtros utilizado debe reducir la iluminación a la intensidad adecuada. De este modo, se asegura una separación apropiada para cada aumento.

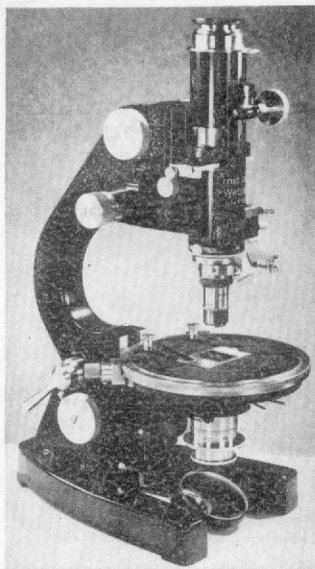


FIG. 2-4. Microscopio polarizante (E. Leitz, Inc.). Tanto la platina como el tubo pueden ajustarse verticalmente. El instrumento va equipado con prismas nicol.

Hay tres campos importantes ligados: la imagen, el objeto y la fuente de luz. El campo visual circular percibido por el observador, cuando mira a través del microscopio, está limitado primeramente por el diafragma del ocular. Este diafragma es fijo y además contiene el retículo. La imagen ampliada del diafragma limita el *campo imagen* tal como se ve en el objetivo. El campo objeto es un campo visual, cuyo diámetro es igual al del campo imagen dividido por el aumento total; mide el área de la sección delgada, u otro objeto cualquiera en observación, en un instante determinado. El *campo fuente* es el campo visual en el cristal del filtro del iluminador (Figura 2-8). El diámetro del campo fuente es el producto del diámetro del campo objeto por el recíproco de la reducción debida al condensador. En el control de la iluminación, la zona de luz que sale del iluminador es limitada por el condensador de modo que resulte igual al campo fuente. Cuando la luz que entra en el microscopio está

controlada de esta manera, se ilumina solamente la parte circular del objeto que está bajo observación y se suprime el deslumbramiento debido a las interferencias de la luz marginal.

Cuando se enfoca el condensador, el diafragma del iris determina la apertura adecuada para aquél. Es importante que toda esta apertura esté cubierta por una iluminación uniforme. Si se enfoca el objetivo y se quita el ocular, puede observarse la apertura del condensador mirando por el tubo del microscopio. Esta apertura, que puede ser llamada *círculo condensador*, es un área circular brillante rodeada por una banda o anillo confusamente iluminado; este último, designado a veces como círculo objetivo, no está limitado por un diafragma, sino por los bordes de las lentes del objetivo. En un microscopio ajustado, se dice que el círculo condensador debe

ser tan aproximadamente igual al círculo objetivo como sea posible, pero sin que se origine deslumbramiento. Esto es particularmente importante cuando se usan objetivos que dan un alto aumento inicial, con las correspondientes aperturas numéricas elevadas. Los objetivos de inmersión,

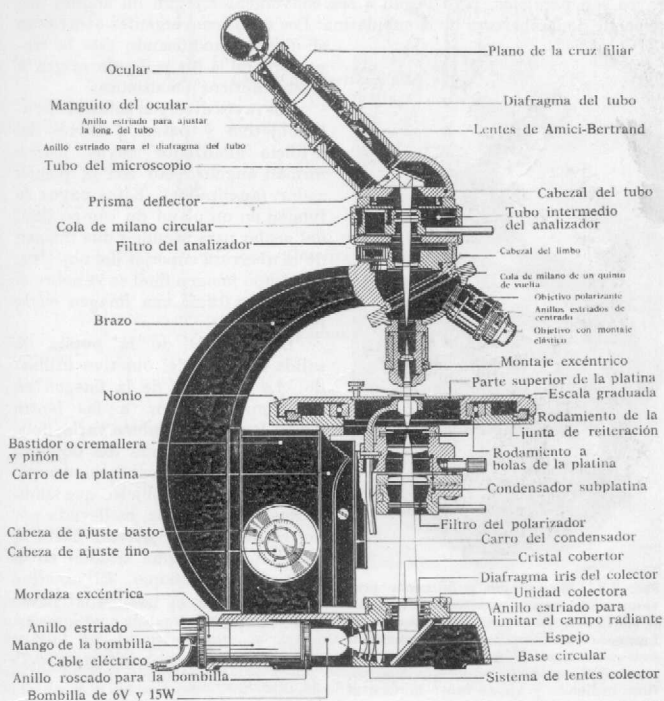


FIG. 2-5. Sección de un microscopio polarizante de investigación. (Carl Zeiss, Göttingen, West Germany.) El instrumento está construido con tubo inclinado, prisma deflector, placas polarizantes, iluminación interna y centrado excéntrico de los objetivos.

generalmente, requieren el empleo de condensadores de inmersión para evitar la pérdida de la amplificación útil por deslumbramiento. Pueden emplearse indistintamente condensadores de inmersión en aceite o en agua corregida. La apertura numérica del condensador debe ser un poco menor que la del objetivo.

Observación conosópica. La situación de la imagen y la iluminación difieren parcialmente de la disposición ortoscópica. El rayo de luz que pasa a través del diafragma del condensador ha atravesado el polarizador y, por consiguiente, está polarizado. Cuando salen del condensador, todos los rayos son paralelos, pero llegan a ser convergentes según un ángulo que depende de la abertura de la subplatina. Los rayos convergentes atraviesan

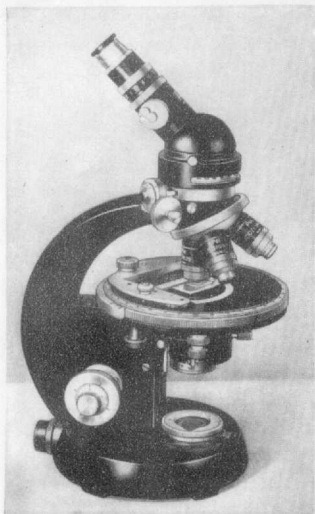


FIG. 2-6. Microscopio polarizante previamente mostrado en sección (Fig. 2-5). (Carl Zeiss, Göttingen, West Germany.) Las características de este microscopio son: placas polarizantes, objetivos de centrado excéntrico, iluminación interior, tubo inclinado y ajuste tanto horizontal como vertical de la platina.

el objeto, modificando éste la trayectoria de la luz y dando origen a efectos ópticos no usuales.

Los rayos divergen sobre el círculo objetivo y pasan a través del artificio analizador cuyos planos forman ángulo recto con el polarizador (analizador). Estos rayos se funden en un plano de campo final del ocular para producir una imagen de la abertura superior del objetivo. El campo imagen final se ve sobre el objetivo y forma una imagen en la retina del ojo.

La posición de la pupila de salida depende del objetivo utilizado. La distancia de la imagen en el campo superior a las lentes Amici-Bertrand también varía; debe ajustarse la situación del objetivo hasta permitir enfocar dicho campo.

La imagen del objeto, que simula una fuente de luz, es llevada por las lentes Amici-Bertrand hasta el plano del diafragma situado en el tubo del microscopio. El objetivo lleva entonces la imagen al plano de la pupila de salida del microscopio. La pupila del ojo se sitúa a este nivel para observar las figuras de interferencia.

Partes del microscopio. Las diferentes partes del microscopio pola-

rizante, equipado con placas polarizadoras o nicoles, están indicadas en las Figuras 2-2, 2-3 y 2-5. Los nombres de las disposiciones mecánicas están suficientemente auto-explicados, pero algunos aditamentos ópticos deben comentarse a continuación.

Oculares. El ocular es un tubo que se adapta dentro del tubo del microscopio, ordinariamente provisto de un pequeño prisionero que lo mantiene en una posición fija respecto al retículo norte-sur y este-oeste, situado en el campo de la imagen. En la parte superior está colocada una lente ocular y en la inferior, una lente de campo. En el ocular de Huygens (Fi-

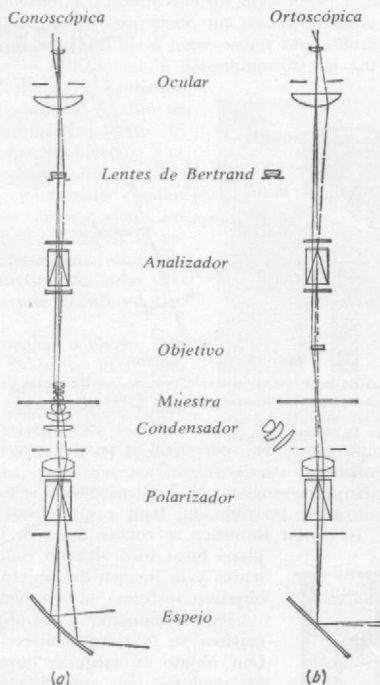


FIG. 2-7. Diagrama que ilustra la trayectoria de la luz a través del microscopio. (a) Observación conoscópica gran ampliación, ocular de Huygens, lentes Amici-Bertrand, prismas polarizantes, nicols cruzados y un condensador inmediatamente debajo del objeto. El ojo observa una propiedad óptica. (b) Observación ortoscópica: nicols cruzados, ampliación intermedia, ocular de Huygens, y prismas polarizantes. Se forma en el ojo un retrato plano real del objeto.

gura 2-9a), un limitador del campo visual, con retículo, cruz filiar y un campo micrométrico, está situado sobre las lentes de campo. En el ocular tipo Ramsden (Figura 2-9b) el limitador está debajo de las lentes de campo. Los planos de la imagen y del retículo deben coincidir.

Los oculares utilizados en los microscopios petrográficos son generalmente del tipo Huygens o modificaciones sencillas de éste. Normalmente se emplean en combinación con objetivos de 16 ó 40 mm. Cuando se desean combinaciones que den ampliaciones muy grandes, el ocular es semejante al de Huygens, aunque contiene lentes especialmente corregidas para pro-

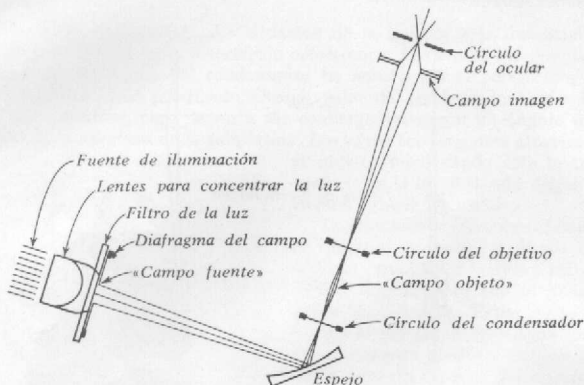


FIG. 2-8. Diagrama de las dimensiones relativas de los diferentes campos del microscopio y de su relación con la iluminación. (Según Belling.)

porcionar un campo plano. Tal corrección es particularmente importante en la microfotografía.

El ocular de Huygens es llamado frecuentemente *ocular negativo*. El ocular, considerado como un todo, no tiene campo focal exterior a las lentes de campo. El ocular Ramsden se conoce como *ocular positivo*. El plano focal está situado debajo de dichas lentes y la imagen del objeto, dada por el objetivo, se forma en este plano.

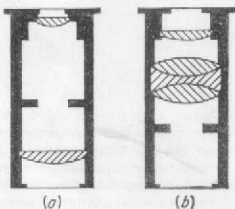


FIG. 2-9. Secciones de oculares positivos y negativos. (a) Ocular de Huygens (ocular negativo). (b) Ocular de Ramsden (ocular positivo).

Para acompañar a los objetivos apocromáticos se fabrican oculares compensados. Con objeto de asegurar buenos resultados, los oculares que amplifiquen más de diez veces deben ser de este tipo. En general, son suficientes para la mayor parte de los trabajos efectuados con el microscopio polarizante los oculares $5\times$ y $10\times$.

El objetivo filiar micrométrico está proyectado (Figura 2-10) para efectuar mediciones horizontales exactas en el campo visual. Una pequeña cruz filiar se desplaza hacia detrás y hacia delante; este movimiento es registrado en un tambor situado a un lado del objetivo. Una fina línea, que atraviesa el centro del campo, paralelamente al eje del tornillo, sirve para orientar el objeto con referencia a la dirección de movimiento del retículo. En la sección inferior del campo, una escala dividida en 0,5 mm, con cada dos intervalos numerados, vale para contar las vueltas del tornillo.

Los objetivos micrométricos son también utilizables cuando se quieren

conocer las dimensiones de objetos especiales en el campo visual (Figura 2-11a). El objetivo Huygens tiene una escala, dividida en 0,1 mm, desplazable mediante un tornillo; la lente ocular está enfocada a esta escala. Estos objetivos se utilizan en la determinación del ángulo axial de las figuras de interferencia; pudiendo estar calibrados, con el auxilio de la platina micrométrica, para su utilización con varios objetivos. Las dimensiones representadas por las divisiones del micrómetro ocular (Figura 2-11b) se corresponden a las observadas por el ojo según la relación que exista entre el objetivo, el ocular, la longitud del tubo y la presencia o ausencia del tren óptico del analizador.

Los micrómetros oculares tipo rejilla (Figura 2-11c) se usan para medir áreas de granos o fragmentos situados en el campo del microscopio. Estos objetivos están también calibrados, con ayuda de una platina micrométrica, para diversas combinaciones de lentes.

Objetivos. En la Figura 2-12 aparecen varios cortes de objetivos. Los acromáticos se emplean generalmente para el estudio de fragmentos o

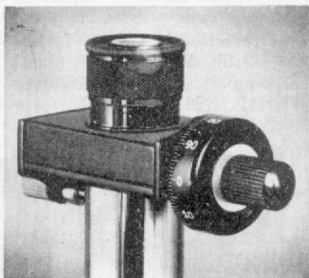


FIG. 2-10. Micrómetro filiar. El tambor registra el movimiento del retículo cuando éste atraviesa el campo visual. (Bausch and Lomb Optical Co.)

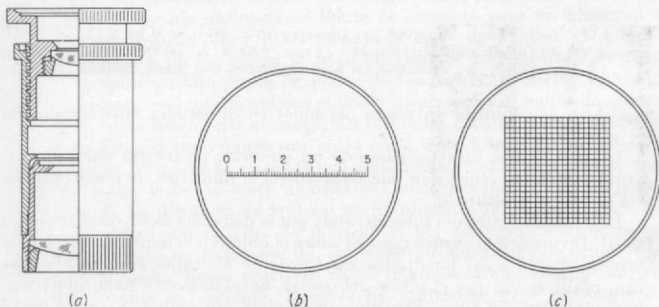


FIG. 2-11. (a) Micrómetro ocular; (b) escala de un micrómetro ocular; (c) micrómetro de rejilla. (Carl Zeiss, Gottingen, West Germany.)

secciones delgadas. Los fabricantes suministran como equipo standard los objetivos acromáticos 40—, 32—, 16— y 4— mm, los cuales sirven para la mayoría de los propósitos. La corrección de las aberraciones de la imagen se hace más difícil, en los objetivos acromáticos, para las grandes amplifi-

La apertura numérica (N. A.) de un objetivo es la medida del mayor cono de luz que éste cubre, siendo el vértice del cono un punto objeto situado en el foco principal. N. A. es igual a $n \sin \mu$, en donde n es el índice de refracción del medio interpuesto entre el objeto en examen y el objetivo ⁴ y μ la mitad del ángulo del cono de luz que entra en la lente. La apertura numérica proporciona un criterio para juzgar la calidad de un objetivo. Siendo igual todo lo demás, la intensidad de la imagen correspondiente a una ampliación determinada depende de la apertura numérica, el poder de resolución es directamente proporcional a ella y la profundidad del foco inversamente proporcional. Entre dos objetivos que tengan la misma distancia foca y, por ello, el mismo aumento, el de mayor N. A. tomará del objeto

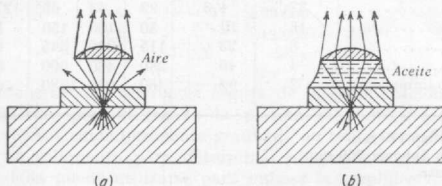


FIG. 2-13. Diagrama que explica la convergencia de la luz por medio de aceite de cedro colocado enfrente de la lente de un objetivo de inmersión. (a) Solo aire, sin aceite de cedro; (b) con aceite de cedro.

un cono de luz más amplio y dará una imagen más brillante. En general, y para una iluminación ordinaria, el límite de aumento para un observador corriente queda entre 500 y 1.000 veces la N. A.

Los objetivos de inmersión se usan en grandes ampliaciones en las que se necesita un alto grado de poder de resolución. El aceite utilizado debe concordar conjuntamente con el poder dispersivo y el índice de refracción de la lente frontal del objetivo. En la Figura 2-13 se explica el efecto del aceite sobre el cono de luz que entra en la lente frontal de un objetivo de inmersión. También se consigue una considerable ventaja colocando una gota de aceite entre la lente auxiliar del condensador y la platina del microscopio. La distancia de trabajo en un objetivo de inmersión es muy corta; las lentes son difíciles de fabricar y, por consiguiente, son caras. Un buen objetivo de inmersión da, sin embargo, un magnífico campo con alta ampliación. Estos objetivos deben manejarse cuidadosamente, en especial durante su enfoque. Después de utilizados, debe eliminarse el aceite con papel de lentes humedecido en xylol o bencina.

Aumento. Primordialmente el microscopio es un instrumento de ampliación. Por lo tanto, es conveniente tener una idea de la ampliación del campo visual con los sistemas de lentes disponibles. La tabla siguiente es un esquema de los aumentos para el ojo de las diferentes combinaciones

⁴ Aire ($n = 1$) en el caso de objetivo seco y aceite de cedro especialmente preparado ($n = 1,515$) en los objetivos de inmersión.

de objetivos, con foco equivalente a 40, 32, 16, 8, 4 y 2 mm (inmersión en aceite), y oculares con aumento respectivos de cinco, diez y quince veces:

AMPLIFICACIONES

Tipo de objetivo	Foco equiva- lente, mm	Número de aumentos	Amplificaciones con oculares			Distancia de trabajo, mm	N. A.
			5 ×	10 ×	15 ×		
Acromático.....	40	3,2	16	32	48	34,5	0,12
Acromático.....	32	4,3	22	43	65	27,0	0,15
Acromático.....	16	10	50	100	150	5,8	0,25
Apocromático.....	8	23	115	230	345	0,85	0,65
Apocromático.....	4	46	230	460	690	0,20	0,95
Aprocromático (inmersión)..	2	92	460	920	1380	0,11	1,32

Longitud de tubo: 170 mm

Distancia de la imagen: 250 mm

Tomado de Leitz.

Aun con los mejores sistemas de lentes disponibles, existen límites para el poder de resolución del microscopio. En tanto como la amplificación resulte en una mejor visión del objeto y en una separación más definida de los detalles, puede decirse que el aumento es «eficaz». Cuando solamente llega a ser mayor el objeto, sin ningún aumento del poder resolvente, se dice que la amplificación es «vana». Por ello, son llamadas *vanas* las amplificaciones de las mayores magnitudes posibles.

Para los propósitos prácticos, el límite superior del aumento eficaz con microscopio polarizante es, aproximadamente, 1.800 : 1.⁵ Los aumentos mayores, como frecuentemente se referencian, son resultado de alguna forma de proyección o empleo de equipo especial, no siendo claramente conocidos los límites exactos de la amplificación eficaz en estos casos. Las microfotografías, tomadas con una cámara de fuelle largo, pueden incrementar varias veces la amplificación dada por el microscopio; así pueden obtenerse relación de amplificación de 3.000 : 1 ó 4.000 : 1 y aun considerablemente mayores. Tal incremento sobre la amplificación propia del microscopio es esencialmente engrandecimiento y no se obtiene un aumento en la resolución. Desde el punto de vista de mejora en resolución o detalle, resulta una amplificación «vacua». Sin embargo, los engrandecimientos microfotográficos de este tipo pueden tener valor para la enseñanza.

Se dice que el límite de resolución para la luz verde, con lentes de N. A. 1,40, es aproximadamente de 0,18 micras. Esto representa la dis-

⁵ Un objetivo de inmersión (Carl Zeiss) de aumento primario 120, N. A. 1,3 y distancia libre de trabajo 0,08 mm, dará, en combinación con un ocular 15 ×, una relación de amplificación 1.800 : 1.

tancia que separa en el campo visual del microscopio a dos objetos puntuales, cuyas imágenes, al proyectarse en el ojo, se tocarían. Se ha demostrado matemáticamente que el límite de resolución es igual a la longitud de onda dividida por el doble de la apertura numérica. Según esta relación, es posible determinar el número de líneas por centímetro que pueden ser separadas por las diferentes aperturas numéricas. Pueden darse varias listas semejantes a la siguiente, referente a la luz azul de longitud de onda 486:

N.A.	<i>Líneas por centímetro, separadas</i>
1,30	55.000
0,85	36.000
0,65	28.000
0,30	13.000

Puede obtenerse una referencia segura de la ampliación del campo visual del microscopio, utilizando la platina micrométrica, que es un cristal portaobjetos cuidadosamente graduado en centésimas de milímetro. Se emplea, no solamente para determinar el aumento del microscopio, sino que también puede utilizarse para indicar la ampliación de microdibujos, microproyecciones y microfotografías.

Analizador. Se llama *analizador* al primer nicol o a la lámina polarizante montada en el tubo del microscopio sobre el objetivo. El nicol se coloca sobre una montura deslizante (Figura 2-4), mientras que en algunos modelos la placa (Figura 2-1) tiene un movimiento giratorio en la trayectoria óptica. Ambos pueden insertarse o eliminarse a voluntad en el tren óptico. El plano de vibración es normal al del polarizador y, generalmente, ambos son perpendiculares u horizontales respecto al campo visual. Los microscopios más complicados (Figura 2-6) están provistos de un sistema de rotación del analizador.

Polarizador. Se conoce como *polarizador* (Figura 2-14) al prisma o placa polaroide colocada en el sistema subplatina. Puede estar situado según cualquier ángulo dentro de los 360°, pero, en general, está ajustado en un plano que forma ángulo recto con el del analizador. El retículo del objetivo es paralelo a los dos planos. La Figura 2-5 muestra una placa polarizante montada en el conjunto subplatina.

Lentes Amici-Bertrand. Estas lentes están situadas dentro del tubo del microscopio entre el ocular y el analizador (Figura 2-3). Sirven para llevar la imagen de las figuras de interferencia al plano focal del ocular. El artificio fue utilizado primeramente por Amici (1844) y posteriormente adaptado por Bertrand (1878).

Las figuras de interferencia pueden observarse sin lentes Amici-Bertrand, si se quita el ocular. Para obtener mejores resultados, se emplean unas lentes Amici-Bertrand con diafragma de enfoque y un amplificador auxiliar que se adapta encima del ocular.

Condensador. En un sistema condensador del tipo seleccionado para la figura, hay estos tres componentes: en el examen ordinario, con objeti-

vos de bajo poder, se usa una lente con una apertura iluminante de unos 0,22; trabajando con alto poder, u obteniendo figuras de interferencia, se emplea otro condensador en una montura móvil (Figura 2-15) que gira alrededor del eje; en el caso de mayores aperturas numéricas, se inserta una

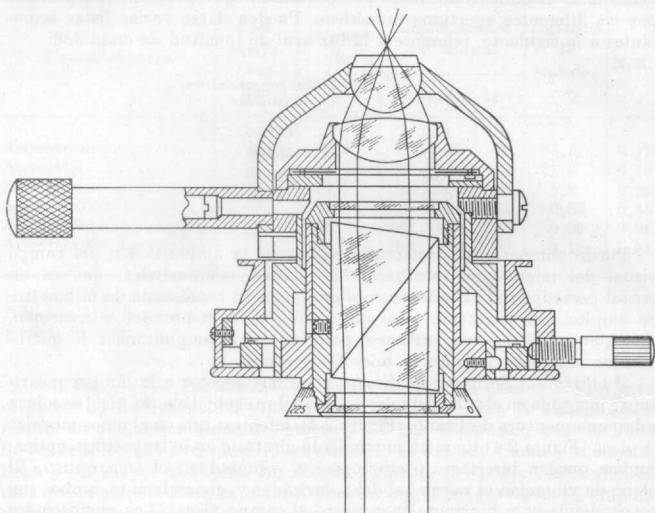


FIG. 2-14. Sección que muestra un prisma situado en el conjunto subplatina. Una sección de un conjunto subplatina que contiene una placa polarizante (filtro) se ve en la Figura 2-4. (*American Optical Co.*)

lente especial en el lugar del condensador móvil. Esta última disposición resulta más eficaz empleándola con inmersión en aceite.

En la Figura 2-14 se ve la disposición del condensador junto con varias regulaciones para el condensador.

Diafragma Iris. El diafragma iris está situado en la parte baja del tubo que contiene al polarizador. Sirve para reducir el cono de luz, disminuyendo la iluminación del campo visual y originando un aumento del relieve de los objetos. El diafragma es útil en la realización de varios ensayos, para determinar con el microscopio ángulos de refracción.

Espejo. En general, el espejo es reversible, con una superficie plana y otra cóncava. La cara plana del espejo es adecuada para los trabajos microscópicos de poca potencia. El espejo cóncavo converge la luz sobre el objeto; es especialmente útil en observaciones de alta potencia. También se usa para baja potencia cuando el iluminador produce un haz de rayos convergentes.

Ajuste fino. Es conveniente que el ajuste fino esté graduado de modo que permita medir desplazamientos de $2,5\mu$ (milésimas de milímetro). Este ajuste se puede utilizar para medir espesores y para enfocar los objetos en caso de grandes aumentos. La relación entre el ajuste fino y el basto y el detalle del primero para un tipo de microscopio se explica en la Figura 2-16.

Accesorios del microscopio. Los accesorios suministrados con el microscopio incluyen, generalmente, la cuña de cuarzo, la lámina de yeso y la de mica. Estas están marcadas con unas flechas que señalan las direcciones de vibración del rayo rápido y del lento, y están montadas en unos bastidores que se adaptan a una ranura del tubo del microscopio, entre el objetivo y el analizador.

La cuña de cuarzo se usa para producir colores de interferencia, desde el comienzo del primer orden hasta el final del tercero o cuarto orden. Está marcada y dispuesta como indica la Figura 2-17.

La lámina de mica y la lámina de yeso (*Glimmer* y *Gips* en alemán), en unión de una aguja centradora, están dibujadas en la Figura 2-18. En ambas láminas está indicada la dirección del rayo lente.

Compensador Berek. El compensador está diseñado para adaptarlo en la ranura del tubo situada sobre el objetivo, en la misma apertura que se utiliza para las láminas de yeso y mica. Se emplea para la determinación del orden de los colores de interferencia entre nicoles cruzados.

Se inserta una lámina de calcita, con el eje c vertical, en la acanaladura accesoria del microscopio. La lámina forma una ventana en el compensador y gira mediante la rotación de un tambor graduado. Se gira el compensador (Figura 2-19) hasta neutralizar el color del mineral (hasta que se convierte en gris). La rotación del condensador necesaria para conseguir esto es una medida de la retardación.

Un compensador para medir pequeñas diferencias en la retardación se ve en la Figura 2-20. Mediante la rotación de un tambor graduado horizontal, se gira una lámina de mica con una retardación de $\frac{1}{30}\lambda$ rojo.

Portaobjetos. Pueden utilizarse portaobjetos de diferentes longitudes y anchuras, pero tiene gran importancia su espesor. Los condensadores de inmersión están fabricados para trabajar más eficazmente con portaobjetos de 0,9 a 1,0 mm de grueso. Por esto, los portaobjetos proyectados para

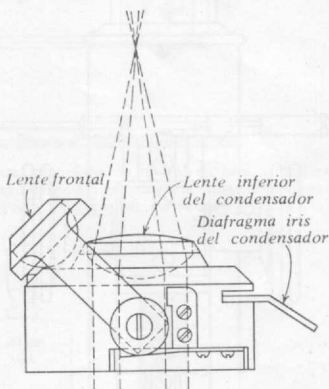


FIG. 2-15. Diagrama que ilustra la construcción del sistema condensador. (American Optical Co.)

estudios con altas ampliaciones, deben adoptar estos espesores, si se quieren asegurar los resultados más satisfactorios.

Los portaobjetos de 26 mm de ancho por 45 mm de longitud son usados

generalmente para el montaje de secciones delgadas de minerales y rocas. Tales portaobjetos se adaptan fácilmente a la platina giratoria del microscopio polarizante, aunque son lo bastante grandes para contener una preparación de buen tamaño y también una etiqueta de dimensiones adecuadas. Los portaobjetos largos, empleados usualmente en las investigaciones biológicas, pueden presentar bastantes inconvenientes en una platina giratoria.

Cristal cubreobjetos. Los objetivos, generalmente empleados para el trabajo con secciones delgadas, están corregidos por los fabricantes para cubreobjetos de espesores entre 0,15 y 0,17 mm. Se supone que la parte superior de la lámina está directamente en contacto con la cara inferior del cristal cubreobjetos. En el caso de que la lámina esté defectuosamente montada y quede un espacio entre el techo de la lámina y el piso del portaobjetos, hay que considerar esta distancia extra como un espesor adicional del cristal portaobjetos. Para obtener los mejores resultados con los objetivos, deben emplearse cristales cubreobjetos de espesor standard.

Precauciones a observar en el uso del microscopio. Aun en las mejores condiciones, el trabajo con el microscopio da lugar a un cierto esfuerzo de la vista. Por esto, es esencial emplear las mejores condiciones de trabajo para reducir esta tensión a un mínimo.

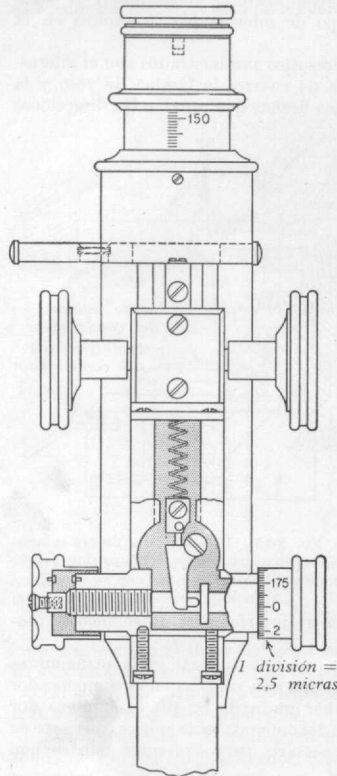


FIG. 2-16. El ajuste fino. (American Optical Co.)

Los estudiantes deben adoptar una posición erecta, pero no rígida. Tal posición, con el tubo del microscopio inclinado, le permite trabajar con el máximo confort.

Mientras se mira a través del instrumento, deben mantenerse abiertos ambos ojos. Esto es difícil de efectuar al principio, por ello debe utilizarse

alguna pantalla sobre el ojo que no se usa. También es una buena costumbre el aprender a observar igualmente con ambos ojos, y no desarrollar lo que se llama un *ojo microscópico*.

Cuidado del instrumento. Un microscopio polarizante es caro; usado correctamente, puede durar mucho tiempo. Por el contrario, puede llegar a inutilizarse con poco servicio efectivo. La mayoría de las precauciones a

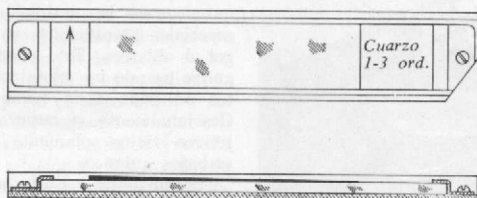


FIG. 2-17. Cuña de cuarzo montada sobre una placa de cristal en una armadura metálica. La flecha marca la dirección del rayo lento. En general, una cuña cubre cuatro órdenes: desde su borde delgado a la porción más gruesa. (*American Optical Co.*)

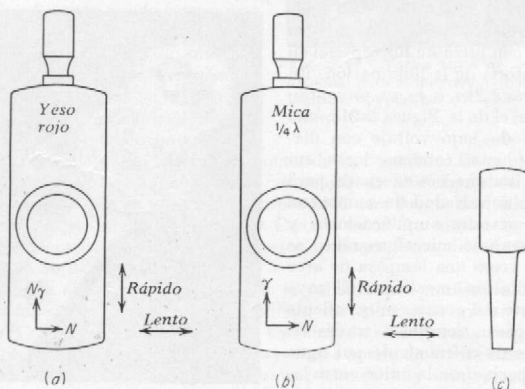


FIG. 2-18. Lámina de yeso (a), lámina de mica (b) y aguja centradora. (*E. Leitz, Inc.*)

observar en el uso del instrumento, son las que se podrían aplicar a cualquier pieza de un instrumento delicado. Sin embargo, unas pocas son de naturaleza especial y deben ser mencionadas.

Para la limpieza de todas las partes ópticas debe usarse un papel de lentes de textura fina o, aún mejor, un cepillo de pelo de camello. Esto se aplica al ocular, a los objetivos, al sistema subplatina, al espejo y a los dos nicols.

Los objetivos deben ser enfocados moviendo el tubo del microscopio hacia arriba mejor que hacia abajo. Así se evita la posibilidad de contacto entre la lente inferior del objetivo y la sección delgada. Los objetivos de alto poder o de inmersión deben limpiarse con papel de lentes y xylol o bencina (no alcohol).

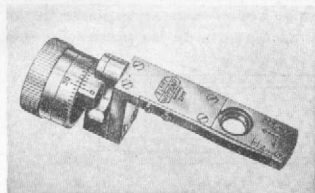


FIG. 2-19. Compensador Berek. (E. Leitz, Inc.)

No deben utilizarse productos químicos en la platina, sin tomar especiales precauciones para proteger el objetivo. Esto puede conseguirse usando un cristal portaobjetos adherido a la lente inferior. Ocasionalmente, se reservan los objetivos viejos solamente para los trabajos químicos.

Iluminadores. En las ampliaciones ordinarias, una buena luz del norte, con un cielo claro y limpio, forma una excelente fuente de iluminación para el microscopio polarizante.

En el caso de que tal iluminación no sea posible, pueden emplearse con éxito focos de luz diurna artificial. Estos consisten en varios tipos de bombillas eléctricas, montados en cajas con filtro de luz especial en la trayectoria de la iluminación. En la Figura 2-21a, b, c, se presentan tres tipos; el de la Figura 2-21c, una bombilla de bajo voltaje con diafragma y lentes condensadoras, suministra iluminación adecuada para una amplia variedad de aumentos.

Para grandes ampliaciones y para el trabajo microfotográfico se utiliza a veces una lámpara de arco con regulación mecánica. El rayo procedente del arco es muy caliente y debe pasar siempre a través de una celda de enfriamiento por agua para no perjudicar la unión entre los prismas del microscopio (a no ser que se utilicen prismas especiales).

Microscopio de fase. La técnica del microscopio de fase ha encontrado una aplicación considerable en las ciencias biológicas, donde pueden iluminarse, sin usar tintes, ejemplares faltos de contraste, de manera que lleguen a ser visibles estas estructuras. Y también, en el examen de minerales, ha merecido cierta atención esta técnica. En el caso de un mineral cuyo espesor sea menor que unas 10μ y cuyo índice de refracción difiera ligera-

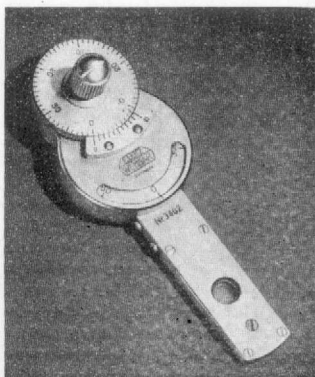


FIG. 2-20. Un compensador para medir pequeñas diferencias en la retardación. La mica forma una ventana en la placa accesoria; esta puede inclinarse girando el tambor. La retardación es de $\frac{1}{30}$ rojo. (E. Leitz, Inc.)

mente del índice del medio de montura, el microscopio de fase puede ofrecer un método eficaz de examen.

La teoría y la aplicación del microscopio de fase ha sido desarrollada con cierta extensión por Bennet (1951). Las diferencias de fase de las ondas luminosas que pasan a través de puntos del mineral y de su contorno, se utilizan para producir un contraste en el ojo. Para producir la diferencia de fase se emplea (Figura 2-22) un anillo anular en el nivel del diafragma del condensador y una lámina de difracción en el plano focal posterior del objetivo. Con esta disposición puede lograrse una mayor distinción en los minerales de relieve extraordinariamente bajo en el bálsamo.

El uso del diafragma anular origina un cambio en la trayectoria óptica, o relación de fases, entre la luz que entra en el objetivo directamente desde un objeto y la luz difractada por el mismo. En el plano focal posterior del objetivo debe montarse un elemento variador de fase. Tal elemento puede conseguirse mediante la deposición de películas de espesor predeterminado, por medio de un proceso de evaporación térmica a alto vacío. Se han encontrado efectivos los modelos de forma anular que introducen una diferencia de un cuarto de longitud de onda de la luz verde. En el plano focal frontal del condensador subplatina se coloca un diafragma de apertura anular; cuando éste es iluminado, proporciona una fuente de luz en el infinito con respecto al plano del objeto. Cuando estos dos anillos son exactamente concéntricos y están superpuestos, producen una diferencia de fase de un cuarto de longitud de onda.

Mediante el control del espesor de la película que produce la diferencia de fase pueden obtenerse conjuntamente los contrastes «oscuro» y «brillante». Cuando la luz directamente transmitida es acelerada respecto a la luz refractada, las zonas de mayor trayectoria óptica de la muestra aparecen más oscuras que el fondo que las rodea; cuando hay una retardación de la luz no-refractada, las regiones de mayor trayectoria óptica aparecen brillantes sobre un fondo oscuro.

Las fotografías de la Figura 2-23, tomadas con ampliaciones de 900 : 1, 1.700 : 1 y 2.000 : 1, muestran pequeñas partículas de minerales arcillosos en contraste de fase. El orden del diámetro de las partículas de caolinita en *a* y *b* es de 2 a $6,3 \mu$. En *c* y *d* el diámetro de las partículas de halloysita es del orden de 2 a $6,3 \mu$; mientras que la longitud de las partículas de halloysita de *e* y *f* es de unas 2μ . Se han indicado a un tiempo los contrastes «claro» y «oscuro».

Microfotografías. Frecuentemente se desean para los informes foto-

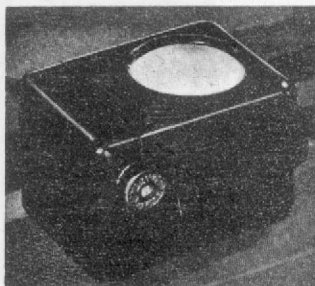


FIG. 2-21. Varios tipos de iluminación artificial para el microscopio: (a) pequeña lámpara subplatina. (Bausch and Lomb Optical Co.)

grafías de secciones delgadas; las cuales pueden obtenerse rápidamente con un equipo simple sin necesidad de película de calidad excepcional. En todo caso, es aconsejable un estudio detallado del material disponible en el mercado.

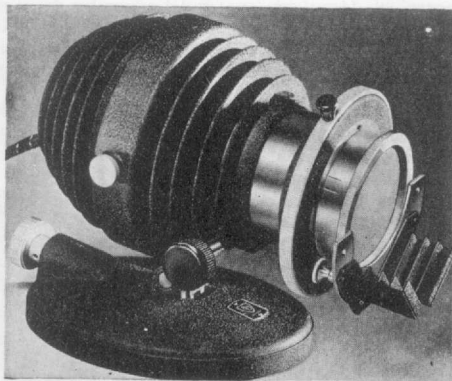


FIG. 2-21b Una lámpara robusta para utilización general. (*American Optical Co*)

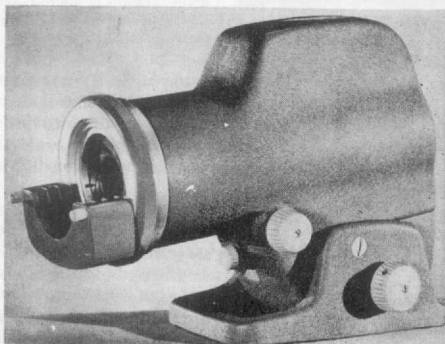


FIG. 2-21c. Lámpara a bajo voltaje con ranuras en V para los filtros. (*Bausch and Lomb Optical Co.*)

Puede colocarse sobre el tubo del microscopio (Figura 2-24) una pequeña cámara proyectada para película de 35 mm. A un lado del tubo se instala una lente visora y un exposímetro entre este visor y la cámara. Todo este conjunto está adaptado para colocarse en el tubo del objetivo sobre el ocular. El asegurar la bondad de la microfotografía depende de la calidad

de la iluminación, el enfoque, la exposición y la zona seleccionada para fotografiarla.

Las lámparas de microscopio de buena calidad dan, con los filtros adecuados, una iluminación satisfactoria. El enfoque debe ajustarse con ayuda de la lente visor. La exposición puede determinarse con el fotómetro. El estudio de microfotografías en los libros de texto y revistas profesionales, sirve como guía para seleccionar las zonas adecuadas para fotografiarlas.

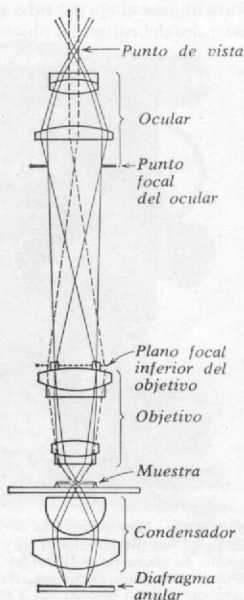
Los exposímetros utilizados con el microscopio son microfotómetros que deben ser graduados para el equipo particular de cada caso. En principio, es necesario un trío de exposiciones; debiéndose recordar en cada una de estas exposiciones el tiempo y la lectura del exposímetro. Cuando se ha asegurado una exposición satisfactoria, debe anotarse el tiempo empleado y la lectura del fotómetro. Si, por ejemplo, con un tiempo de exposición de 10 segundos y una lectura del fotómetro de 5 se ha obtenido una buena fotografía, cuando, para otra exposición, se lea en dicho fotómetro «2,5», se necesitará para esta segunda exposición un tiempo de 5 segundos.

Cuando se desean microfotografías mayores, deben utilizarse, en lugar de la pequeña cámara mencionada más arriba, otras equipadas con película cortada o placas. En general, las microfotografías de las secciones delgadas se toman con objetivos $3,2\times$ ó $10\times$, ya que el espesor de la sección interfiere el enfoque a alta amplificación. Al mismo tiempo, las texturas ordinariamente observadas, aparecen más claras a pocos aumentos.

Ajuste del microscopio polarizante.

Pueden señalarse cuatro etapas separadas en la disposición del microscopio polarizante para el examen de secciones delgadas:

1. Centrado de la platina con el campo
2. Cruzado de los nicoles
3. Ensayo del retículo
4. Determinación del plano de vibración del nicol inferior



Las líneas llenas representan rayos directos

Las líneas de trazos representan rayos difractados

FIG. 2-22. Disposición del contraste de fase con un diafragma anular en el plano focal frontal del condensador subplatina y un elemento anular de cambio de fase en el plano focal inferior del objetivo. (American Optical Co.)

1. *Centrado de la platina con el campo.* Cuando el eje de rotación de la platina coincide con el eje del tubo del microscopio, aquélla está centrada, siempre que el eje del tubo sea perpendicular al centro del campo visual. Para alinear el eje del tubo y la platina se utilizan (Figura 2-25) los tornillos laterales del collar del objetivo o de la platina. Para ello se sigue un proce-

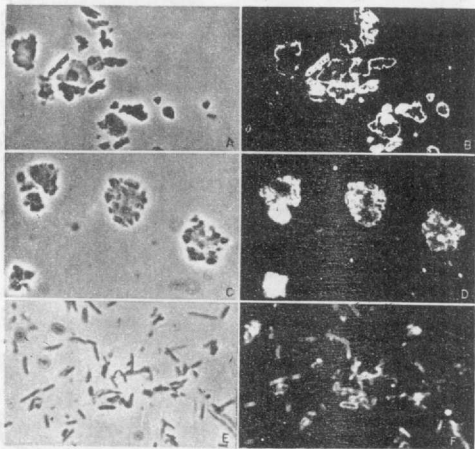


FIG. 2-23. Microfotografía de minerales arcillosos mediante la técnica de contraste de fase. Las preparaciones (c) y (d) están sumergidas en una mezcla de butilcarbinol y aceite de clavo ($n = 1.500$; (e) y (f) en glicerina ($n = 1.463$). (Cortesía del Dr. H. Piller, Carl Zeiss, Gottingen, West Germany.)

(a) Caolinita, Schnaittenbach.—(900 : 1). Contraste de fase, campo claro, luz ordinaria polarizada.

(b) Caolinita, Schnaittenbach.—(900 : 1). Contraste de fase, campo oscuro.

(c) Halloysita, Lawrence Co., Ind.—(1700 : 1). Contraste de fase, campo claro, luz ordinaria polarizada.

(d) Halloysita, Lawrence Co., Ind.—(1700 : 1). Contraste de fase, campo oscuro.

(e) Halloysita, Lawrence Co., Ind.—(2000 : 1). Contraste de fase, campo claro, luz polarizada ordinaria.

(f) Halloysita, Lawrence Co., Ind.—(2000 : 1). Contraste de fase, campo oscuro.

dimiento sencillo: mirando a través del instrumento al campo visual, se escoge un punto fácilmente reconocible y se hace girar entonces la platina; dicho punto debe describir un círculo concéntrico alrededor de la intersección de los hilos del retículo. Si no es así, se gira la platina hasta que el punto esté a la máxima distancia del centro del retículo y se le acerca la mitad de la distancia utilizando los tornillos de centrado, llevándole luego al centro de la platina, moviendo el propio portaobjetos. Se vuelve a girar la platina y a repetir la anterior operación de centrado si ésta no se ha conseguido la primera vez.

2. *Cruzado de los nicoles.* Deben colocarse a ángulo recto los planos de vibración de los dos nicoles. El plano de vibración del analizador está generalmente fijado por el fabricante. Se ajusta el nicol inferior a ángulo recto con el anterior, girando el collar subplatina hasta que el campo llegue a estar oscuro, con ambos nicoles en la trayectoria de la luz. Los nicoles deben dejarse en la posición que den mayor oscuridad. Generalmente, en esta posición se adapta un pequeño prisionero dentro de una muesca.

3. *Ensayo del retículo.* El retículo del ocular puede ser o de tipo de tela de araña o líneas grabadas en una placa de cristal. En todo caso, es importante que sus líneas sean paralelas a los planos de vibración de los dos nicoles. Ordinariamente, así lo coloca la firma que suministra el microscopio y también se dispone el ocular de modo que no ajuste en el tubo del microscopio más que en su posición correcta. Sin embargo, este ajuste debe comprobarse ocasionalmente y, en el caso de que no sea correcto, debe corregir el retículo un técnico experimentado.

Para ensayar la posición del retículo respecto a los planos de los nicoles, se utiliza un portaobjetos que contenga pequeños cristales (Figura 2-26)

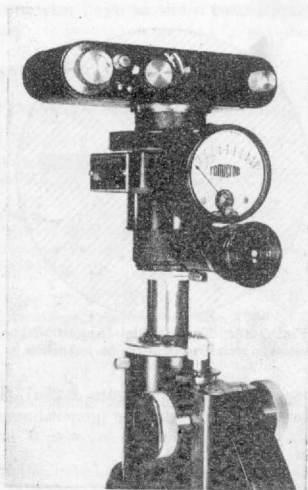


FIG. 2-24. Cámara microfotográfica, exposímetro y lente visora. (Cortesía de Paul Rosenthal, 505 Fifth Ave., New York 17, N. Y.)

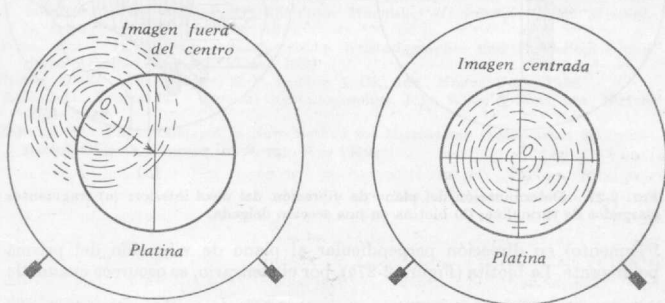


FIG. 2-25. Diagrama que ilustra el centrado del campo visual en el microscopio.

rectangulares alargados de natrolita⁶. La natrolita se hace opaca entre nicoles cruzados cuando los bordes de los cristales son paralelos a las direcciones de vibración. Un portaobjetos, conteniendo un pequeño cristal de

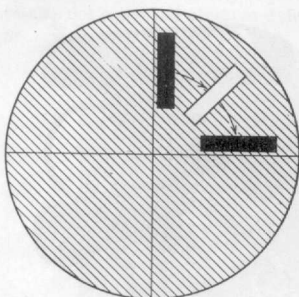


FIG. 2-26. Ensayo del ajuste del retículo con fragmentos de natrolita.

natrolita se coloca sobre la platina entre nicoles cruzados y se la gira hasta que oscurezca. Si el retículo está ajustado, sus líneas deben ser paralelas o perpendiculares a las líneas rectas del cristal. Esto es cierto en cada una de las cuatro posiciones de extinción. En las posiciones intermedias, a 45°, la natrolita debe dar su máxima iluminación.

4. *Determinación del plano de vibración del nicol inferior.* Después de haber efectuado los otros ajustes, puede ser determinada la dirección de vibración del nicol inferior, ya con fragmentos de turmalina fibrosa, ya con una sección rocosa que contenga biotita en la que se observe la exfoliación.

La turmalina (Figura 2-27a) tiene su absorción máxima cuando está orientada con el eje *c* (generalmente la mayor dimensión del cristal o su

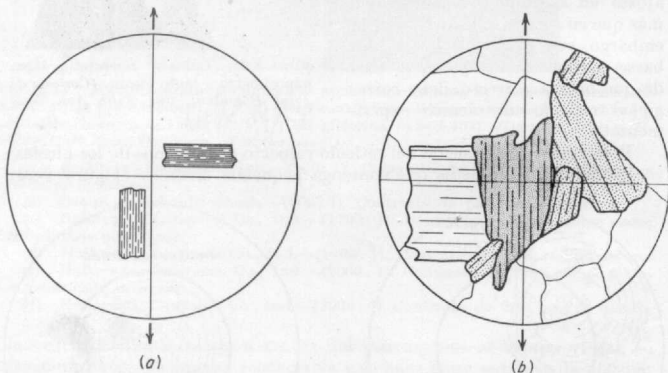


FIG. 2-27. Determinación del plano de vibración del nicol inferior: (a) fragmentos alargados de turmalina; (b) biotita en una sección delgada.

fragmento) en dirección perpendicular al plano de vibración del prisma polarizante. La biotita (Figura 2-27b), por el contrario, se oscurece cuando la

⁶ Si no se dispone de natrolita, puede sustituirla cualquier mineral con los bordes en línea recta y extinción paralela.

exfoliación es paralela a la dirección de vibración. Las posiciones de mayor y menor oscurecimiento, observadas con el nicol superior eliminado del tubo del microscopio, indican la dirección de vibración, o la normal a la misma, dependiendo de que sobre el portaobjetos haya biotita o turmalina.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, R. M.: «The Microscope», D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N. J., 1940.
- Amici, G. B.: *Ann. chim. et phys.* 3.^a ser., vol. 12, p. 114, 1844.
- Beck, Conrad: «The Microscope», R. & J. Beck, Ltd., Londres, 1938.
- Belling, John: «The Use of the Microscope», McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1930.
- Bennett, Alva H., Harold Osterberg, Helen Jupnik y Oscar W. Richards: «Phase Microscopy», John Wiley and Sons, Inc., Nueva York, 1951.
- Berek, Max: «Anleitung zu optischen Untersuchungen mit dem Polarisationsmikroskop», Verlag Schweitzerbart, Stuttgart, 1953.
- Bertrand, E.: *Z. Kryst.*, vol. 1, p. 69, 1877.
- Bertrand, E.: *Bull. soc. franc. minéral.*, vol. 1, pp. 27, 97, 1878.
- Bertrand, L. y M. Roubault: «L'emploi du Microscope Polarisant», París, 1936.
- Burri, C.: «Das Polarisationsmikroskop», Basel, 1950.
- Chamot, E. M. y C. W. Mason: «Handbook of Chemical Microscopy», vol. 1, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1930.
- Ehringhaus, A.: «Das Mikroskop», Leipzig, 1943.
- Gage, S. H.: «The Microscope», Comstock Publishing Associates, Inc., Ithaca, N. Y., 1925.
- Hallimond, A. F.: «Manual of the Polarizing Microscope», Cooke, Troughton & Simms, Ltd., York, Inglaterra, 1953.
- Hartshorne, N. H. y A. Stuart: «Crystals and the Polarizing Microscope», Edward Arnold & Co., Londres, 1950.
- Johannsen, A.: «Petrographic Methods» 2.^a ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1918.
- Marshall, C. R. y H. D. Griffith: «Introduction to the Theory and Use of the Microscope», Routledge and Kegan Paul, Ltd., Londres, 1928.
- Michel, K.: «Die Grundlagen der Theorie des Mikroskops», Stuttgart, 1950.
- Niggli, P.: «Lehrbuch der Mineralogie und Kristallchemie», 3.^a ed., vol. 2, Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1942.
- Piller, H.: Die Phasenkontrastmikroskopie als Hilfsmittel zur Bestimmung feinkörniger, speziell dünner, transparenter Minerale, *Heidelberger Beitr. Mineral. u. Petrog.*, vol 3, pp. 307-334, 1952.
- Raaz, Fr. y H. Tertsch: «Geometrische Kristallographie und Kristalloptik und deren Arbeitsmethoden», Viena, 1939.
- Spitta, E. J.: «Microscopy», E. P. Dutton & Co., Inc., Nueva York, 1920.
- Wahlstrom, Ernest E.: «Optical Crystallography», John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1943.
- Zernike, F.: Phase Contrast, a New Method for Microscopic Observation of Transparent Objects, *Physica*, n° 9, pp. 686, 1949.

Resumen de las propiedades de la luz

Teorías sobre la luz. Dado que la luz cruza el espacio interestelar, penetra a través de los sólidos o líquidos transparentes y viaja también a través del vacío, se ha supuesto comúnmente que existe un medio por el cual pueda transmitirse. Este medio es el éter, que se admite que penetra toda materia y ocupa todo el espacio. Sin embargo, los modernos estudios han demostrado que, para explicar ciertas cosas, el éter debería estar dotado de las propiedades físicas más extraordinarias, lo cual es innecesario para estar de acuerdo con otros conceptos. La fuente de la luz y sus efectos sobre el ojo son patentes, pero conviene dar previamente algunas explicaciones para poder calcular su transmisión.

Se han emitido varias teorías notables. De acuerdo con una de ellas, un rayo de luz consiste en una corriente de diminutas partículas, o «corpúsculos», emitidas a gran velocidad por el sol o cualquier otro cuerpo luminoso. Los corpúsculos viajan a través del espacio en línea recta y, eventualmente, penetran en el ojo. Esto se conoce, en general, como teoría corpuscular; teoría que mereció mucha atención, dado que la desarrolló el famoso físico Sir Isaac Newton.

Otra teoría fue enunciada primeramente por el científico alemán Cristian Huygens a finales del siglo diecisiete. De acuerdo con Huygens, se supone el éter vibratorio y la luz se transmite a través suya, mediante la vibración ondulatoria partícula a partícula. Los fenómenos luminosos tales como la reflexión, la refracción, la difracción y la interferencia pueden ser fácilmente explicados de acuerdo con esta teoría. Sin embargo, la teoría de Huygens omite explicar el movimiento aparentemente rectilíneo de la luz y no fue aceptada por Newton.

Una modificación de la teoría ondulatoria fue propuesta por el físico escocés James Clerk Maxwell (1873), el cual consideraba la luz como formada por ondas, pero decía que las ondas eran electromagnéticas. Según Maxwell, una onda consiste en unos campos eléctricos y electromagnéticos rápidamente alternativos, normales entre sí y normales a la dirección de propagación de la luz. Hertz (1888) logró producir, eléctricamente, ondas que tenían propiedades similares a las de la luz. Como consecuencia de los trabajos de Maxwell, Hertz y otros investigadores, la teoría electromagnética del movimiento ondular fue universalmente aceptada.

A finales del último siglo, empiezan a aparecer hechos evidentes que no estaban de acuerdo con la teoría electromagnética. Se encontró que el espacio

que rodea a ciertos metales podía convertirse en conductor de la electricidad, cuando dichos metales eran expuestos a la luz. Entonces, en 1897, fue descubierto el electrón, y se supuso que el fenómeno fotoeléctrico era debido a la emisión de electrones cuando el metal estaba expuesto a la luz; esto se basaba en el hecho de que aquella expulsión significaba energía y se suponía que esta energía, en el caso del fenómeno fotoeléctrico, podía venir de la luz. Sin embargo, la energía transportada por la luz es tan pequeña que no explicaba la emisión de electrones. Esto llevó a la deducción de que la luz estaba concentrada en puntos y no distribuida uniformemente. Por esta época, Planck llegó a la conclusión de que las radiaciones oscilatorias, al incidir sobre un cuerpo negro, originaban energía discontinuamente en unidades llamadas *cuanta*. Einstein, en 1905, surgió que la absorción de la luz en los fenómenos fotoeléctricos sería también según unidades quanta. Más tarde, los experimentos demostraron que el quanta de Einstein era de la misma naturaleza que los bautizados así por Planck.

Como resultado de estas investigaciones, la explicación de la luz parece basarse en dos teorías aparentemente contradictorias: la teoría ondulatoria resulta más apropiada para la explicación de fenómenos tales como la reflexión, la refracción, la interferencia, la difracción y la polarización; mientras que la teoría cuántica encuentra mayor aplicación en los recientes descubrimientos en el campo de los rayos X, radiaciones y fotoelectricidad. Hablando de las dos teorías, Einstein ha propuesto lo siguiente:

Tenemos buenas pruebas de que existen conjuntamente las ondas y las partículas. Nuestro esfuerzo actual reside en entender cómo es esto, en encontrar una teoría que unifique la naturaleza de la luz. Todavía no se ha encontrado la fusión de ambos puntos de vista. Esto es una cuestión científica para cuya resolución son imperfectos nuestros métodos actuales.

Nomenclatura en la teoría ondulatoria. La nomenclatura usada en este texto para la teoría ondulatoria se compendia en los párrafos siguientes:

Desplazamiento. En el movimiento ondulatorio puede explicarse la forma de la onda si se supone que las partículas del medio se desplazan continuamente. La forma del desplazamiento representa una curva que combina el movimiento circular con el movimiento rectilíneo.

Dirección de la vibración = vector eléctrico = desplazamiento eléctrico. La dirección de la vibración parte del frente de onda y es perpendicular al rayo en un medio isotrópico. En un cristal anisótropo no es perpendicular sino en direcciones limitadas.

Longitud de onda. Distancia entre dos crestas o senos sucesivos, o cualquier otra distancia correspondiente a lo largo de la onda (representada por la letra griega lambda, λ). Generalmente se mide en millonésimas de milímetro o milimicras ($m\mu$).

Frente de onda. Superficie determinada, en un instante dado, por todas las partes de un sistema de ondas que se mueven en una misma dirección y están en idéntica fase. En el espacio, en el aire o en cualquier otro medio óptico isotrópico, en los que la luz se mueve a lo largo de líneas paralelas, el frente de onda es perpendicular a la dirección de transmisión. En un medio

anisótropo, el frente de onda solamente es perpendicular en ciertas direcciones.

Onda normal. Perpendicular al frente de onda. En las sustancias isotrópicas la onda normal y la dirección del rayo son idénticas.

Frecuencia. Número de vibraciones en una unidad dada de tiempo. En el caso de las ondas luminosas, varios trillones por segundo, en general.

Fase. Posición relativa de los puntos correspondientes en ondas diferentes que se mueven a lo largo de la misma línea. Dos puntos ondulares están en la misma fase cuando están en la misma posición con respecto a la cresta o seno de la onda correspondiente y ambos se mueven, ya hacia dentro, ya hacia fuera de la línea de transmisión. Dos puntos están en oposición de fase cuando ocupan una misma posición relativa, pero se mueven en direcciones opuestas con respecto a la línea de transmisión. Pueden considerarse otras diferencias de fase.

La diferencia de fase representa la porción de longitud de onda que le falta a un tren de ondas para unirse a otro.

Amplitud. Desplazamiento máximo de la onda sobre la línea de transmisión.

Periodo. Intervalo de tiempo que necesita una onda para desarrollar una oscilación completa.

Cresta. Punto de la onda con el máximo desplazamiento hacia arriba.

Seno. Punto de la onda de mayor desplazamiento hacia abajo.

Haz. Grupo de ondas luminosas que siguen un mismo camino. Un ejemplo familiar es el haz blanco de un proyector de cine, visible claramente en la atmósfera espesa de un ^{cine}teatro. Los haces pueden hacerse más y más estrechos.

Rayo. Trayectoria lineal seguida por la luz cuando se mueve desde un punto a otro en un medio dado. El rayo es perpendicular al campo eléctrico y es la dirección de propagación de la energía.

Índice de refracción. El índice de refracción es igual a la relación entre la velocidad de la onda normal en el vacío y la velocidad de la onda normal (no la velocidad del rayo) en el medio, ya sea isótropo o anisótropo.

Luz monocromática. Luz de una sola longitud de onda. En los ensayos luminosos prácticos, se usa esta palabra para cubrir un pequeño espacio de longitudes de onda que aparecen como un solo color para el ojo.

Vector luminoso. La acción de la luz puede describirse como dependiente de la alternación periódica de un vector luminoso que permanece paralelo al plano del frente de onda y que, en un medio isótropo, es perpendicular a la dirección de propagación. En un medio anisótropo, el vector es también paralelo al frente de onda, pero excepto en ciertas posiciones limitadas, no es paralelo a la dirección de propagación.

En el caso de luz monocromática, el vector luminoso sigue las leyes del movimiento armónico simple, dependiendo el período T de vibración del color de la luz monocromática. La longitud —de onda λ — distancia entre dos puntos semejantes sucesivos de un tren de ondas— es igual a la velocidad de propagación v multiplicada por el período de vibración:

$$\lambda = vT$$

En cualquier masa transparente λ es fija y v varía con T . La intensidad luminosa es el promedio de varios vectores luminosos y cambia con la amplitud.

La onda luminosa es electromagnética, con dos vectores de movimiento en su sistema. En un medio isótropo ambos son transversales y recíprocamente perpendiculares; uno, limitado por el campo magnético de fuerzas, el otro, por el campo eléctrico de fuerzas. Estos dos campos están relacionados con otros dos vectores que, en un medio isótropo, tienen diferente magnitud y en un medio anisótropo, además, distinta dirección. Estos dos últimos vectores se llaman *vector eléctrico* y *vector magnético*. El primero de ellos mide el desplazamiento eléctrico; el segundo, el desplazamiento magnético o inducción. Maxwell desarrolló las ecuaciones aplicables al movimiento de estos vectores (aunque anteriormente había sido explicado el movimiento, antes del desarrollo del análisis vectorial). Las pruebas experimentales han demostrado que la dirección de la vibración de la luz corresponde al desplazamiento eléctrico (Vector eléctrico) en los cuerpos isótropos. En los cuerpos anisótropos se ha comprobado que corresponde o al desplazamiento eléctrico (vector eléctrico) o al campo eléctrico. En la teoría electromagnética de la luz se supone que corresponde al desplazamiento eléctrico (vector eléctrico), suposición que es posible mediante la concepción de la luz como una electrolisis.

Velocidad de la luz. Las ondas luminosas se mueven en su dirección de propagación a una velocidad aproximada de 300.000 kilómetros por segundo. La misma ley de la frecuencia utilizada en el caso del sonido, es aplicable a la luz y viene expresada por la fórmula:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad \text{o} \quad v = f\lambda$$

En esta ecuación, se obtiene la frecuencia dividiendo la velocidad de la luz por la longitud de onda. En el caso de la luz violeta ($\lambda = 0,000037$ cm), la velocidad ($v = 300.000$ km/seg) dividida por la longitud de onda, da una frecuencia de 800.000.000.000.000 (ochocientos billones) vibraciones por segundo.

Movimiento ondulatorio. Puede obtenerse una idea del comportamiento de las ondas luminosas mediante el estudio de la ondulación generada por el movimiento armónico simple y el movimiento rectilíneo uniforme.

El movimiento armónico simple es un movimiento uniforme sobre una trayectoria circular sobre un diámetro del círculo. Si se supone, como se ve en la Figura 3-1, que una partícula se mueve en el sentido de las agujas del reloj a lo largo de una circunferencia de círculo, ocupando varias posiciones en su alrededor, las proyecciones de estas posiciones sobre el diámetro vertical AB serán las intersecciones de dicho diámetro con las líneas de puntos que aparecen en la figura. Observada desde un lado del plano del círculo, la partícula parece oscilar hacia adelante y hacia atrás con velocidad variable. Si, como adición al movimiento armónico, la partícula se mueve a lo largo de la línea MN a un ritmo uniforme

(movimiento rectilíneo), no se desplazará según una trayectoria circular, sino que describirá una curva del tipo indicado. Sin embargo, la proyección sobre el diámetro vertical seguirá siendo la misma. La curva es una curva armónica que tiene la forma de una senoide.

Cuando dos o más ondas siguen una misma trayectoria, las diferencias de fase producen varias formas de curvas (Figura 3-2). Dos series de ondas pueden ser iguales y opuestas, anulándose una a otra (Figura 3-2a). Otras series pueden ser de amplitud y longitud de onda iguales, pero diferentes en fase. Esta última disposición producirá una resultante R de cresta intermedia y amplitud incrementada (Figura 3-2b).

Cuando dos ondas son de igual fase, longitud de onda y periodo, pero

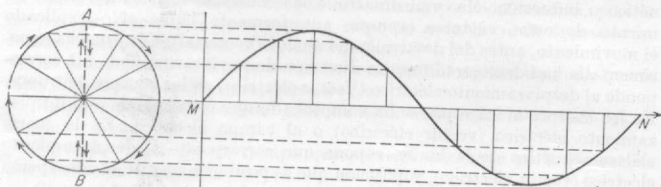


FIG. 3-1. Curva armónica originada por la combinación del movimiento alrededor de un círculo con la translación a lo largo de una línea recta.

difieren en la amplitud, producen una resultante R de la misma fase y longitud de onda con amplitud aumentada (Figura 3-2c).

Color de la luz. La intensidad luminosa de un rayo viene determinada por la amplitud de la vibración de su onda. La luz, cuando atraviesa los cuerpos, experimenta un cambio en su velocidad; por tanto, debe ocurrir el correspondiente cambio o en la frecuencia o en la longitud de onda. Y dado que el periodo de vibración es siempre el mismo para un color dado, la mutación debe tener lugar en la longitud de onda. Esta diferirá para un mismo color en los diferentes cuerpos; así, el número de vibraciones por segundo, o la frecuencia de las ondas que alcanzan el ojo, determina el color.

Las ondas luminosas visibles varían en longitud: las más largas corresponden al rojo y las más cortas, al violeta. La porción del espectro directamente visible para el ojo varía entre límites muy estrechos. La longitud de onda límite de la raya roja es de 0,0000759 cm y la relativa al extremo visible violeta de 0,0000393 cm. En milésimas de micra (unidad generalmente utilizada para trabajar con la luz) las cifras serían:

$$\text{Luz roja} = 759 \text{ m}\mu$$

$$\text{Luz violeta} = 393 \text{ m}\mu$$

La luz blanca, o luz ordinaria, es una combinación de todas las diferentes longitudes de ondas, visibles para el ojo, en un efecto simultáneo. Cuando solamente se observa una longitud de onda, la luz es monocro-

mática o coloreada individualmente. La luz blanca puede considerarse como compuesta por siete colores, que se gradúan de unos a otros formando un espectro continuo. Los colores del espectro se representan fre-

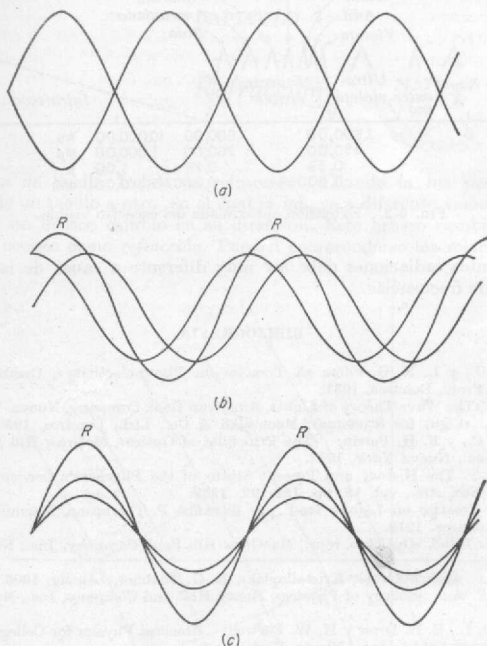


FIG. 3-2. Combinaciones de ondas debidas a varias diferencias de fase. (a) La diferencia de fase es $\frac{1}{2} \lambda$, y las dos ondas son iguales y de fase opuesta. (b) Onda resultante (R) producida por dos ondas iguales con trayectorias de poca diferencia. (c) Onda resultante (R) debida a dos ondas de igual longitud y fase idéntica, pero de diferente amplitud.

cuentemente por longitudes de onda, escogidas arbitrariamente, que corresponden a valores medios, como sigue:

Rojo	= 700 $m\mu$
Anaranjado	= 620 $m\mu$
Amarillo	= 560 $m\mu$
Verde	= 515 $m\mu$
Azul	= 470 $m\mu$
Añil	= 440 $m\mu$
Violeta	= 410 $m\mu$

El espectro electromagnético (Figura 3-3) se extiende más allá del marco del espectro visible. El mecanismo mediante el cual se producen

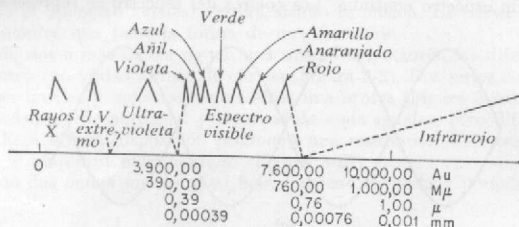


FIG. 3-3. Extensión aproximada del espectro visible.

las diferentes radiaciones debe ser muy diferente a causa de la gran diversidad de frecuencias.

BIBLIOGRAFIA

- Coker, E. G., y L. N. G. Filon: «A Treatise on Photo-elasticity», Cambridge University Press, Londres, 1931.
- Crew, H.: «The Wave Theory of Light», American Book Company, Nueva York, 1900.
- Edser, E.: «Light for Students», Macmillan & Co., Ltd., Londres, 1930.
- Hardy, A. C., y F. H. Perrin: «The Principles of Optics», McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1932.
- Heyl, P. R.: The History and Present Status of the Physicist's Concept of Light, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 18, pp. 183-192, 1929.
- «Huygens' Treatise on Light», trad. por Sylvanus P. Thompson, Macmillan & Co., Ltd., Londres, 1912.
- Newton, Sir Isaac, «Opticks», repr., MacGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1931.
- Pockels, F.: «Lehrbuch der Kristalloptik», B. G. Teubner, Leipzig, 1906.
- Saunders, F. A.: «Survey of Physics», Henry Holt and Company, Inc., Nueva York, 1930.
- Webster, D. L., E. R. Drew y H. W. Farwell: «General Physics for Colleges», Appleton-Century-Crofts, Inc., Nueva York, 1926.
- Whittaker, E. T.: «History of the Theories of Aether and Electricity», Longmans, Green & Co., Ltd., Londres, 1910.

CAPITULO 4

Refracción

Leyes de Snell. Índice de refracción. Cuando la luz pasa oblicuamente de un medio a otro, en el cual se mueve a diferente velocidad, experimenta un brusco cambio en su dirección. Este brusco cambio de dirección se conoce como *refracción*. Pueden comprenderse las relaciones entre

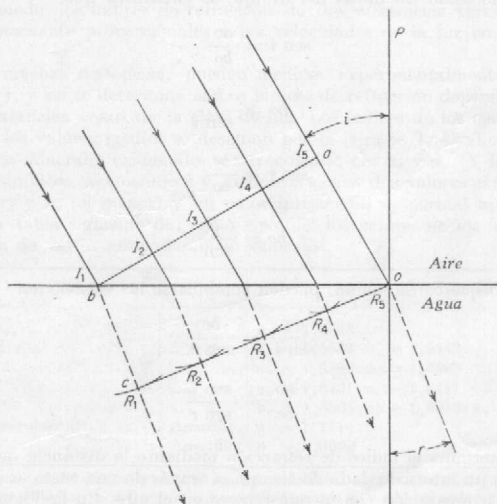


FIG. 4-1. Luz refractada cuando pasa desde un medio a otro más denso.

la luz incidente y la reflejada adoptando la interpretación de Huygens, tal como se ve en la Figura 4-1.

Supongamos, por ejemplo, que un medio —aire— está en contacto con otro medio más denso —agua—. Un haz luminoso incidente I choca oblicuamente, formando un ángulo i con la perpendicular P , contra la

superficie del agua. Cuando la traza del plano normal al haz incidente I , choca contra la superficie en I_1 , el punto I_5 está aun a cierta distancia del plano de separación. Las posiciones I_2 , I_3 e I_4 , junto con los correspondientes puntos intermedios, están también por encima de la superficie.

Dejemos avanzar el haz hasta que el rayo I_5 toque al punto R_5 . Durante este avance, el rayo I_1 habrá penetrado en el medio denso con velocidad disminuida, llegando a la circunferencia de círculo I_1R_1 , que representa la distancia recorrida en el medio denso. Del mismo modo, I_2 habrá llegado a la circunferencia R_2 , I_3 a R_3 e I_4 a R_4 . Una tangente común a estos círculos representará el nuevo frente de onda y el nuevo rayo será perpendicular a este frente de onda. Las ondas esféricas emitidas desde b , y desde los demás puntos del plano de separación, se destruirán mutuamente, excepto a lo largo de la línea bc y demás direcciones correspondientes.

En la construcción anterior, puede considerarse que las distancias I_5R_5 e I_1R_1 son proporcionales a las velocidades relativas de la luz en los dos campos.

Relacionando las líneas del dibujo, se encuentra que:

$$\text{sen } i = \frac{ao}{bo}$$

$$\text{o} \quad bo = \frac{ao}{\text{sen } i}$$

$$\text{también} \quad \text{sen } r = \frac{bc}{bo}$$

$$\text{o} \quad bo = \frac{bc}{\text{sen } r}$$

Y, puesto que bo es común, pueden combinarse las ecuaciones:

$$\frac{ao}{\text{sen } i} = \frac{bc}{\text{sen } r}$$

$$\text{o} \quad \frac{ao}{bc} = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r}$$

Se determina el índice de refracción mediante la distancia que recorre la luz, en un intervalo dado de tiempo, a través de una sustancia transparente en comparación con la que recorre en el aire. En la Figura 4-1, la luz recorre en el aire la distancia ao , mientras que el agua recorre la distancia bc . De esto se deduce, por tanto, que el índice de refracción es:

$$n = \frac{ao}{bc}$$

$$\text{o} \quad n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r}$$

En la ecuación precedente se encuentra que, para cualquier ángulo de incidencia, *la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es una constante*. Es también cierto que las respectivas velocidades de la luz en los dos medios están en la misma relación. La relación que existe entre los senos de los ángulos y las velocidades se conoce como *Ley de Snell*. Fue descubierta por Snell en 1621, pero no se dio a conocer hasta después de su muerte.

Sea n el índice de refracción respecto al aire de un material transparente¹. Cuando V es la velocidad en el aire y v la velocidad en el material transparente, se tiene:

$$n = \frac{V}{v}$$

Y si n_1 y n_2 son los índices de refracción de dos materiales diferentes:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

De este modo, los índices de refracción de dos sustancias transparentes son inversamente proporcionales a las velocidades de la luz en esos dos medios.

Para muchas sustancias, pueden medirse experimentalmente los ángulos i y r , y así se determina n . Los índices de refracción dependen tanto de las sustancias como de la clase de luz. Los índices de los cuerpos isotropos y los valores medios se designan por la letra n . Los valores extremos de los minerales exagonales o tetragonales, por n_e y n_w . Y los cristales ortorrómbicos, monoclinicos y triclinicos tienen dos valores extremos n_γ (el mayor) y n_α (el menor) y un valor intermedio n_β normal a los otros dos². La tabla siguiente da, como ejemplo, los valores de los índices de refracción de varios minerales bien conocidos.

Minerales	(N_{D})	Indices de refracción
Fluorita.....		$n = 1,4338$
Cuarzo*.....		$n_e = 1,5533; n_w = 1,5442$
Calcita*.....		$n_w = 1,6585; n_e = 1,4863$
Apatito*.....		$n_w = 1,6461; n_e = 1,6417$
Aragonito*.....		$n_\alpha = 1,5301; n_\beta = 1,6816; n_\gamma = 1,6859$
Granate (grosularita).....	Amarillo	$n = 1,7714$
Esfalerita.....	Amarillo	$n = 2,3692$

* El cuarzo, la calcita y el apatito son minerales anisotropos con una serie de valores para el índice de refracción comprendidos entre n_e y n_w , los valores extremos. Los índices de refracción del aragonito varían entre n_γ y n_α .

¹ El índice de refracción del aire seco a 760 mm de presión con respecto al vacío solo difiere ligeramente de la unidad (1,000274 a 15°C); por esto, los índices de refracción de las sustancias materiales respecto al aire son aproximadamente iguales a sus índices referentes al vacío. (Estos últimos se llaman *índices absolutos de refracción*.)

² En las revistas técnicas norteamericanas que traen descripciones ópticas de los minerales, muchos autores omiten la letra n y utilizan, para registrar los índices de refracción no pertenecientes al sistema isométrico, únicamente las letras griegas

$\alpha, \beta, \gamma, \epsilon \text{ y } w$.

Ordinariamente, los minerales transparentes con un alto índice de refracción (1,9 ó más) tienen un aspecto brillante conocido como *brillo diamantino*, mientras que los minerales con bajo índice de refracción tienen *brillo vítreo*.

Dispersión. El índice de refracción del extremo violeta del espectro es mucho mayor que el correspondiente al extremo rojo del mismo; y en la refracción el rojo es desviado menos que el violeta. La refracción ordinaria de ambos está indicada en la Figura 4-2.

La diferencia entre el índice de refracción del rojo y el índice del violeta a menudo se conoce abreviadamente como dispersión. Un prisma

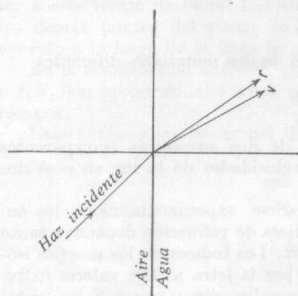


FIG. 4-2. Variación de los ángulos de refracción para luces de diferentes colores.

colocado en la trayectoria de un haz de luz blanca produce un hermoso desplazamiento de los colores del espectro. La diferencia entre el ángulo d_r y el ángulo d_v mide el poder de dispersión del prisma (ver Figura 4-10).

Los minerales divergen mucho con respecto al poder dispersivo. Uno de los que tienen menor dispersión es la fluorita; y uno de los minerales con valores más altos es el diamante. El «fuego» o brillante juego de colores de este último es debido a la alta dispersión de la gema tallada en prismas. Por el contrario, en comparación, la fluorita cuando es cortada y tallada, aparece como deslustrada; por su baja dispersión, la fluorita es solicitada en óptica

para lentes microscópicas de alta amplificación corregidas para la variación cromática. A continuación se indican comparativamente las dispersiones de la fluorita y el diamante.

Flurita		Diamante	
Iluminación	Índice de refracción n	Iluminación	Índice de refracción n
Rojo $K(A')$, $\lambda = 768,2$	1,43095	Rojo (línea B)	2,40735
Violeta $H(G')$, $\lambda = 434,1$	1,43963	Violeta (línea H)	2,46476
Dispersión	0,00868	Dispersión	0,05741

Todos los minerales tienen un valor dispersivo, pero la fluorita y el diamante representan, aproximadamente, los valores extremos.

Para el cálculo de la dispersión son precisas determinaciones exactas de los índices de refracción con luz monocromática. Sin embargo, en el

estudio corriente, raramente se precisa tanta exactitud y, por ello, se utiliza en general luz blanca. Como dato, indicaremos que la luz blanca, generalmente empleada para la determinación de los índices de los minerales da un valor medio que, para las cuestiones prácticas, es comparable al del amarillo. El poder dispersivo para la luz blanca es muy utilizado en varios ensayos habituales.

Angulo crítico. En la fórmula $n = \text{sen } i / \text{sen } r$, el ángulo de incidencia puede variar entre 0° y 90° . Cuando $i = 0^\circ$, el haz incidente choca normalmente contra la superficie de separación. En este caso, $\text{sen } i = 0$ y r es también igual a cero. Un haz incidente que va de esta manera desde un medio a otro más denso no es refractado hacia uno u otro lado, sino que sufre solamente una pérdida de velocidad.

Si $i = 90^\circ$, $\text{sen } i = 1$ y la ecuación se transforma en $n = 1 / \text{sen } r$. En este caso, puesto que n es una constante para cada sustancia determinada, el ángulo de refracción también resulta fijo. Cuando $i = 90^\circ$, el ángulo de refracción es conocido como *ángulo crítico*. Este ángulo crítico es importante en la determinación práctica de los índices de refracción.

Reflexión total. En la Figura 4-3 se ve a la luz pasando del agua al aire (o de un medio denso a otro menos denso). Un rayo que toque verticalmente la superficie del agua, continúa hacia fuera en el aire siguiendo el mismo camino. Si la trayectoria se desvía de la vertical, el rayo es refractado —p. e., torcido hacia fuera— de la normal a la superficie. Cuando se llega a un ángulo de $48^\circ 31'$ con la vertical (el ángulo crítico) el haz tangente a la superficie. Sin embargo, para cualquier otro ángulo mayor que el crítico la luz es reflejada hacia abajo. Este fenómeno se conoce por *reflexión total*.

Si se aumenta el ángulo con la perpendicular hasta que la luz se mueva a lo largo de la superficie de separación entre el agua y el aire, o toque la superficie en una incidencia tangencial, el haz gira hacia abajo, del lado opuesto de la perpendicular a la superficie límite, el ángulo crítico.

Este mismo principio es aplicable a todas las sustancias densas en contacto con el aire. En las determinaciones prácticas con el refractómetro, sirve como medio denso un cristal hemisférico de alto índice de refracción; por medio de un espejo se dirige la luz contra el hemisferio y se determina el ángulo crítico utilizando un medidor telescópico.

Índice de refracción de los minerales anisótropos. Los minerales pertenecen a dos clases ópticas: (1) isotrópica y (2) anisotrópica.

Los mineraloides tales como el ópalo y el vidrio, que carecen de estruc-

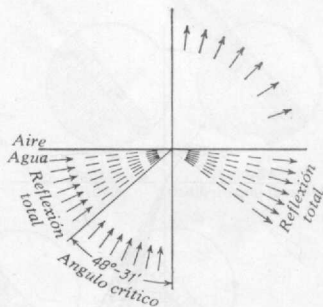


FIG. 4-3. Relación entre la refracción de la luz que pasa desde un medio denso a otro más ligero y la reflexión por encima del ángulo crítico.

tura interna regular, y otros minerales tales como el diamante, el granate, la espinela, la fluorita, etc., que cristalizan en el sistema isométrico, son isótropos. Los minerales que cristalizan en los restantes sistemas cristalinos son anisótropos.

La luz que atraviesa los minerales anisótropos es doblemente refractada. Así, un haz de luz monocromática que pase oblicuamente desde el aire a un medio anisótropo, no solamente se inclina hacia un lado, sino que también se divide en dos rayos. Al mismo tiempo, cada uno de estos dos rayos se polariza —p. e., limitándose a un único plano de vibración, tal como se explicara en el capítulo dedicado a la luz polarizada. Además, cada rayo es refractado de distinta manera según los diferentes colores de la luz.

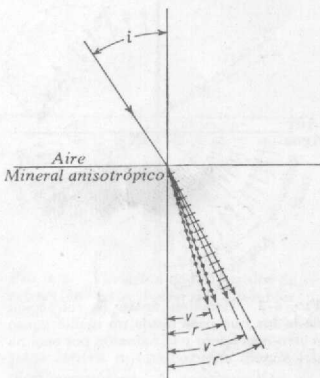


Fig. 4-4. Diagrama que muestra las variaciones del ángulo de refracción para el rojo y para el violeta en un mineral anisótropo.

La doble refracción en dos rayos que se efectúa en los minerales anisótropos está explicada en la Figura 4-4. El haz incidente se rompe en dos series de rayos; la luz blanca origina dos espectros dispersados con opuesta dirección de vibración. La luz roja monocromática producirá dos ángulos de refracción y la luz monocromática violeta también dará lugar a dos ángulos diferentes. En cada caso de luz monocromática, y también en el de la luz blanca, las direcciones de vibración son opuestas, pero pueden no ser exactamente perpendiculares en el interior del mineral; sin embargo, al salir al aire por el lado opuesto de una lámina de mineral, las vibraciones forman ángulo recto.

Determinación de los ángulos de refracción con refractómetro.

Se han ideado varios tipos de refractómetros para la determinación de los índices de refracción de los líquidos o los sólidos. Siempre se utiliza, de diferentes maneras, un cristal hemisférico.

La Figura 4-5 ilustra la determinación del índice de refracción por el método de la reflexión total. La luz es dirigida inferiormente contra la superficie de un cristal hemisférico según un ángulo de refracción mayor que el crítico. Los rayos luminosos son reflejados en la cara interior de la superficie superior del hemisférico y salen por el lado opuesto. El material a determinar, un líquido o cualquier lámina mineral con la cara inferior pulimentada, se coloca sobre el hemisferio. Si el material es una lámina mineral, se coloca entre ella y el hemisferio una película delgada de aceite de alto índice de refracción. La luz es reflejada parcialmente por la lámina de mineral a través del hemisferio y origina en el telescopio de observación enfocado a ∞ , una imagen como las que se ven en la figura. La mitad superior

del campo estará oscura, mientras que la inferior estará iluminada (o viceversa si la imagen es invertida). Si se emplea luz monocromática y el mineral es isotrópico, el límite entre el área luminosa y la oscura marcará exactamente el ángulo crítico (Figura 4-5a). Por otra parte, en el caso de luz blanca los colores de espectro quedan «entre» las zonas clara y oscura (Figura 4-5b). Si el mineral es anisótropo y la observación se realiza con luz monocromática, las dos líneas limitrofes están separadas una corta distancia (Figura 4-5c). Si se observa un mineral anisótropo con luz blanca, estos dos lími-

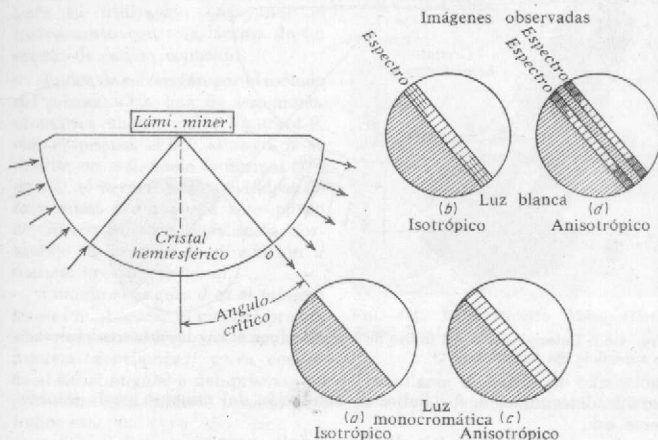


FIG. 4-5. Iluminación inferior para determinar el ángulo crítico por reflexión total.

tes estarán marcados por un espectro (Figura 4-5d). Cuando el anisotropismo no es fuerte, estos dos espectros se superponen. Las ondas luminosas que provienen del mineral anisótropo están polarizadas.

Los instrumentos que funcionan con este principio, se completan con escalas graduadas y nonios para la medición del ángulo crítico. Cuando éste es conocido, se calcula el índice de refracción por la ley de Snell, siendo $\sin i$ igual a 1. Se controla la longitud de onda en la fuente luminosa usando luz monocromática.

El método de la incidencia tangente puede aplicarse con el mismo cristal hemisférico utilizado para el método de la reflexión total. La luz penetra lateralmente en el mineral y es reflejada a través del hemisferio tal como se ve en la Figura 4-6. En este caso, la mitad superior del plano visual está oscura y la mitad inferior, iluminada. Por lo demás, se continúan aplicando los mismos principios del método anterior. El contraste entre los dos campos está más acentuado cuando el mineral se ilumina con luz tangencial.

Tanto si se emplea reflexión total como si se trabaja con incidencia tangencial, debe conocerse exactamente el índice de refracción del cristal hemisférico. Este se establece generalmente mediante su determinación por reflexión total en relación con el aire, habiendo separado la lámina mineral antes de ensayar su índice de refracción. También puede determinarse el índice del líquido utilizado para el montaje de la lámina mineral, esparciendo unas pocas gotas sobre la superficie superior del hemisferio. La ecuación

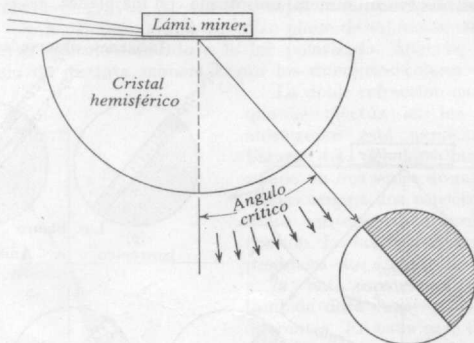


FIG. 4-6. Determinación del índice de refracción con el haz incidente tangenteando la superficie del hemisferio.

para la determinación del índice de refracción del mineral puede establecerse así:

$$n(\text{mineral}) = n(\text{cristal}) \times \text{sen } r$$

donde $n(\text{mineral})$ = índice de refracción del mineral

$n(\text{cristal})$ = índice de refracción del hemisferio

r = ángulo crítico para el mineral, leído en el refractómetro

El cristal empleado en la fabricación de los hemisferios tiene un alto índice de refracción, generalmente alrededor de 1,80. El mineral debe tener una superficie pulimentada que se coloca sobre el hemisferio. Y un líquido, con alto índice, se intercala, por atracción capilar, entre ambos; por lo general, para este fin se prefiere el yoduro de metileno ($n = 1,74$).

La Figura 4-7 muestra uno de los refractómetros Abbe (Zeiss), utilizados comúnmente para la determinación de los índices de refracción de líquidos (también para cristales y minerales). El índice de refracción se lee en un sector graduado exterior y este instrumento puede ser preparado rápidamente para la lectura directa. En la imagen del ocular se dispone una escala que da los valores de los índices de refracción que caen dentro del alcance del instrumento, el cual abarca desde $n_D = 1,3$ a $n_D = 1,7$.

Un refractómetro de este tipo consiste esencialmente en un doble prisma que recibe el líquido que ha de ser examinado, un telescopio para

observar la línea del ángulo crítico y un sector graduado para la lectura de su valor. El doble prisma se completa con otro iluminador F (Figura 4-8), con una superficie esmerilada, y un prisma refractante que opera según el principio de la incidencia tangencial. El prisma de refracción ocupa el lugar del cristal hemisférico de los otros refractómetros. En el telescopio se inserta un artificio compensador para luz aproximadamente monocromática (Línea D del sodio). Por lo general, se ajusta el refractómetro para su utilización ensayando el instrumento con una lámina de un cristal de índice conocido.

Índice de refracción por el método del prisma. Un haz de luz monocromática choca, en la Figura 4-9, con el prisma ABC : el rayo R se desvía, en AB , hacia la normal OP ; en BC , el rayo R' sale alejándose de la normal $O'P'$; desde este punto O' , R' continúa en línea recta, formando un ángulo de desviación d con su dirección original.

Cuando el ángulo d es el mínimo que cabe observar al girar el prisma con respecto al rayo (el ángulo de mínima desviación) y se conoce también el ángulo p del prisma, puede calcularse el índice de refracción del cristal que forma el prisma. La fórmula por la que se determina dicho índice es:

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(d + p)}{\sin \frac{1}{2}p}$$

p = ángulo del prisma

d = ángulo de mínima desviación del rayo

n = índice de refracción del prisma

Cuando el haz luminoso que choca con el prisma no es monocromático, sino que está formado por diferentes longitudes de ondas, que se combinan para producir la luz ordinaria, se produce un espectro, tal como se ve en la Figura 4-10.

La fórmula del prisma es particularmente útil para determinar los índices de refracción de prismas de vidrio, cristales transparentes y prismas huecos rellenos de aceite. Se coloca verticalmente el prisma sobre un goniómetro y se mide su ángulo obteniendo reflexiones primero sobre una cara y después sobre la otra, y leyendo el ángulo en el círculo graduado. Conservando la misma disposición, se hace que un haz de luz atraviese el prisma y se mide el ángulo de mínima desviación. Entonces, se calcula directamente

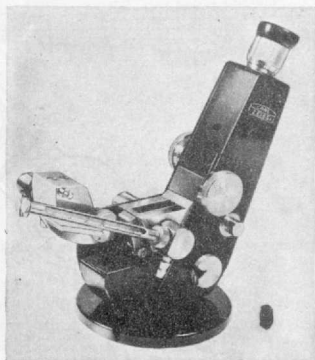


Fig. 4-7. Refractómetro Abbe. (Carl Zeiss, Inc.)

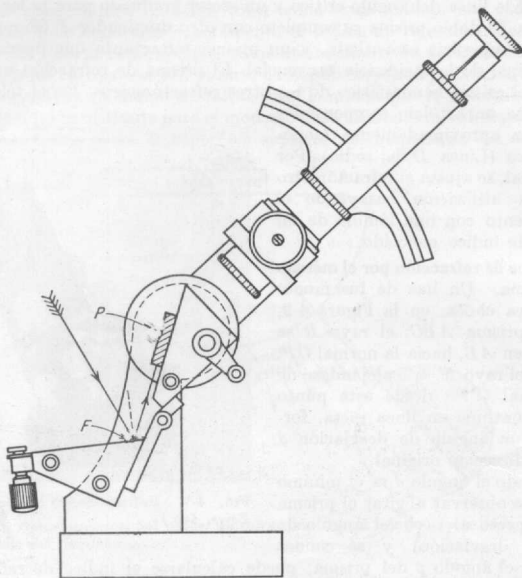


FIG. 4-8. Sección del refractómetro. (Carl Zeiss, Inc.)

el índice de refracción por la fórmula anterior a partir del ángulo del prisma y del ángulo mínimo de desviación.

Los prismas huecos, contruidos de delgados vidrios esmerilados espe-

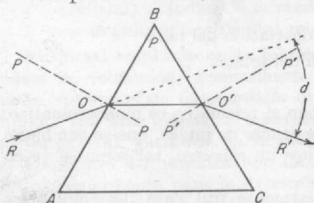


FIG. 4-9. Haz luminoso inclinado hacia un lado por su paso a través de un prisma de cristal.

ciales, o de placas con las superficies paralelas, o de portaobjetos seleccionados y cortados y unidos, se emplean para determinar los índices de refracción de los líquidos. La Figura 4-11 muestra un prisma hueco formado por láminas de cristal de un mismo grueso con sus superficies paralelas. Puede utilizarse baquelita para pegar las láminas de cristal a un prisma sólido. Para los trabajos corrientes suele bastar un prisma cortado a 45° . Si no, pueden utili-

zarse dos prismas: uno, cortado a 30° , para las determinaciones altas, y otro, a 60° , para los valores más bajos. Ocasionalmente, los portaobjetos empleados en el microscopio tendrán entre sus caras el paralelismo

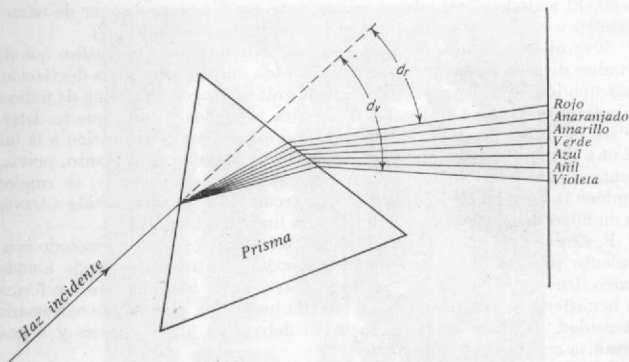


FIG. 4-10. Diagrama que ilustra la variación del ángulo de mínima desviación con la longitud de onda.

preciso para que puedan formar las paredes de un prisma. Tales portaobjetos pueden ensayarse observando la reflexión en ambas caras de la lámina de una cuerda colgante estirada mediante un peso o de cualquier otra línea recta. El portaobjetos debe mantenerse junto al ojo que observa y girarse hasta que se vean a un mismo tiempo ambas superficies. Si las líneas rectas son paralelas y distan de ella lo mismo, puede considerarse que la lámina es adecuada. Cuando se encuentra un buen portaobjetos, es posible partirlo en dos partes y utilizar cada una para cada lado del prisma; ambas partes se biselan y pegan a una cuña de cristal³. Si las paredes del prisma están formadas por cristales con sus caras exactamente paralelas, no es necesaria la corrección correspondiente al cristal. Sin embargo, es mejor adoptar un bisel exagerado y montar los dos lados en posiciones opuestas. Así podrá corregirse ampliamente cualquier falta de paralelismo que exista. Las determinaciones del índice de refracción por este método son útiles para mediciones en los líquidos más allá del alcance de los refractómetros comer-

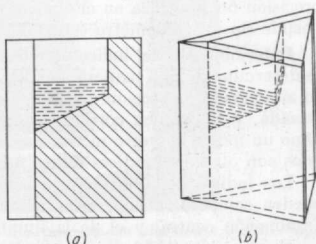


FIG. 4-11. Prisma de vidrio preparado para ser montado en un goniómetro para determinar los índices de refracción de los líquidos. (Espacio vacío para el líquido en la parte superior de la cuña entre las placas.)

³ La resina de baquelita, desecada a 70°C durante 10 horas y vuelta a cocer a 125°C otras 10 horas, puede formar el prisma sólido. Debe evitarse la baquelita barnizada, que contiene aceite de china, y que es afectada por los líquidos índices.

ciales. El método es así mismo conveniente cuando no se dispone de refractómetro y como comprobación cuando se dispone del mismo ⁴.

Si se utiliza siempre el mismo prisma, cabe preparar un gráfico que dé el índice de refracción correspondiente a cada ángulo de mínima desviación, para una longitud de onda dada. Si este gráfico abarca una gama de índices de refracción entre 1.400 y 1.850, cubrirá todos los valores que se determinan de ordinario. Pueden determinarse los índices de refracción a la luz de una llama de sodio, obtenida colgando una lámina de amianto, previamente saturada de sal, sobre un quemador. Ocasionalmente, se emplea también la luz de un arco de vapor de mercurio o la luz transmitida a través de un filtro. Un tubo de gas helio da una línea ideal del sodio ⁵.

F. Lowell Dunn, M. D., de Omaha, Nebr., ha sugerido un método conveniente para asegurar una llama de sodio: utiliza un filtro de alundo grueso lleno de sal sobre un mechero Méker. En la base del crisol se forma un hemisferio de NaCl fundido, el cual da una llama de sodio de extremada intensidad. Debe colocarse el mechero debajo de una campana y a una distancia segura del microscopio.

La General Electric Company ha construido unas bombillas especiales (Figura 4-12) que dan una fuerte luz de sodio; necesitan unos veinte minutos para adquirir el color adecuado, pero una vez que alcanzan la intensidad correcta, suministran una fuente de iluminación excelente.

Los índices refractivos de varios tipos de vidrio empleados en el instrumental óptico están determinados, hasta la octava cifra decimal, con luz de sodio, luz de vapor de mercurio y otras varias fuentes luminosas. Tal precisión no se utiliza en el examen de los minerales al microscopio; no es posible sin un goniómetro especial.

Determinación del índice de refracción con el microscopio. Raramente se determina de una manera completa el índice de refracción de un mineral en su examen en sección delgada. Las láminas se montan con bálsamo de Canadá, y el examen corriente consiste en averiguar si un mineral dado tiene un índice mayor o menor que el del bálsamo. También se comparan, unos con otros, los índices de los minerales adyacentes.

Los índices de refracción de las sustancias transparentes adyacentes pueden compararse por varios métodos: los dos más usuales son el de la iluminación central y el de la iluminación oblicua.

Existe un método directo de determinación con el microscopio; pero, por desgracia, no es lo suficientemente exacto con secciones delgadas.

Método de iluminación central. El ensayo se realiza mejor con una amplificación de 80 ó mayor y cerrando parcialmente el diafragma iris. A tales aumentos, es muy sensible a las pequeñas diferencias en los índices de refracción. Si se usa luz monocromática, es posible distinguir entre los índices de refracción de dos minerales, incluso cuando difieren solo en la tercera cifra decimal.

⁴ Los doctores E. S. Larsen, de la Universidad de Harvard, C. S. Ross, del U.S. Geological Survey, y H. E. Merwin, del Laboratorio Geofísico, han ideado varios tipos de prismas huecos.

⁵ Empleada en los laboratorios del U.S. Geological Survey.

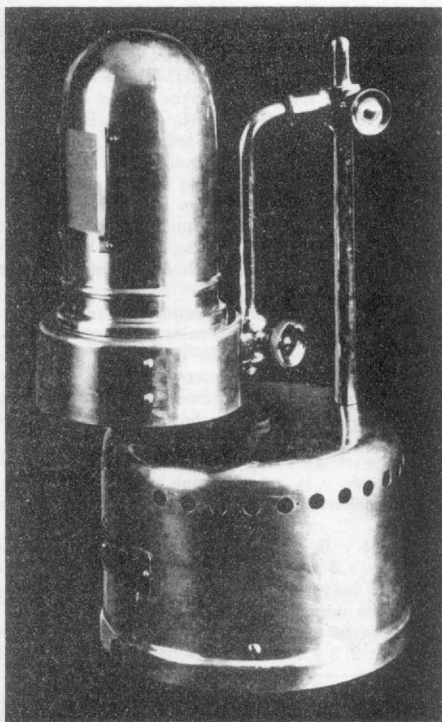


FIG. 4-12. Arco de sodio para laboratorio que proporciona una fuerte luz de sodio. (*Nela Specialty Division, Lamp Division of General Electric Co.*)

El ensayo puede aplicarse a las secciones delgadas de minerales transparentes comparando los índices relativos de refracción de minerales adyacentes o comparando con el bálamo. El fenómeno en que se basa el ensayo es la reflexión total de la luz incidente, según un ángulo mayor que el crítico, cuando pasa de un mineral a otro de mayor o menor índice. Este ensayo se emplea para comparar con el bálamo los índices de refracción de varios minerales en sección delgada, para comparar unos minerales con otros cuando se les observa en contacto y para comparar los fragmentos minerales con los varios medios de inmersión en que pueden montarse. La luz penetra en la sección desde abajo y se transmite a través de ambos medios. En el borde de contacto tienen lugar conjuntamente la reflexión y la refracción

y una parte del haz incidente es variado a uno u otro lado, dependiendo de los índices relativos de refracción de los medios adyacentes. Si los dos índices son iguales, no tiene lugar la refracción. En el caso de que el índice de refracción de uno sea mayor que el del otro, la luz tomará una inclinación entre ambos, según un ángulo mayor que el crítico. Una parte del haz se desviará hacia el mineral de mayor índice. Esta desviación se convierte en una mancha de luz visible a través del microscopio justo en el interior del grano de mineral de mayor índice. Esta mancha es más patente si está parcialmente cerrado el diafragma iris y si el tubo del microscopio está ligeramente levantado. Es una línea blanca irregular y si el tubo se levanta todavía un poco más, se produce una ilusión: la línea parece moverse hacia el centro del mineral. Si el tubo se baja, el efecto es inverso. Esta mancha es llamada a menudo *línea Becke*, en honor del mineralogista F. Becke.

Dado que el índice del bálsamo es conocido (aproximadamente 1,537), pueden dividirse rápidamente los minerales en dos grupos: unos con índice mayor que el bálsamo y otros con índice menor. Es conveniente recordar al hacer el ensayo que cuando el tubo *es levantado*, la línea se mueve hacia el medio que tiene el *mayor* índice de refracción. Recíprocamente, cuando el tubo *es deprimido*, la línea se mueve hacia el que tiene índice *más bajo* (Figura 4-13).

Explicación del efecto de «línea blanca». Hotchkiss ha dado una explicación de la refracción y la reflexión que tienen lugar en la iluminación central. La construcción de la Figura 4-14 está modificada según su diagrama explicatorio.

Dos minerales, *A* y *B*, se suponen en contacto en una sección delgada con el plano límite *YZ* vertical. Sea *A* el mineral con índice más bajo ($n = 1,50$) y *B* el de mayor índice ($n = 1,70$). Un cono de rayos luminosos que entra en los dos minerales desde el bálsamo inferior, es dividido por igual a ambas partes del plano límite. El cono de luz puede estar representado por los rayos 1, 2, 3 y 4, con ángulos de inclinación como los indicados en la figura.

El ángulo crítico del mineral *B* con respecto al plano límite es de unos 62° . Los rayos de luz interiores a *B* (3 y 4) que tocan la superficie *YZ* según un ángulo mayor que el crítico, son reflejados totalmente. Los rayos luminosos interiores a *A* (1 y 2) se dividen en la superficie límite, parte son refractados en *B* y parte reflejados hacia atrás en *A*. La intensidad comparativa de los rayos reflejados y refractados depende del carácter del plano límite. Si la superficie de contacto es muy pulida, se refleja mayor cantidad de luz y se refracta menos. Si la superficie es rugosa, como ocurre por lo general, se refracta mayor cantidad de luz hacia *B*.

Al nivel *M*, aparece una banda luminosa dentro del mineral de mayor índice. Dentro de esta distancia vertical, casi toda la luz del cono se concentra en *B*. Si se lleva a esta zona el plano focal del microscopio, se hace visible una banda luminosa en el interior del mineral de índice más alto. Si se eleva el plano focal, subiendo el tubo del microscopio, al nivel *U*, la banda se ensancha y da la ilusión de moverse hacia el centro de *B* saliendo del plano límite. Por el contrario, si se baja al plano focal al nivel *L*,

hay una mayor concentración de luz en r que en s y la banda luminosa aparece dentro del mineral de índice más bajo. Los círculos próximos a los paréntesis que indican la extensión vertical de las zonas, explican las posiciones de la raya blanca correspondientes a las diversas elevaciones del plano focal.



FIG. 4-13. Iluminación central, $n > \text{bálamo}$.

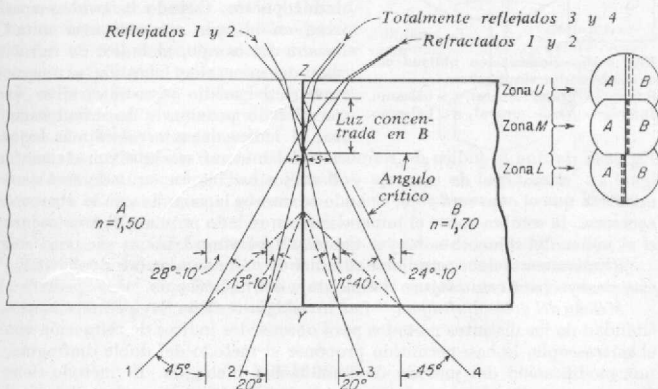


FIG. 4-14. Explicación teórica del movimiento de las líneas luminosas en la iluminación central. (Modificado de Hotchkiss.)

Iluminación oblicua. El método de la iluminación oblicua o inclinada es más conveniente para efectuar la misma comparación relativa de los índices de refracción, anteriormente esbozada, pero a una amplificación de unos 50 ó menos. Así, se incluye dentro del campo una área mayor de la sección delgada y el método permite al observador comparar rápidamente un mayor número de granos minerales. También permiten una interpolación más fácil de los valores entre dos medios de montaje.

El efecto se observa mejor sin la lente del condensador. Puede asegurarse la iluminación oblicua colocando bajo la platina una cartulina, de

modo que corte la mitad de la luz. Esto oscurece una mitad del campo, al tiempo que permite iluminar ampliamente la mitad opuesta con rayos oblicuos. (Figura 4-15). Puede asegurarse un efecto similar insertando una cartulina estrecha en la ranura accesoria situada sobre un objetivo de poder moderado (con el condensador dentro del sistema). Este último efecto puede ser el mismo o inverso, dependiendo de la longitud focal del condensador.

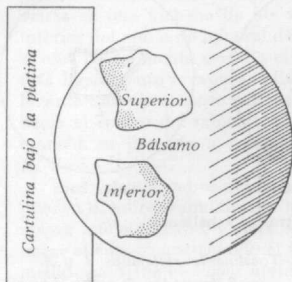


FIG. 4-15. Iluminación oblicua con el condensador eliminado.

Superior=grano mineral, $n >$ balsamo.
Inferior=grano mineral, $n <$ balsamo.

En caso de que el índice de refracción del mineral sea aproximadamente igual al del material de montaje y se utilice luz blanca, un lado será azul mientras que el otro será rojo. Cuando se inserta la cartulina en la abertura accesoria, la sombra sobre el mineral está en el lado próximo al área oscura si el índice del mineral es mayor que el del balsamo⁶.

Primeramente debe estudiarse el índice de un mineral conocido, haciendo este ensayo para estar seguro del montaje del microscopio.

Método del doble diafragma. Las investigaciones de Saylor sobre la sensibilidad de los distintos métodos para obtener los índices de refracción con el microscopio, le han permitido proponer el método del doble diafragma, una modificación del método de iluminación inclinada. El método tiene una mayor aplicación en el método de inmersión, que se describe en el Capítulo 9. La disposición, con un fragmento mineral montado sobre un líquido de inmersión de índice elevado, se explica en la Figura 4-16. Las líneas llenas representan los rayos luminosos que entran en el mineral, y las de puntos indican las que salen.

Relieve. Ciertos minerales resaltan fuertemente en el campo del microscopio, otros son moderadamente visibles y, frecuentemente, es difícil distinguir el mineral del conjunto. Esta apariencia o visibilidad del contorno y la superficie se define como *relieve*.

⁶ Otro modo sencillo de asegurar el efecto de la iluminación oblicua, sugerido por J. D. H. Donnay, consiste en ensombrecer el campo mediante la inserción parcial del sistema que contiene el nicol analizador.

El relieve de un mineral montado en bálsamo, depende de la diferencia entre el índice del mineral y el del bálsamo. Los minerales con índices de refracción bajos (criolita, $n = 1,364$) e índices de refracción altos (espinela, $n = 1,75$) tienen fuerte relieve. Por otra parte, los minerales tales como la apofilita tienen aproximadamente el mismo índice de refracción que el bálsamo y, en consecuencia, son difícilmente visibles en secciones delgadas.

Los minerales anis tricos con una amplia diferencia entre sus dos índices refractivos extremos, muestran una variación de relieve cuando se gira la platina del microscopio. La calcita da una de las mejores ilustraciones de esta característica; el rayo de vibración paralela al eje menor del romboedro, tiene aproximadamente el mismo índice que el bálsamo. Cuando esta dirección es paralela al nicol inferior, un fragmento de calcita colocada sobre la platina del microscopio muestra bajo relieve. Cuando el fragmento exfoliado de calcita se gira un ángulo recto hasta que el eje mayor sea paralelo al nicol inferior, la luz viaja a través del mineral con la velocidad correspondiente al índice mayor, y se ve al mismo grano con un gran relieve. Un cierto número de minerales comunes muestran una variación de su relieve con la dirección.

El relieve de un mineral puede estimarse como *bajo*, *moderado*, *alto* y *extremadamente alto*. En las tablas siguientes se dará un término descriptivo semejante para cada mineral.

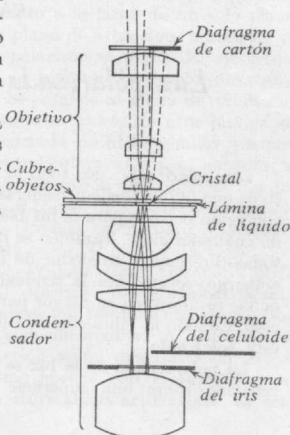


FIG. 4-16. Método del doble diafragma de iluminación oblicua. (C. P. Saylor.)

BIBLIOGRAFIA

- Becke, F.: *Sitzber. Akad. Wiss. Wien*, CII, Abt. 1, pp. 358-378, 1893.
 Graham, G. W.: *Mineral. Mag.*, vol. 15, pp. 341-347, 1910.
 Hotchkiss, W. O.: *Am. Geol.*, vol. 36, pp. 305-308, 1905.
 Saylor, C. P.: *Accuracy of Microscopical Methods for Determining Refractive Index by Immersion*, Nat. Bur. Standards, Research Paper 829, vol. 15, pp. 277-294, 1935.
 Wright, F. E.: *The Methods of Petrographic-microscopic Research*, Carnegie Inst. Pub. 158, 1911.

CAPITULO 5

Luz polarizada plana en los minerales

Luz polarizada. En todo lo anterior se ha supuesto con fines descriptivos que la luz puede considerarse como un movimiento ondulatorio. Esta condición persiste para la luz blanca ordinaria o para la luz monocromática de cualquier clase. También se ha supuesto que la vibración tiene lugar en todas direcciones alrededor de la línea de transmisión. Muchas veces, sin embargo, se modifica la tendencia a vibrar en todas las direcciones y las ondas resultan, en su mayor parte, restringidas a un único plano de vibración. Cuando la vibración está limitada de esta manera, se dice que la luz está *polarizada*.

La polarización de la luz se puede demostrar de varios modos: (1) por reflexión sobre una superficie pulida; (2) mediante refracción angular repetida a través de varias láminas de cristal delgado; (3) por absorción con ciertos cristales tales como la turmalina o la herapatita (polaroide); (4) por medio de prismas de calcita.

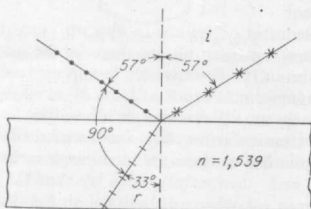


FIG. 5-1. Polarización por reflexión.

Polarización por reflexión. La luz reflejada oblicuamente por una superficie pulimentada, tal como el tablero de una mesa o un espejo, está parcialmente polarizada. Si se examina la reflexión a través de una lámina polarizante, se oscurecerá el

campo visual cuando el plano de vibración se gire hasta formar un ángulo recto con el plano de reflexión de la superficie pulida.

Según Brewster, la polarización sobre una placa de cristal es máxima cuando las direcciones de reflexión y refracción forman un ángulo de 90° . (Figura 5-1). Así, el ángulo r resulta ser el complemento del i , y la fórmula $n = \sin i / \sin r$ puede escribirse $\sin i / \cos i = \tan i = n$. Por lo tanto, en el ángulo de máxima polarización, la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción de la sustancia que refleja. En la Figura 5-1 se ve la relación angular para una placa de $n = 1,539$.

Un corte de un polaroscopio antiguo se muestra en la Figura 5-2. La reflexión sobre las placas de vidrio produce luz polarizada que pasa a través de un prisma nicol. Este instrumento se utilizaba antes de la aparición

del moderno microscopio polarizante para el examen de láminas de mineral.

Polarización por absorción. La turmalina produce polarización por absorción. La luz que choca contra el cristal, vibrando en una gran variedad de planos, es fuertemente absorbida excepto a lo largo de un solo plano. Los rayos que emergen, limitados a este plano de vibración, muestran, de

este modo, polarización plana. El eje cristalográfico c (a menudo la mayor dimensión del cristal) es paralelo al plano de vibración.

Observando a través de otra lámina de turmalina cortada de modo similar y superpuesta perpendicularmente a la anterior, se revela efectivamente la polarización. La luz transmitida a través de ambas, es eliminada cuando las láminas se montan, y la parte común estará oscura (Figura 5-3).

En 1852, William Bird Herapath, M.D. (Figura 5-4), describió unos cristales delgados de una composición fuertemente absorbente, sulfato de yodocinconidina. A causa de su fuerte absorción según una dirección, semejante a como sucede con la turmalina, se denominan «turmalinas artificiales». El ma-

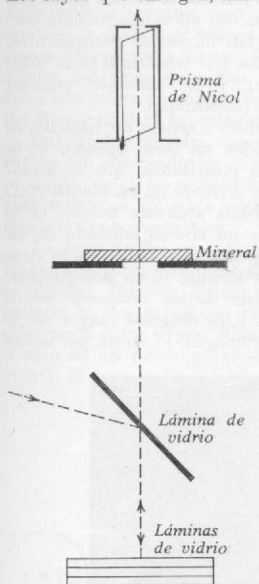


FIG. 5-2. Polarización por reflexión en un polariscopio.

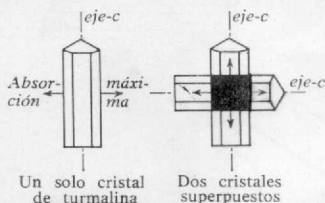


FIG. 5-3. Oscurecimiento debido a la absorción producida por la superposición de dos cristales de turmalina.

terial fue llamado *herapatita* en honor de su descubridor. Actualmente existen varios métodos para producir finas láminas transparentes que contienen pequeños cristales de herapatita orientados paralelamente, embebidos en plástico. La ilustración de la Figura 5-5 corresponde a dos láminas de este material. Es posible preparar láminas polarizantes semejantes con una superficie de más de 10 dm².

Varios de los microscopios descritos en este libro están equipados con láminas polarizantes. Los instrumentos fabricados en los Estados Unidos utilizan láminas conocidas en el mercado con el nombre de «Polaroid». Estas láminas no solamente proporcionan excelentes efectos ópticos, sino que también permiten mejorar el diseño del microscopio a base de un

ahorro de espacio. Las láminas polaroides son útiles para pruebas ópticas y otros usos suplementarios, en particular cuando se necesita un amplio campo de luz polarizada.

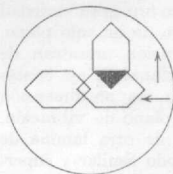


FIG. 5-4. Cristales de herapatita mostrando una zona de extinción correspondiente a la superposición de dos cristales individuales con sus direcciones de mayor absorción perpendiculares.

Doble refracción (Birrefringencia). Al pasar la luz a través de un gran número de minerales transparentes es doblemente refractada en dos haces que vibran según planos que son aproximadamente perpendiculares entre sí.¹ Los minerales transparentes, con excepción de aquellos que cristalizan en el sistema isométrico (cúbico), y los minerales amorfos tienen doble refracción (anisótropo).

La calcita transparente, o espato de Islandia, es un mineral que suministra un buen ejemplo de la doble refracción y de la polarización que la acompaña. Los objetos vistos a través de un bloque rómbico de espato de Islandia aparecen dobles; si se coloca sobre un punto y un círculo marcado en un papel (Figura 5-6), el punto aparecerá ante la vista como dos puntos, y el círculo, como dos círculos. La luz que origina una de las imágenes estará constituida por ondas de vibración paralela a la diagonal mayor de la superficie rómbica; la que da origen a la otra imagen, lo estará por ondas

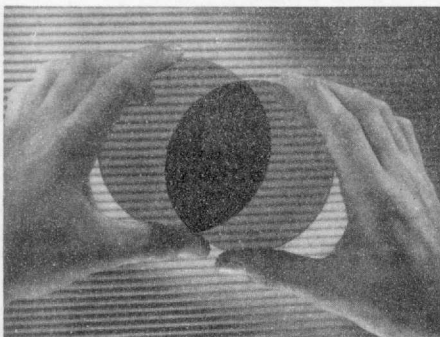


FIG. 5-5. Dos discos de herapatita (Polaroid) montada sobre láminas de vidrio fotografiadas con los planos de polarización perpendiculares. (Polarizing Instrument Co.)

paralelas a la diagonal menor (Figura 5-7). Los dos rayos luminosos han sido refractados diferentemente y los dos índices de refracción serán distintos.

¹ F. E. Wright ha demostrado que la determinación precisa del ángulo que forman dos haces tiene que ser objeto de una cuidadosa medición física. En el estudio de la doble refracción, no se tendrá en cuenta la cuantía de la variación sobre los 90° teóricos, y, en términos corrientes, se considerarán a los dos haces como perpendiculares.

Los índices extremos de la calcita son 1,516 y 1,658, con una diferencia de 0,142. En la posición indicada, los dos índices son muy distantes.

En el Museo Nacional de Estados Unidos, en Washington, una gran esfera de cuarzo, como una pelota de más de treinta centímetros de diámetro, muestra claramente la doble refracción. En este caso, los índices son 1,544 y 1,553, con una diferencia de 0,009. Para obtener la misma separación de imagen que con la calcita, el cuarzo debe tener un grueso quince veces mayor. La calcita de la Figura 5-6 tiene unos diez centímetros de lado; una esfera de cuarzo, del tamaño de la del Museo, no dará tal separación de imagen.

Cuando los cristales como la calcita o el cuarzo son observados en la dirección del eje principal (eje c), no se nota doble refracción. Esto mismo es aplicable a todos los cristales tetragonales o exagonales.

La dirección del eje óptico es la de isotropía, en cualquier otra dirección el mineral es anisótropo. En este último caso, la luz se polariza en dos rayos que vibran perpendicularmente entre sí: uno vibra normalmente al eje óptico (*rayo ordinario*), el otro en un plano paralelo a dicho eje (*rayo extraordinario*). En la calcita, el rayo ordinario vibra paralelamente a la diagonal mayor de la

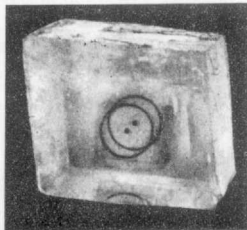
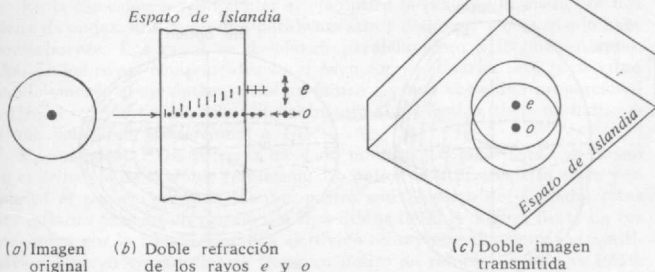


FIG. 5-6. Doble refracción en un rombo de calcita transparente o espató de Islandia.



(a) Imagen original (b) Doble refracción de los rayos e y o

(c) Doble imagen transmitida

FIG. 5-7. Separación de los rayos imagen extraordinario (e) y ordinario (o) en el espató de Islandia.

cara rómbica de una exfoliación romboédrica, como se ve en la Figura 5-8; el rayo extraordinario vibra en un plano que pasa por el eje óptico y es paralelo a la diagonal menor.

Indicatriz óptica. La indicatriz sirve para explicar la disposición óptica

de un cristal. En esencia, consiste en una superficie generada alrededor de un punto siendo los radios los índices de refracción.

Para los cristales tetragonales y hexagonales (Figura 5-9a, b) es un esferoide de rotación; el índice para el rayo extraordinario muestra una gama de valores, mientras que para el rayo ordinario permanece constante. El índice ϵ coincide con el eje principal de simetría del cristal (eje c). Cuando ϵ es mayor que ω , el esferoide es alargado y el cristal es ópticamente positivo (cuarzo); cuando es menor, el esferoide es achatado y el cristal ópticamente negativo (calcita).

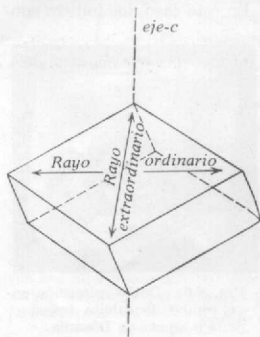


FIG. 5-8. Rayos ordinarios y extraordinarios en una calcita exfoliada.

La sección principal de una indicatriz uniaxial (Figura 5-10) puede utilizarse para examinar la disposición direccional de una onda normal y el rayo correspondiente, cuando ambos están inclinados respecto al eje. La sección es alargada, con el eje mayor LL' , correspondiente al eje c del cristal, igual a 2ϵ ; el eje menor SS' es igual a 2ω y está en un plano normal al eje c del cristal.

La línea OD representa la dirección de una onda normal intermedia cualquiera. A lo largo de esta línea, una serie de ondas vibra en el plano

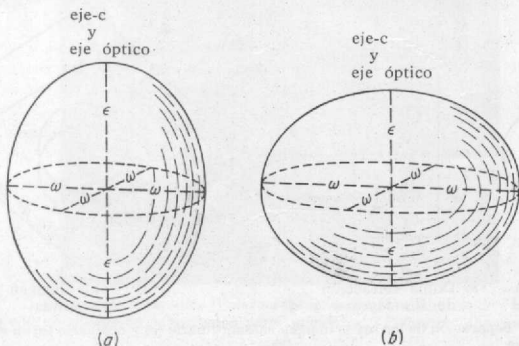


FIG. 5-9. Indicatriz uniaxial. (a) Positiva. (b) Negativa.

de la sección, mientras que la otra serie lo hace en uno perpendicular al de la sección.

El índice de refracción de la serie perpendicular al plano de la sección es ω y el semieje de la indicatriz corresponde a este valor. El índice de refrac-

caciones; solamente los mejores objetivos acromáticos dan resultados satisfactorios con aumento ocular $12\times$ ó mayor.

Los objetivos apocromáticos se construyen para proporcionar una corrección adicional del color más perfecta a la que dan usualmente los acromáticos. En estos objetivos, todas las imágenes producidas por los diferentes colores del espectro están prácticamente en el mismo plano y tienen el mismo tono. Las lentes son de una combinación de fluorita y vidrio. Las dificultades de obtener fluorita pura y las complicaciones prácticas de su manufactura, son considerables; por consiguiente, el costo es mayor que el de los objetivos acromáticos ordinarios. Los objetivos apocromáticos se

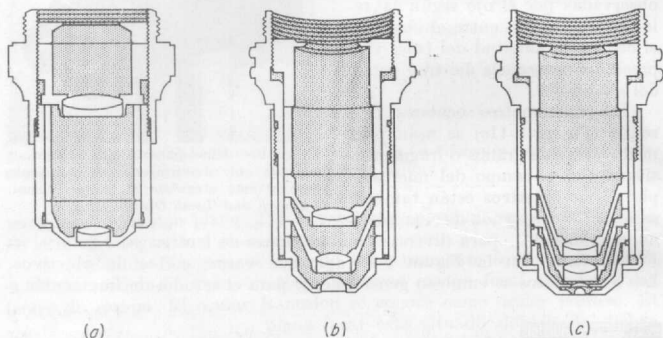


FIG. 2-12. Secciones de objetivos. (a) Objetivo $10\times$, 16 mm, 0,25 N. A., divisible, acromático. (b) Objetivo acromático, $43\times$, 4 mm, 0,65 N. A.. (c) Objetivo acromático, $97\times$, 1,8 mm, 1,25 N. A., inmersión en aceite. (Bausch and Lomb Optical Co.)

emplean solamente de un modo ocasional en el estudio microscópico de los minerales.

Las principales características de un objetivo, de interés para el estudiante, son: la amplificación inicial, la apertura numérica, la longitud focal y la distancia de trabajo.

La longitud óptica del tubo, dividida por la distancia focal, da el aumento inicial. Diversos fabricantes marcan sobre el objetivo la amplificación inicial correspondiente a las longitudes mecánicas de los tubos standard³. Esta cifra, multiplicada por el poder del ocular, da el aumento para dicha longitud standard del tubo. Esto debe corregirse, sin embargo, cuando está insertado el prisma analizador (a no ser que éste contenga lentes de compensación); las correcciones pueden determinarse con platina y ocular micrométricos.

La distancia de trabajo es la que existe entre el objetivo, cuando está enfocado, y la parte superior del cristal que cubre el portaobjetos.

³ Bausch and Lomb Optical Co. y Spencer Lens Co. = 160 mm, Leitz = 170 mm y Zeiss = 170 mm.

El rayo extraordinario está polarizado en un solo plano de vibración.

Y como la luz que sale del prisma está constituida enteramente por rayos extraordinarios, es luz polarizada plana.

Las modificaciones permiten un campo agrandado (Thompson) y un prisma más compacto (Arhens). En el prisma de Arhens (Figura 5-12) el eje óptico de la calcita forma ángulo recto con la trayectoria de la luz en el microscopio.

Interferencia entre nicols cruzados.

Cuando se superponen dos nicols con sus planos de vibración normales entre sí, se dice que los nicols están cruzados. En general, se utiliza el microscopio polarizante con los prismas en esta posición. Una vez ajustados, el plano de cada nicol permanece fijo, pero el nicol superior puede entrar o salir del tubo del microscopio. Los nicols cruzados producen oscurecimiento cuando la platina está vacía o cuando contiene materiales ópticamente isométricos tales como el vidrio, el ópalo y los cristales del sistema de polarización isométrico. Los minerales que cristalizan en sistemas cristalinos distintos del isométrico son anisótrópos y en la mayoría de las posiciones dan lugar a una serie de colores de interferencia entre los nicols cruzados.

En la Figura 5-13 se ve a la luz pasando a través de una lámina mineral después de abandonar el nicol inferior. Dicha luz choca contra la cara inferior de la placa mineral vibrando en un solo plano. Cuando entra en la lámina, la luz se divide en dos series de rayos; ambas están polarizadas, pero normalmente, y la luz se desplaza, en cada plano, con velocidad diferente dentro del mineral. Como resultado, cuando las dos series de rayos emergen por la cara superior de la lámina, una se ha desplazado más lejos que la otra.

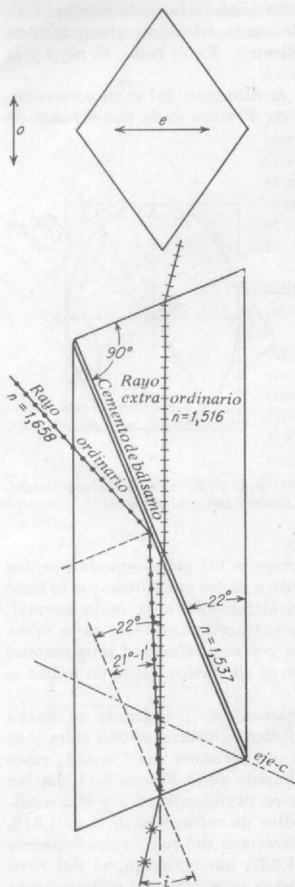


FIG. 5-11. Polarización y desviación de la luz en un prisma nicol.

Ambas se desplazan según una línea recta en el analizador y continúan vibrando en ángulo recto.

Los granos irregulares de los minerales anisótropos colocados sobre la platina del microscopio, resuelven la luz procedente del polarizador en dos rayos distintos para cada mineral, ordinario y extraordinario (Figura 5-14). Puede resultar una amplia gama de direcciones, pero en cada cristal los rayos ordinarios y extraordinarios son perpendiculares.

En el analizador, ya sea un polaroide o un prisma nicol, estos dos rayos se resuelven en un plano único, como indica la Figura 5-15. De esta manera, ambos rayos salen del analizador vibrando en un mismo plano. Sin embargo, se conserva la diferencia de fase inicial debida al mineral. En consecuencia,

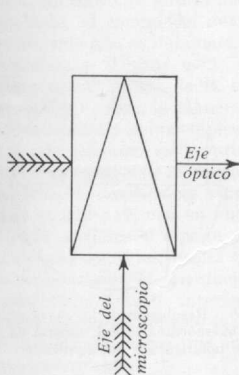


FIG. 5-12. Bloque de calcita de sección cuadrada cortado para formar un prisma polarizante. (Según C. D. Ahrens.)

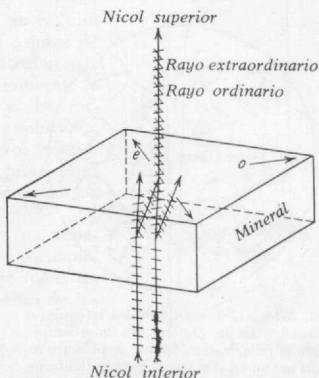


FIG. 5-13. Direcciones de vibración de los rayos ordinario y extraordinario en un mineral anisótropo iluminado con luz polarizada.

cuando los rayos ordinarios y extraordinarios emergen del analizador, están en situación de interferencia y se observan los correspondientes colores de interferencia. En la Figura 5-16 se ve un diagrama de este mecanismo; la separación entre los rayos e y o , determinada por el espesor, posición e índices del mineral, produce una diferencia de fase como en las ondas que salen del analizador. La resolución de cada componente efectivo tiene lugar en el plano del analizador, como se explica esquemáticamente en la Figura 5-15. Como resultado de esta resolución, del analizador proceden dos rayos.

Los colores de interferencia producidos dependen de la naturaleza de la luz y de la cuantía de la retardación de una de las series de ondas con respecto a la otra. Mediante los colores de interferencia puede determinarse de un modo exacto la retardación, designada por la letra griega Δ . El valor de Δ se expresa en milimicras (millonésimas de milímetro = $m\mu$), la misma unidad utilizada para medir la longitud de onda de la luz.

La retardación puede cambiarse en un amplio margen por (1) variación del espesor t del mineral, (2) cambio en la orientación de modo que se varíen los índices de refracción n_1 y n_2 de los dos rayos que salen del mineral. Esta relación puede expresarse mediante la ecuación

$$\Delta = t(n_2 - n_1)$$

En esta ecuación, t representa el espesor del mineral expresado en milímetros, n_2 es el mayor índice de refracción, y n_1 , el menor correspondiente a una orientación particular.

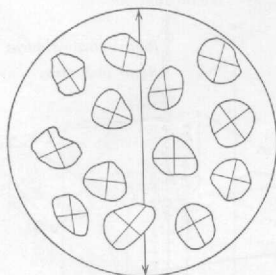


FIG. 5-14. Granos minerales irregulares colocados en la platina del microscopio sobre el polarizador. La luz se polariza en cada grano en dos rayos perpendiculares: ordinario y extraordinario.

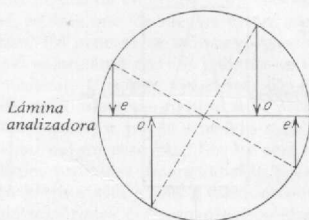


FIG. 5-15. Resolución de los rayos ordinario y extraordinario del mineral en el plano de polarización del analizador.

Diferencia de fase. Los dos rayos que proceden del mineral tienen una diferencia de fase P , la cual es igual a la retardación dividida por la longitud de onda:

$$P = \frac{\Delta}{\lambda}$$

Puesto que se ha demostrado que

$$\Delta = t(n_2 - n_1)$$

se deduce que

$$P = \frac{t(n_2 - n_1)}{\lambda}$$

Cuando la retardación es cualquier múltiplo entero de la longitud de onda ($n\lambda$), las ondas que emergen de la parte superior del nicol resultan iguales y en oposición de fase. Entonces, la resultante es igual a cero y el campo producido, oscuro (Figura 5-17).

La máxima intensidad tiene lugar en una posición intermedia, cuando

la retardación es $[(2n + 1)/2]\lambda$ y las componentes de las ondas, en el plano de la parte alta del nicol, son iguales y están situadas a un mismo lado de la línea de transmisión. La onda resultante es igual a la suma de las dos componentes (Figura 5-18).

Colores de interferencia. Si la lámina de mineral está situada con los planos de vibración paralelo y perpendicular a los planos del artificio polarizador, la luz no atraviesa el analizador y el mineral está en posición de extinción. Si, por el contrario, se gira la placa hacia cualquier otro lado, el campo del analizador no seguirá oscuro, sino que se iluminará con los colores de interferencia. Dichos colores de interferencia varían con el grosor de la sección mineral, la naturaleza de éste, la manera como se ha cortado la lámina y la luz empleada. La explicación de la relación entre estos varios factores implica muchos principios de la mineralogía óptica. Para simplificar la cuestión, es aconsejable considerar estas variables de una en una.

Si se modifica el espesor de la lámina mineral situada entre los nicoles cruzados, permaneciendo constante la orientación, tiene lugar un cambio en el color de interferencia. Uno de los mejores ejemplos de este fenómeno se consigue con la cuña de cuarzo que acompaña al microscopio polarizante.

La Figura 5-19 es un diagrama de una porción de cuña de cuarzo, cortada a lo largo del eje c y con una variación de espesor entre 0,0 y 0,10 mm. La cuña está colocada entre nicoles cruzados, a 45° con los planos de éstos; en esta posición, resulta brillantemente iluminada con colores de interferencia. Estos colores se funden gradualmente unos con otros y varían a lo largo de la cuña con el aumento y disminución del espesor. Cada espesor da lugar a una banda uniforme de color a lo ancho de la cuña. Puede colocarse esta cuña de cuarzo en la platina del microscopio y moverla hacia atrás y hacia delante para observar los órdenes de colores debidos a la variación de espesor.

Cada porción de la cuña está sujeta a la ecuación:

$$\Delta = t(n_2 - n_1)$$

Dado que el eje óptico permanece paralelo a la platina, $(n_2 - n_1)$ es constante

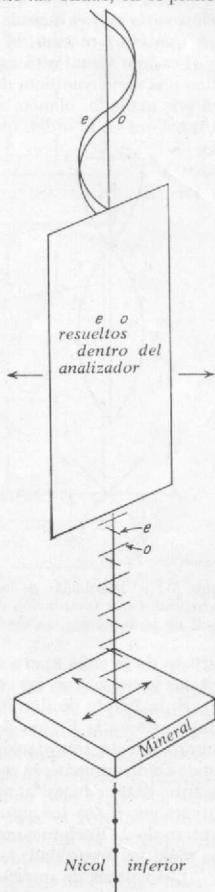


FIG. 5-16. Paso de los rayos por el analizador cuando los nicoles están cruzados.

e igual a 0,009, valor aceptado para el cuarzo. En consecuencia, la retardación varía con el espesor t .

Cuando t es cero, la retardación, para cualquier luz, es también nula y el campo visual está oscuro. Con la luz blanca, cuando t aumenta se suceden una serie completa de colores: empezando por el gris y continuando por el gris azulado, blanco, amarillo y anaranjado, van apareciendo a la vista los colores en el orden que se han nombrado. Sin embargo, en la parte más

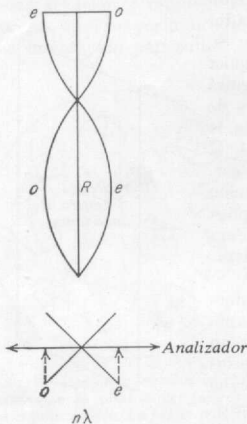


FIG. 5-17. Resolución de las ondas en el analizador por retardación de una longitud de onda entera o múltiplos de ella.

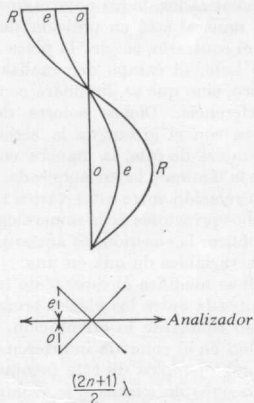


FIG. 5-18. Resolución de las ondas en el analizador por retardación de media longitud de onda o múltiplos de ella.

gruesa de la cuña aparece atenuado el contraste; y en cuñas con un espesor varias veces mayor, los colores pierden el tinte iridiscente en la parte gruesa.

Si la fuente de iluminación es monocromática, el efecto producido está explicado en la Figura 5-20. En este caso, cuando el espesor llega hasta el punto que la retardación resulta igual a una longitud de onda, las dos ondas monocromáticas resultan iguales y de fase opuesta y se anulan mutuamente dando lugar a oscuridad. Como resultado, aparecerá una banda oscura en todos los puntos para los que la retardación sea un múltiplo entero de λ . Recíprocamente, en los múltiplos impares de $\frac{1}{2}\lambda$ tendrá lugar la máxima intensidad; las dos ondas son iguales y de idéntica fase.

Los colores de interferencias, debidos a la luz blanca, pueden considerarse compuestos por las diversas longitudes de onda del espectro. La Figura 5-21 explica la relación de estos colores de interferencia con los componentes monocromáticos. La graduación de los colores de interferencia, en los cuatro órdenes, se indica en la parte superior de la figura. Debajo, se han colocado los correspondientes a las longitudes de onda monocromáticas.

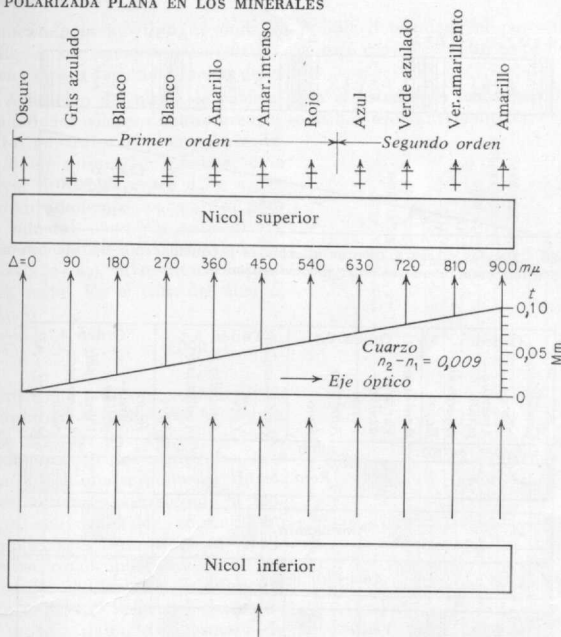


Fig. 5-19. Colores de interferencia debidos a una porción de una cuña de cuarzo situada entre nicols cruzados con luz blanca.

Los diversos haces monocromáticos producen, al atravesar la cuña, bandas oscuras a distintos espesores; así mismo, aparece la máxima intensidad en los correspondientes intervalos intermedios. Sin embargo, la diferencia entre las longitudes de onda de los extremos opuestos del espectro es tal, que la primera banda oscura para el violeta aparece en la primera posición de máxima intensidad para el rojo. La banda para el violeta tiene aproximadamente $410 m\mu$ y la longitud de onda para el rojo es de unas $700 m\mu$. Para $\Delta = 410 m\mu$ el color de interferencia tira al naranja. El anaranjado es un color en el que predominan los colores del extremo rojo del espectro sobre los del extremo violeta. El porcentaje de máxima intensidad para el rojo con $\Delta = 410 m\mu$ es de unos 83. La máxima intensidad para el rojo tiene lugar a $\frac{1}{2}\lambda$ ó $350 m\mu$. El porcentaje de este máximo para $410 m\mu$, sería

$$\frac{2(\lambda_r - \lambda_v)}{\lambda_r} \times 100 = \frac{2(700 - 410)}{700} \times 100 = 83 \text{ por ciento}$$

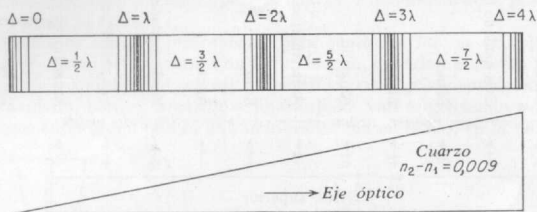


FIG. 5-20. Bandas claras y oscuras alternadas producidas por luz monocromática blanca con una cuña de cuarzo entre nicoles cruzados.

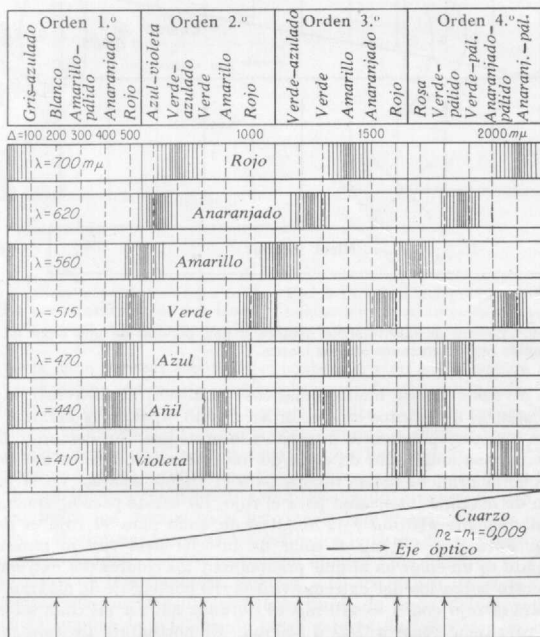


FIG. 5-21. Relación entre los colores de interferencia debidos a la luz y los debidos a la luz blanca.

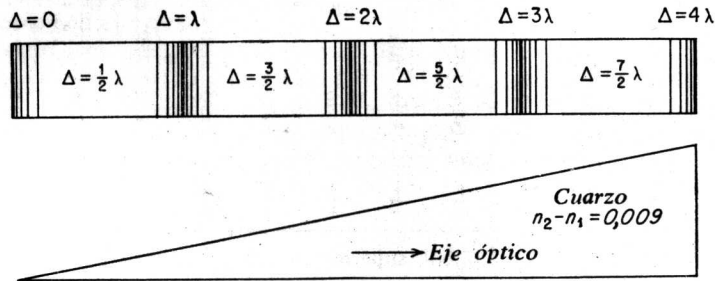


FIG. 5-20. Bandas claras y oscuras alternadas producidas por luz monocromática blanca con una cuña de cuarzo entre nicoles cruzados.

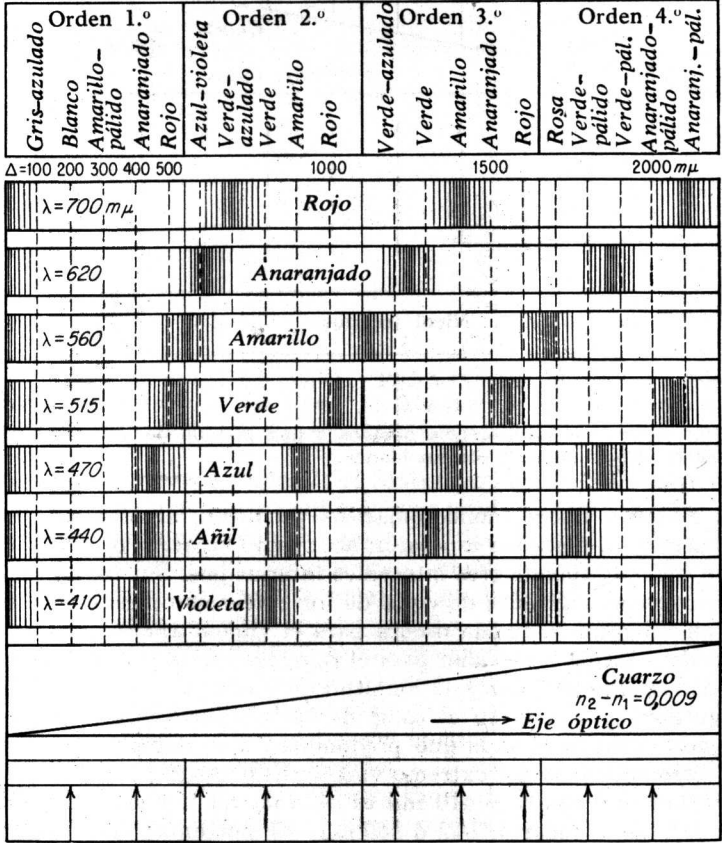


FIG. 5-21. Relación entre los colores de interferencia debidos a la luz y los debidos a la luz blanca.

Conociendo la longitud de onda es posible determinar el porcentaje de cualquier luz monocromática dada, que esté presente en un color de interferencia para una retardación definida.

Aplicación del plano de colores para el estudio de los minerales. El plano de los colores de interferencia se utiliza constantemente en el estudio de los minerales con luz polarizada. La doble refracción máxima, o la mayor diferencia entre n_2 y n_1 , es aproximadamente constante para un mineral dado. Si se sustituye esta constante en la ecuación $\Delta = t(n_2 - n_1)$, el resultado es una línea recta. En el caso del cuarzo, cuando

$$(n_2 - n_1) = 0,009$$

la relación entre el espesor y la retardación se indica en la Figura 5-22. Cuando $n_2 - n_1$ es máximo, predomina en los minerales más anisótropos una serie normal de colores; solo unos pocos, como la idocrasa, con dispersión anormal, no cumplen esta serie y deben considerarse como independientes. Sin embargo, el diagrama es adecuado para indicar el color del cuarzo de un espesor dado, o el espesor de cuarzo que da un color de interferencia determinado.

Pueden dibujarse líneas similares basadas en la $n_2 - n_1$ máxima, o birrefringencia. El gráfico de colores (véase la página 166) da las líneas de doble refracción máxima para los minerales comunes.

En la lámina en color, los colores de interferencia, con Δ menor de 500 $m\mu$, pertenecen al *primer orden*. El violeta ($\Delta = 550$) constituye el límite del primer orden y se conoce como *violeta sensible*, ya que un pequeño cambio en cualquier trayectoria origina una clara diferencia de color. Entre el violeta $\Delta = 550$, al violeta $\Delta = 1.128$, los colores pertenecen al segundo orden. Desde el violeta $\Delta = 1.128$, al violeta $\Delta = 1.652$, pertenecen al tercer orden. Por encima del cuarto orden no es fácil diferenciar los colores. Los más llamativos y brillantes corresponden al final del primer

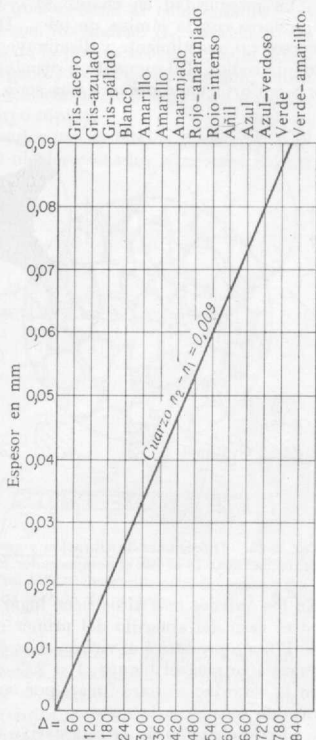


Fig. 5-22. Variación de la retardación con el espesor del cuarzo.

orden y principios del segundo; hacia el fin del cuarto orden, los colores se difuminan unos en otros dando lugar a tintes verdes y fosáceos que tienden al blanco agrisado. Hay que tomar precauciones para diferenciar estos colores del gris azulado, blanco y blanco amarillento de la zona inferior del primer orden.

La inseguridad en cuanto al orden de un color determinado puede eliminarse con la lámina de mica. Dicha lámina de mica se corta de un espesor tal que aumenta y disminuye la retardación $\frac{1}{2}\lambda$ aproximadamente (luz de sodio). Tal aumento o disminución da lugar en la zona inferior del primero o segundo orden a una serie de colores marcadamente diferentes.

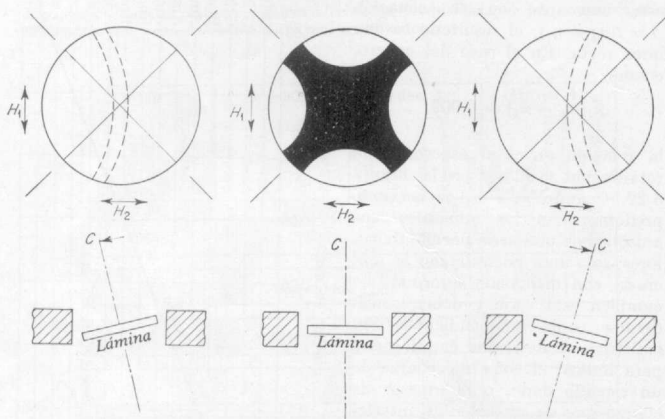


Fig. 5-23. Direcciones de vibración y movimiento de los anillos de color en el campo del ocular cuando se usa el compensador Berek.

En los órdenes más altos tiene lugar un cambio poco visible. Por ejemplo, en el caso del amarillo del primer orden $\Delta = 400 \text{ m}\mu$ un aumento en Δ de $175 \text{ m}\mu$ producirá el violeta $\Delta = 575 \text{ m}\mu$ y una disminución de la misma cuantía origina el blanco $\Delta = 225 \text{ m}\mu$. El mismo aumento o disminución en la retardación dará lugar, por encima del cuarto orden, a un pequeño cambio sensible a la vista.

Determinación de la retardación con un condensador Berek. M. Berek (1913) describió un compensador rotativo de calcita, de construcción mecánica sencilla, que puede usarse para medir la retardación (Figura 2-19). Una lámina de calcita de $0,1 \text{ mm}$ de espesor se apoya en un eje rotativo con un mango de metal. El conjunto puede insertarse en la ranura accesoria del microscopio. La rotación de la lámina del compensador se registra en un tambor graduado, aplicado al eje de giro. Este tambor se dispone con un nonius que aproxima hasta décimas y puede calibrarse para leer grados.

La lámina del compensador está soportada por un pequeño anillo que

puede quitarse fácilmente y permite sustituir la lámina por otra de espesor diferente. El tipo de lámina, ordinariamente utilizada, cubre retardaciones desde cero al cuarto orden.

El eje de rotación del compensador se dispone diagonalmente a los planos de polarización de los dos nicoles. Si los planos de los nicoles miran al Norte y al Este, la dirección del eje que sostiene al compensador será Noroeste. El compensador va marcado con dos flechas: H_1 , paralela al eje de rotación del compensador o longitud de la ranura accesoria, es la dirección de vibración del rayo lento; H_2 , perpendicular al eje de rotación, indica la traza de la proyección del plano que contiene al eje inclina c de la calcita y marca la dirección de vibración del rayo rápido.

Primeramente, se coloca el compensador con la lámina horizontal y se inserta dentro de la estructura; con los nicoles cruzados, aparecerá dentro del campo una gran cruz oscura. Cuando esta cruz coincida con el retículo del microscopio, el compensador está en la posición cero (ver Figura 5-23). Si se gira, a la derecha o a la izquierda, el tambor del compensador, aparecerán en el campo los diversos órdenes de los colores de interferencia en una secuencia correspondiente a la de la cuña de cuarzo.

Para determinar la retardación entre nicoles cruzados de un grano mineral puede utilizarse el compensador del modo siguiente: se mueve el grano en cuestión hacia el centro del campo y se coloca en una posición a 45° , con la dirección de vibración del rayo lento, paralela a la H_2 del compensador. Entonces, se inserta el compensador y se le gira, primero a la derecha y luego a la izquierda, deteniéndose en cada caso cuando se ha reducido completamente el color de interferencia hasta la extinción. Se divide por dos la diferencia entre ambas lecturas y se entra con este valor en una fórmula sencilla suministrada por los fabricantes; la resolución da esta fórmula de la retardación correcta del grano mineral.

La Figura 2-19 muestra una vista del compensador Berek. La Figura 5-23 indica las visuales obtenidas en el campo del microscopio con la lámina del compensador horizontal y girada a la derecha y a la izquierda. Las secciones verticales de la parte inferior de la Figura 5-23 indican la inclinación del eje c y los dibujos superiores representan los correspondientes campos del microscopio. Con luz monocromática, las bandas claras y oscuras se producen a cualquier lado del retículo. Con luz blanca, las bandas, a un lado de la cruz oscura, que indican la posición cero, están coloreadas.

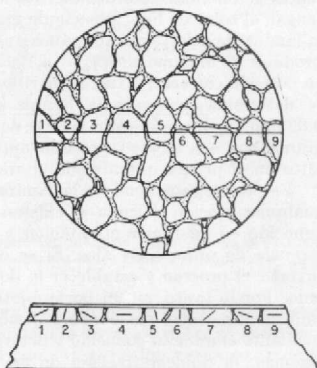


Fig. 5-24. Determinación del espesor de una sección de cuarzo.

La cruz negra desaparece cuando se inserta el compensador encima de una sección delgada de un mineral con doble refracción. Sin embargo, cuando se gira la lámina, cambian los colores de interferencia hasta una compensación completa, tal como se ha mencionado más arriba.

Determinación del espesor de la sección. Supongamos que la Fig. 5-24 representa una sección delgada que contiene numerosos granos pequeños de cuarzo orientados al azar. Los granos del 1 al 9, situados en el campo del microscopio a lo largo del retículo, están orientados con sus ejes ópticos en las posiciones indicadas en la sección de la figura. La mayoría están inclinados, ocasionalmente, unos pocos están verticales y otros pocos horizontales. Los ejes horizontales están en la posición adecuada para dar un valor máximo de $(n_2 - n_1)$. Como todos los granos tienen el mismo espesor, los que tienen sus ejes horizontales mostrarán el orden alto de interferencia o máxima retardación. En una sección delgada, los granos que tengan el color de interferencia de mayor orden, según se observe mediante la lámina de colores, serán granos que están en una posición adecuada para producir el máximo de $(n_2 - n_1)$. En nuestro caso, el grano cuatro está en posición correcta; si fuera amarillo paja, el espesor de la sección, tal como se determina mediante la lámina de colores de interferencia, sería de 0,03 mm. Aparecerán otros colores de interferencia, pero solamente aquellos granos con sus ejes en posición aproximadamente horizontal estarán tan altos en el primer orden como el amarillo paja.

Es posible, acudiendo a la lámina de colores, determinar el espesor de cualquier sección delgada si existen los suficientes granos de un mineral conocido en cualquier orientación y puede determinarse el color de interferencia de orden más alto. Si se conoce el espesor, es también posible invertir el proceso y establecer la doble refracción de un mineral desconocido. Por lo tanto, en un portaobjetos que contenga dos o más minerales, uno de los cuales sea conocido, cabe establecer el espesor de la sección mediante el mineral conocido y determinar, observando los colores de interferencia, la doble refracción de los minerales desconocidos cuyo espesor ya se sabe.

Dirección de la vibración de los rayos lento y rápido. Frecuentemente, es importante calcular los planos de vibración de los dos rayos normales en un grano mineral anisótropo. Los dos rayos tienen diferentes índices de refracción, siendo el que tiene el mayor índice el rayo lento y el de índice menor, el rayo rápido. La determinación de las direcciones de los rayos rápido y lento se efectúa entre nicoles cruzados, estableciéndose la posición de los dos rayos mediante la observación de la extinción. Cuando el mineral se oscurece, las direcciones de vibración de los dos rayos son paralelas a los planos de vibración de los prismas del nicol. Y dado que estos planos son paralelos a la cruz filiar del ocular, los planos de vibración en el mineral también serán paralelos, en la posición de extinción, a la cruz del retículo.

Para establecer cuál de los dos rayos es el rápido y cuál el lento se usa una lámina de mica o una lámina de yeso. Cuando se han determinado las posiciones de las direcciones de vibración de los rayos, se lleva el mineral de la posición de extinción a la de máxima interferencia. A continuación, se coloca en el tubo del microscopio cualquier lámina de mica o yeso con la

dirección de vibración del rayo lento, paralela a una de las direcciones de vibración del mineral. Si el orden del color aumenta, la dirección paralela es la de vibración del rayo lento del mineral; si disminuye, esta dirección representa al rayo rápido. Conociendo una dirección, la otra es la opuesta. Generalmente, se emplea la lámina de mica con los minerales de doble refracción débil: la de yeso se usa en los casos de fuerte doble refracción. Cuando el mineral tiene una doble refracción muy fuerte, puede utilizarse una cuña de cuarzo. Ya que la cuña de cuarzo varía la retardación desde cero al cuarto orden, puede producirse una variedad de colores, el color correspondiente a una parte determinada de la cuña dependerá de su espesor. Cuando el rayo lento coincide con la dirección del rayo lento en el mineral, tiene lugar el correspondiente refuerzo de la retardación. El color

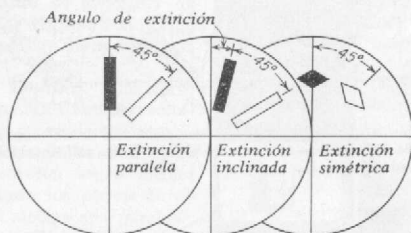


FIG. 5-25. Posiciones relativas de la iluminación máxima y mínima en la extinción paralela, inclinada y simétrica tal como se observa entre nicols cruzados.

del mineral cambiará súbitamente a un color de mayor orden, dependiendo de la porción de cuña superpuesta. Cuando la dirección del rayo lento en la cuña es opuesta a la del mismo en el mineral, tiene lugar una sustracción.

Extinción. Cuando un cristal, grano o lámina mineral con doble refracción se oscurece entre nicols cruzados, está en posición de extinción. Con frecuencia el mineral tiene líneas de exfoliación prominentes o bordes cristalinos que facilitan el referir el ángulo, en el que tiene lugar la extinción, a una característica cristalográfica; a falta de esta característica de referencia, el ángulo de extinción resulta indeterminado. La Figura 5-25 es un ejemplo de extinción paralela, simétrica e inclinada.

Extinción paralela. Frecuentemente, los minerales tienen un único plano de exfoliación. Las trazas de los planos de exfoliación aparecen en las secciones delgadas como líneas irregularmente espaciadas. Si el mineral oscurece entre nicols cruzados con la exfoliación paralela a las direcciones de vibración de los dos nicols, se dice que la extinción es paralela.

Algunos minerales cristalizan de tal manera que sus secciones son alargadas, cuadradas o rectangulares. También pueden observarse ejemplares con exfoliación cuadrada o rectangular. Si estos minerales oscurecen entre nicols cruzados, con las direcciones de exfoliación paralelas a los planos de vibración de los nicols, se dice que tienen extinción paralela.

Extinción oblicua o inclinada. Muchos minerales se extinguen entre nicoles cruzados cuando la exfoliación o los límites del cristal forman un ángulo oblicuo con los planos de vibración de los dos nicoles. Se dice que tienen extinción inclinada.

En este caso, es necesario conocer la posición en el mineral bien de la dirección de vibración del rayo rápido, bien de la del rayo lento. El ángulo de extinción se determina usualmente con referencia al más lento de los dos rayos, el que tiene mayor índice de refracción. La naturaleza de los dos rayos se establece con una de las láminas accesorias al microscopio.

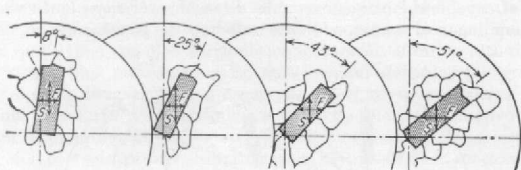


FIG. 5-26. Diagrama que explica las diversas posiciones de un mineral alargado con ángulo máximo de extinción de 51° respecto al rayo lento, tal como puede aparecer en una sección delgada.

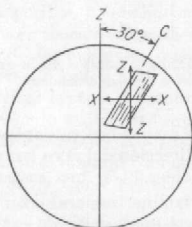


FIG. 5-27. La hornblenda de la Fig. 8-32 en la posición de máxima extinción entre nicoles cruzados. $C \wedge Z = -30^\circ$.

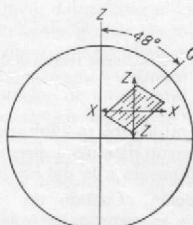


FIG. 5-28. Hedenbergita de la Fig. 8-33 entre nicoles cruzados en la posición de extinción máxima. $C \wedge Z = -48^\circ$.

Como explica la Figura 5-26, generalmente se observan, para un mismo mineral en una sección determinada, varios ángulos diferentes de extinción. El valor que conviene determinar es la máxima lectura entre la dirección de vibración del rayo lento y el plano de vibración del analizador. En el caso de observación con microscopio, se gira la platina hasta que queda el mineral en una posición de extinción; entonces, se deja a un lado el nicol superior y se determina, por lectura en la platina graduada del microscopio, el ángulo que forman el hilo vertical del retículo (paralelo a uno de los nicoles) y la línea de exfoliación o bordes del cristal. Se cruzan otra vez los nicoles y se lleva el mineral a otra posición de extinción, midiendo el ángulo correspondiente. Inmediatamente, se verifica la dirección de vibración del

rayo lento utilizando una lámina accesoria. Deben repetirse una serie de medidas con diferentes cristales, hasta tener la certeza de que se ha encontrado en mayor ángulo correspondiente a cada mineral particular. Cuando se ha determinado ya este ángulo, es necesario referirlo a una descripción de las direcciones ópticas del cristal para determinar un plano de referencia adecuado, para el ángulo de extinción.

Las descripciones de los minerales de la Segunda Parte de este texto incluyen los ángulos de extinción. En general, se indica el ángulo entre Z y el eje c del cristal. Si Z es una dirección de rayo lento y la exfoliación principal o los bordes del cristal están referidos al eje c , generalmente es posible interpretar la extinción mediante el diagrama de orientación. Las Figuras 5-27 y 5-28 son un ejemplo de tales interpretaciones.

Extinción simétrica. Un cierto número de minerales forman cristales con sección o exfoliación rómbica. En la mayoría de los casos, estos minerales oscurecen entre nicols cruzados, cuando los planos de vibración de los nicols son paralelos a las diagonales de estos rombos. Este tipo de extinción se califica de simétrica. Varios minerales, que forman cristales cuadrados, pueden producir también extinción simétrica.

Elongación. Ocasionalmente, los granos cristalinos se desarrollan con una disposición alargada y ángulos agudos. Al microscopio pueden tener forma de tabla, recordar a pequeñas agujas, presentarse en cristales alargados o adoptar otros variados tipos de desarrollo semejante.

Cuando tales cristales son anisótropos, es posible determinar, con una de las láminas accesorias, las direcciones de vibración de los rayos rápido y lento. En el caso de que la dirección de vibración del rayo lento del cristal sea paralela al lado largo, se dice que el mineral tiene *elongación positiva*. Cuando la dirección de vibración del rayo lento atraviesa el cristal por su distancia más corta, el mineral tiene *elongación negativa*. Estos dos términos pueden enunciarse brevemente como *largo-lento* y *largo-rápido* (*length-slow* y *length-fast*, en inglés); *length-slow* indica que la dirección de vibración del rayo lento es paralela al lado largo del cristal, y *length-fast* representa el paralelismo con la dirección del rayo rápido.

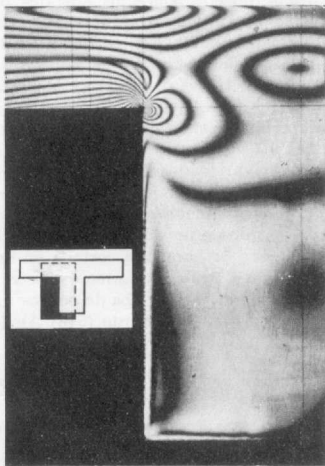


FIG. 5-29. Fotografía entre nicols cruzados de las zonas de interferencia a igual tensión de una baquelita cortada en forma de una viga en T y colocada bajo presión. (Cortesía de Photo Elastic Laboratory, Department of Civil Engineering, Columbia University; fotografía de Raymond D. Mindlin.)

Interferencias anormales. A veces, minerales que normalmente son isotropos resultan anisotropos y producen efectos de interferencia entre nicoles cruzados. La producción de estos colores de interferencia anormales, generalmente de bajo orden, se llama *anomalía*. La Figura 8-26 representa una sección delgada de granate, que muestra bandas de colores de interferencia simétricamente dispuestas, fotografiada entre nicoles cruzados. El estudio con rayos X revela que el grante conserva todavía una cristalización isométrica, por lo tanto, estos colores son verdaderamente anómalos.

Por presión sobre los cristales pueden producirse colores de interferencia y modelos estructurales. Según Crookes, el gran diamante Cullinan, que mide casi 10 centímetros de ancho, muestra una marcada anisotropía que es debida a la presión.

Las secciones delgadas de idocrasa presentan a menudo una secuencia anormal de colores de interferencia. Aunque este mineral es tetragonal y normalmente tiene doble refracción, los colores de interferencia no siguen la lámina de colores y son anómalos. La clinozoisita, la zoisita, la brucita y algunas variedades de clorita son otros ejemplos de minerales anisotropos que dan colores de interferencia anómalos.

Frecuentemente se obtienen zonas de interferencia semejantes con baquelita isotropa a presión. En la Figura 5-29 se ve una parte de una pequeña estructura de baquelita cortada en forma de T colocada entre nicoles cruzados. La T tendría la forma que se ve en el encuadre y la parte fotografiada está señalada por la línea de puntos. La fotografía se ha obtenido utilizando luz monocromática verde (5461 Å) del espectro del mercurio.

BIBLIOGRAFIA

- Ahrens, C. D.: *New Polarizing Prism*, *J. Roy. Microscop. Soc.*, vol. 9, págs. 397-398, 1886.
- Berek, M.: *Zur Messung der Doppelbrechung hauptsächlich mit Hilfe des Polarisationsmikroskops*, *Centr. Mineral., Geol.*, págs. 427-435, 1913.
- Bouasse, H.: *Optique cristalline doublée réfraction polarisation rectiligne et elliptique*, Paris, 1925.
- Drude, Paul: *Theory of Optics*, trad. por Mann y Millikan, Longmans, Green & Co., Inc., Nueva York, 1925.
- Groth, P.: *The Optical Properties of Crystals*, trad. por B. H. Jackson, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1910.
- Hartshorne, N. H., y A. Stuart: *Crystals and the Polarizing Microscope*, Edward Arnold & Co., Londres, 1934.
- Johannsen, A.: *Manual of Petrographic Methods*, McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1918. Se encontrará un resumen de los diversos tipos de prismas de polarización en las páginas 158-175.
- MacCullagh, James: *Crystalline Reflexion and Refraction*, *Trad. Roy. Irish Acad.*, vol. 18, págs. 31-74, 1837.
- Miers, H. A.: *Mineralogy*, 2.^a ed., por H. L. Bowman, Macmillan & Co., Ltd., Londres, 1929.
- Schuster, A., y J. W. Nicholson: *Theory of Optics*, Edward Arnold & Co., Londres, 1924.
- Thompson, S. P.: *On a New Polarizing Prism*, *Rep. Br. Assoc. Advance. Sci.*, vol. 51, págs. 563-564, 1881.
- Tutton, A. E. H.: *Crystallography and Practical Crystal Measurement*, 2.^a ed., vol. 2, Macmillan & Co., Ltd., Londres, 1922.

Weinschenk, E.: «Petrographic Methods», trad. por R. W. Clark, McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1912.

Winchell, A. N.: «Elements of Optical Mineralogy, Part I: Principles and Methods», 5.^a ed., John Wiley & Sons., Inc., Nueva York, 1937.

Wright, F. E.: The Transmission of Light through Transparent Inactive Crystal Plates, etc., *Am. J. Sci.*, 4.^a ser., vol. 31, págs. 157-211, 1911.

Remitimos a los estudiantes a los comentarios de Tunell y Morey relativas a ciertas propiedades ópticas fundamentales (*Am. Mineralogist*, vol. 17, págs. 365-380, 1932).

CAPITULO 6

Luz polarizada convergente

Generalidades. Para obtener las figuras de interferencia (véase Cap. 2) se utiliza en el microscopio una combinación conoscópica de lentes. Estas figuras son especialmente útiles para la determinación de las direcciones ópticas en los cristales. Su interpretación incluye algunos conceptos esbozados en el capítulo anterior sobre la luz polarizada, combinados con el uso de la luz convergente.

Para observar sin microscopio una figura de interferencia puede emplearse una gran lámina de cristal transparente; una lámina de mica, colocada entre otras dos polaroides cruzadas, iluminada desde una ventana y colocada cerca del ojo, da una figura biáxica excelente. (El ojo suministra la visión conoscópica.) De modo semejante, las grandes láminas de cuarzo dan origen a figuras uniaxicas.

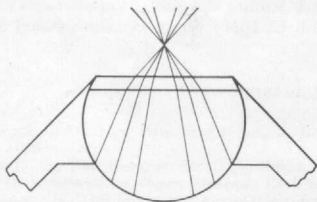


FIG. 6-1. Luz convergente producida por las lentes frontales del condensador.

Pero para obtener figuras de interferencia de pequeños cristales es necesario el empleo del microscopio. Los distintos elementos de la serie óptica deben estar exactamente alineados y correctamente centrados.

Es mejor utilizar una amplificación moderadamente alta, preferiblemente un objetivo de 4 mm; aunque algunas veces puede ser satisfactorio un objetivo de 8 mm y es más cómodo de manejar. Debajo de la platina, se inserta en el eje del microscopio un condensador auxiliar, cuyas lentes frontales lanzan un haz convergente concentrado contra la lámina mineral (Figura 6-1). Algunos microscopios tienen un diafragma, entre el polarizador y los componentes inferiores del condensador, que limita el campo visual y favorece la formación de la parte exterior de la figura de interferencia. En el tubo se coloca, sobre el analizador, una lente Bertrand; estas lentes llevan las figuras de interferencia al foco del ocular, aunque pueden conseguirse buenas figuras de pequeño tamaño, sin emplear las lentes de Bertrand, eliminando el ocular, el cual puede ser remplazado, en este caso, por un disco obscuro con un pequeño orificio en su centro.

Los minerales anisótropos dan origen a dos tipos de figuras de interferencia: uniaxiales y biaxiales. Los que cristalizan en los sistemas exagonal y tetragonal son uniaxiales; y son biaxiales los que hacen en los sistemas rómbico, monoclinico y triclínico. A veces, cristales biaxiales tienen un ángulo axial tan pequeño que aparecen como uniaxiales y, por el contrario, algunos cristales uniaxiales pueden llegar a convertirse por presión en biaxiales. Tales variaciones deben tenerse en cuenta, ya que pueden indicar características estructurales de interés. Generalmente, sin embargo, los cristales siguen la norma general.

Formación de las figuras de interferencia. Cuando la luz polarizada convergente pasa a través de una lámina de un cristal anisótropo produce, entre nicoles cruzados, una cierta retardación. Este efecto es similar en muchos aspectos a la retardación que se obtiene con la cuña de cuarzo, como se describió al tratar de la luz polarizada paralela. El uso de una lámina de cuarzo, en lugar de una cuña, y de luz convergente, en lugar de luz paralela, da lugar a colores de interferencia que dependen de la convergencia del haz. Variando el ángulo de iluminación de los rayos oblicuos se obtiene en los minerales con doble refracción una serie de valores para n_2 y n_1 . Y variando por giro los valores de n_2 y n_1 se logra modificar la retardación.

Una lámina de cuarzo produce un marcado efecto de interferencia cuando su eje óptico es perpendicular a la platina del microscopio: una cruz oscura sobre círculos concéntricos con los colores de interferencia. En este caso, dado que el espesor permanece constante, la retardación varía desde cero, en el centro, al máximo, en el círculo coloreado más exterior. El ángulo de incidencia del haz convergente, utilizando con la lámina de cuarzo, varía también desde cero, en el centro, hasta un máximo, en el borde. Como resultado de esto, la diferencia ($n_2 - n_1$) cambia de la misma manera de cero, en el centro donde el haz incidente es paralelo al eje óptico, hasta un valor máximo en el límite del campo. El oscurecimiento tiene lugar en el centro y donde las direcciones de vibración de la lámina son paralelas a las direcciones de vibración de los nicoles; la cruz marca posiciones de extinción. En torno a los 360° las direcciones de vibración están dispuestas tangencial y radialmente; por lo tanto, las direcciones de los rayos ordinario y extraordinario de la lámina serán paralelos, en determinadas direcciones, a los planos de vibración de los nicoles. Estas dos direcciones lo son de extinción y, en general, los minerales uniaxiales forman cruces oscuras con los brazos a 90° (Fig. 6-2). En los minerales biaxiales, las posiciones de extinción muestran una disposición más compleja y la figura de interferencia no es una simple cruz, sino que varía tal como se ve en la Figura 6-3. Los

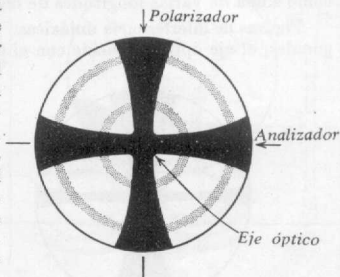


FIG. 6-2. Figura de interferencia uniaxial vista por debajo de un eje óptico.

diferentes órdenes de los colores son concéntricos con los órdenes bajos en el centro. Cuando el mineral permanece en una misma posición, el número de bandas de color, observadas en un campo determinado depende del espesor de la lámina y de la doble refracción.

La luz monocromática da lugar en las figuras de interferencia a bandas alternativamente claras y oscuras. Las bandas oscuras corresponden a retardaciones de $n\lambda$ y las bandas intermedias de iluminación máxima lo hacen a retardaciones de $(2n + 1)\lambda/2$. Esta relación es similar a la que se obtiene cuando la luz monocromática atraviesa una cuña de cuarzo. Los colores de las figuras de interferencia, obtenidas con luz blanca, son combinación de diversas longitudes de onda monocromáticas, de un modo análogo al considerar la lámina de colores de interferencia con luz blanca como suma de varias longitudes de onda monocromáticas.

Figuras de interferencia uniáxicas. En los minerales exagonales y tetragonales, el eje óptico coincide con el eje c del cristal; además, el centro de

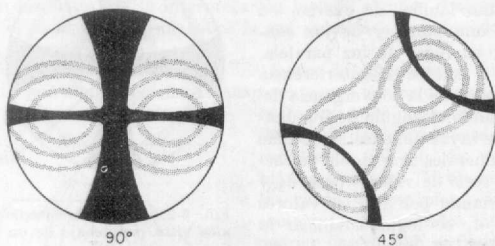


FIG. 6-3. Figuras de interferencia biaxiales en posiciones a 90° y 45° .

la cruz de la figura de interferencia, marca la posición del eje óptico. Si dicho eje óptico del mineral, coincide con el del microscopio, puede centrarse la figura de manera que sus brazos se crucen en la intersección del retículo del microscopio.

Sin embargo, si el eje óptico está inclinado con respecto al eje del microscopio, el punto de intersección de los brazos de la cruz, caerá fuera del centro del retículo; y, con frecuencia, queda fuera del campo del microscopio. Si el centro de la cruz axial no coincide con el centro del campo, el punto de intersección de sus brazos se moverá alrededor de el del retículo al girar la platina, describiendo un círculo y volviendo a su posición original, después de haber girado 360° . La intersección de los brazos de la cruz marca el punto de emergencia del eje óptico, y su desviación respecto al centro del campo, mide el ángulo entre el eje óptico y el eje del microscopio.

Aunque las figuras de interferencia uniáxicas están con frecuencia en posición excéntrica, los brazos de la cruz siguen siendo paralelos a los planos de vibración de los nicoles. Por ello, cuando se gira la platina, los brazos de la cruz barren el campo de un lado a otro. Es muy importante

el fijarse en si los brazos permanecen paralelos al retículo, ya que en ciertas figuras biáxicas también cruzan el campo los brazos. Sin embargo, estos últimos están curvados o tienen forma de media luna y se balancean a través del campo en vez de barrerlo paralelamente a los nicoles. En la Figura 6-4 se muestran varias posiciones excéntricas de una figura de interferencia uniaxial.

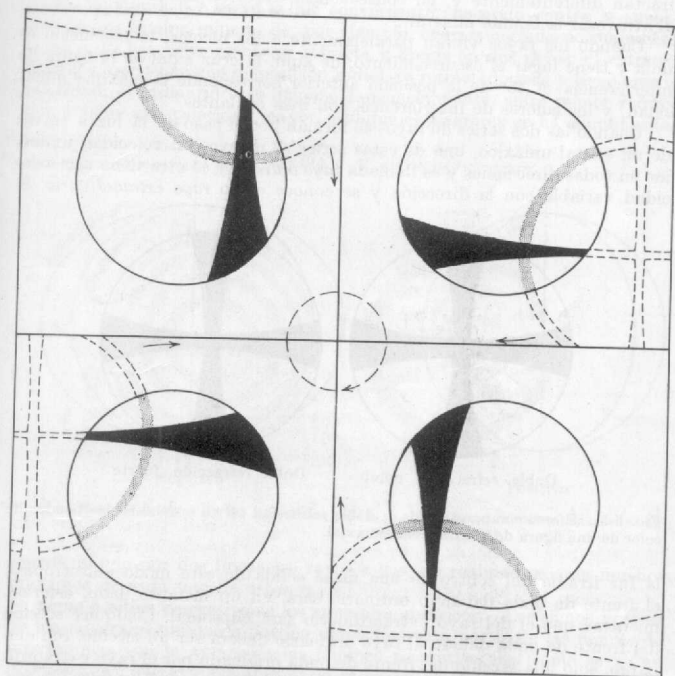


FIG. 6-4. Figuras de interferencia uniaxiales en posición excéntrica. Las líneas de puntos indican el movimiento de la figura alrededor del campo del microscopio cuando se gira la platina.

El número de bandas coloreadas en las figuras de interferencia uniaxiales varía con el espesor de la sección y la doble refracción del mineral. Una sección gruesa puede dar un cierto número de órdenes de colores, en tanto que otra delgada, del mismo mineral, no producirá bandas de colores por encima del primer orden. Si dos láminas, con la misma orientación e idéntico espesor, son de minerales distintos, la de mineral, con mayor

doble refracción, producirá un mayor número de bandas coloreadas. La relación entre las figuras uniaxiales de dos láminas minerales, del mismo espesor, pero distinta doble refracción, se ve en la Figura 6-5.

Direcciones de vibración en los cristales uniaxiales. En los cristales uniaxiales, un rayo vibra paralelamente al plano que contiene el eje c del cristal, otro lo hace paralelamente a uno normal al anterior; ambos se refractan diferentemente y, en consecuencia, recorren diferentes distancias al atravesar la lámina mineral.

Cuando los rayos vibran paralelamente a los nicoles, la resolución es nula y tiene lugar el oscurecimiento; de aquí, la cruz axial de la figura de interferencia. A 45° de la posición anterior corresponde la máxima intensidad, y los colores de interferencia son más brillantes.

Cuando las dos series de rayos se forman por el paso de la luz a través de un cristal uniaxial, una de estas series se mueve con velocidad uniforme en todas direcciones y es llamada *rayo ordinario*; la otra tiene una velocidad variable con la dirección y se conoce como *rayo extraordinario*. Si

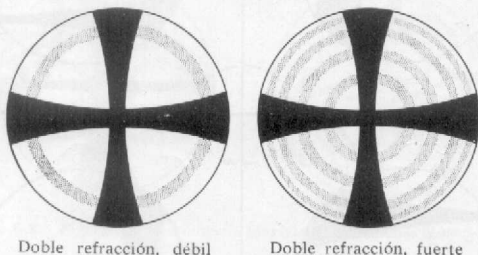


FIG. 6-5. Efecto comparativo de la doble refracción fuerte y débil en las bandas de color de una figura de interferencia uniaxial.

la luz irradia del centro de una masa sólida de este modo anisotrópico, el frente de onda del rayo ordinario será, en un instante dado, esférico, mientras que el del rayo extraordinario será elipsoidal. Cualquier sección del frente de onda debido al rayo ordinario deberá ser un círculo. Sin embargo, solo una sección del frente de onda originado por el rayo extraordinario será circular, las demás serán elipses. La Figura 6-6 muestra las secciones que contienen al eje óptico. Si la velocidad del rayo extraordinario es mayor, la elipse es exterior al círculo y el mineral será ópticamente negativo. Si la que es mayor es la velocidad del rayo ordinario, la elipse permanecerá interior al círculo y el mineral es ópticamente positivo. La Tabla 10-8 es una lista de los minerales uniaxiales positivos y negativos.

Las velocidades representadas en el dibujo de la Figura 6-6 son los recíprocos de los índices de refracción. Las velocidades de los rayos tienen el mismo valor en la dirección del eje c , en la cual coinciden la elipse y el círculo, y la máxima diferencia en la que es perpendicular a dicho eje.

El máximo y mínimo índice de refracción se observan normalmente al eje c ; en estas direcciones (únicamente) los índices de refracción son los recíprocos de las velocidades de los rayos.

Los índices de refracción de dos rayos perpendiculares al eje c se representan por n_e y n_o , siendo n_e el índice del rayo extraordinario y n_o el del rayo ordinario. Si el mineral es positivo, es mayor n_e ; si es negativo, n_e es menor.

En la Figura 6-7 se ve la luz convergente chocando contra la superficie de una lámina mineral de, por ejemplo, cuarzo, cortada normalmente al eje c . El haz convergente se refracta y divide en dos rayos: el extraordinario e , que tiene una disposición radial, es refractado más y tiene menor velocidad; el ordinario o se dispone tangencialmente, sufre menor refracción y tiene una velocidad mayor. Aunque el diagrama se ha simplificado,

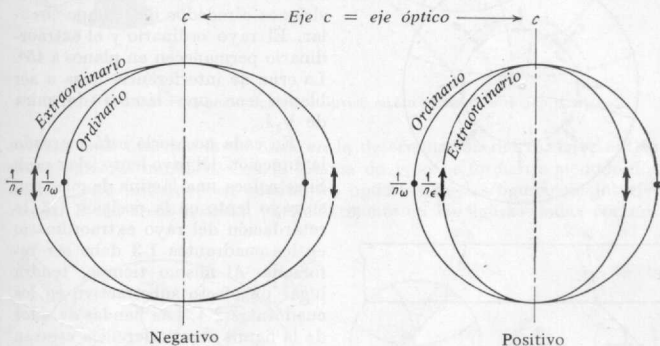


FIG. 6-6. Secciones de las superficies de los rayos en los minerales uniaxiales.

representando por dos líneas los rayos e y o , en realidad existen muchos múltiplos de cada uno de estos rayos.

Signo positivo y negativo de los minerales uniaxiales. Los signos ópticos de los minerales uniaxiales pueden determinarse a partir de las figuras de interferencia con la ayuda de las láminas accesorias. Tal como se ve en la Figura 6-7, el rayo extraordinario vibra en el *plano principal*, paralelo al eje c ; el ordinario lo hace perpendicularmente. Si el rayo que vibra en el plano principal es el rayo lento, se dice que el mineral es positivo; si es el rápido, que es negativo. En la Figura 6-7, el mineral es positivo porque el rayo lento e vibra paralelamente al eje c .

Para ver la posición del rayo lento con respecto al eje c , puede utilizarse una lámina accesoria. Si se coloca una lámina de mica o yeso, o una cuña de cuarzo en la ranura accesoria del tubo del microscopio, las bandas coloreadas de la figura de interferencia cambiarán de posición, comportándose de manera diferente en los cuadrantes alternos. Una serie de

círculos de color aumentará de diámetro a causa del incremento en la retardación; la serie alterna decrecerá por la disminución en la retardación. Cuando el rayo lento de la lámina accesoria es paralelo al rayo lento de la figura de interferencia, tiene lugar un incremento de la retardación, y viceversa. Si la retardación aumenta paralelamente al rayo lento de la figura de interferencia, el mineral es positivo; si disminuye, es negativo. El desplazamiento de las bandas de color se explica en la Figura 6-8. En los cuadrantes 1 y 3 las bandas de color se mueven hacia el centro, en los 2 y 4 se alejan de éste; los cuadrantes 1 y 3 presentan un aumento en retardación, mientras que los 2 y 4 tienen una disminución. En este ejemplo, el rayo lento de la lámina de mica es paralelo a los cuadrantes 1 y 3.

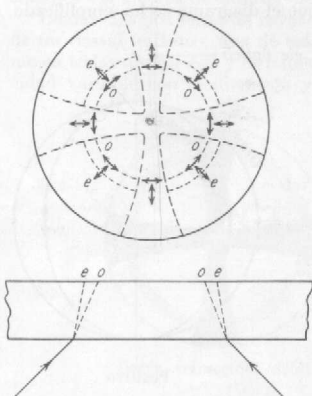


FIG. 6-7. Direcciones de vibración en una figura de interferencia uniaxial positiva. *o* = rayo rápido (menos refractado); *e* = rayo lento (más refractado). Velocidad de *o* = $1/n_o$; velocidad de *e* = $1/n_e$.

En la Figura 6-9, las direcciones rápida y lenta para una lámina de mica están indicadas en cuatro posiciones alrededor del campo circular. El rayo ordinario y el extraordinario permanecen en planos a 45° . La cruz de interferencia llega a ser blanca con una lámina de mica de $\frac{1}{4}\lambda$.

En cada accesorio está marcada la dirección del rayo lento (*slow ray*). Si se coloca una lámina de mica con su rayo lento en la posición 1-3, la retardación del rayo extraordinario en los cuadrantes 1-3 debe ser reforzada. Al mismo tiempo, tendrá lugar un efecto sustractivo en los cuadrantes 2-4. Las bandas de color de la figura de interferencia estarán desplazadas por esta superposición. Donde tiene lugar el reforzamiento, las bandas se mueven hacia el centro del círculo; donde tiene lugar la sustracción, las bandas se mueven en dirección opuesta.

En los minerales ópticamente positivos, la sustracción tiene lugar a ángulo recto con la dirección del rayo lento del accesorio. En los minerales negativos, la sustracción corresponde a los cuadrantes situados a lo largo de la dirección del rayo lento.

Cuando se intercala una lámina de mica, la disminución en la retardación produce a menudo dos puntos negros en cuadrantes alternos del centro de una figura de interferencia. En los minerales uniaxiales positivos, la dirección de los dos puntos forma un «más» con la dirección de vibración del rayo lento en la lámina de mica. Esta relación es empírica e indicativa, pero sirve como clave para recordar las direcciones de vibración de los rayos rápido y lento en los cristales uniaxiales (Figura 6-10).

Si el mineral tiene una fuerte doble refracción, la lámina de yeso puede

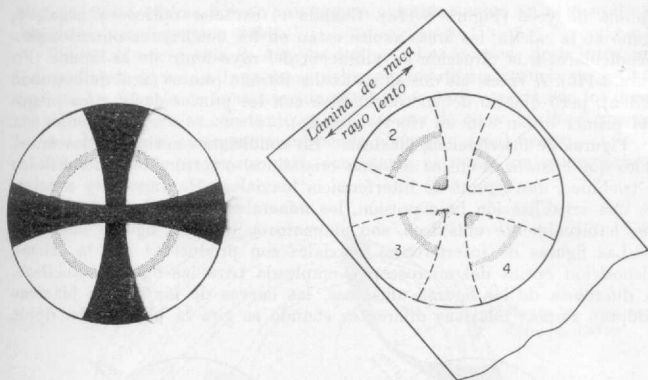


FIG. 6-8. Determinación del signo óptico en un mineral uniáxico positivo.

resultar más útil que la de mica en la determinación del carácter óptico de un mineral uniáxico. Con la lámina de yeso, se forman a menudo dos áreas azules brillantes en cuadrantes opuestos de las figuras de interferencia. Estas áreas resaltan particularmente en las figuras dadas por mi-

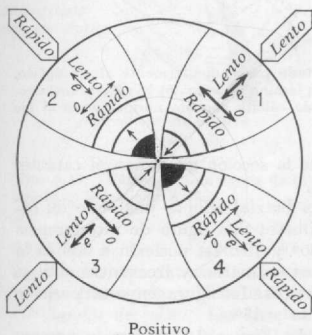


FIG. 6-9. Direcciones de vibración en la lámina accesoria y en el mineral para una figura uniáxica positiva.

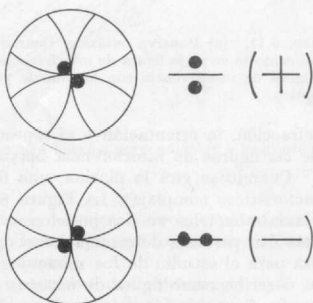


FIG. 6-10. Clave para las figuras de interferencia uniáxicas.

nerales de doble refracción moderada o intermedia. Cuando el carácter óptico es positivo, como en el caso del cuarzo, las dos áreas azules tienen lugar en cuadrantes opuestos paralelos a la dirección de vibración de la

lámina de yeso (Figura 6-11a). Cuando el carácter óptico es negativo, como en la calcita, las áreas azules están en los cuadrantes opuestos perpendiculares a la dirección de vibración del rayo lento de la lámina (Figura 6-11b). A veces, las dos zonas azules forman puntos (azul del segundo orden), pero que no deben confundirse con los puntos de la mica (negro del primer orden con un ribete azulado).

Figuras de interferencia biáxicas. En condiciones normales, los minerales que cristalizan en los sistemas cristalinos, ortorrómbico, monoclinico y triclínico, dan figuras de interferencia biaxiales. Raramente, y a causa de una cristalización bajo presión, los minerales exagonales y tetragonales, habitualmente uniáxicos, son anómalos y originan figuras biaxiales.

Las figuras de interferencia biaxiales son producidas por la misma disposición óptica del microscopio, empleada para las figuras uniáxicas. A diferencia de las figuras uniáxicas, las curvas de las figuras biáxicas adoptan formas relativas diferentes cuando se gira la platina. La doble

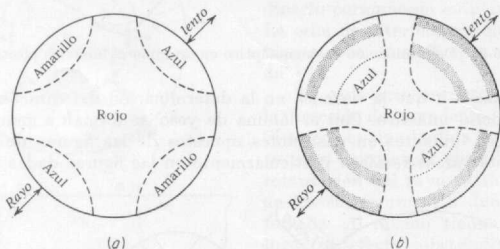


FIG. 6-11. (a) Positivo uniáxico. Cuarzo cortado perpendicularmente al eje óptico, tal como se ve en la figura de interferencia con lámina de yeso. (b) Negativo uniáxico. Figura de interferencia con lámina de yeso de calcita cortada normalmente al eje óptico.

refracción, la orientación y el espesor de la sección gobiernan el carácter de las figuras de interferencia biaxiales.

Cuando se gira la platina, una figura biaxial adopta una serie de características complejas. La Figura 6-3 ilustra una figura de interferencia biaxial simétrica en dos posiciones, a 90° y 45° . La posición a 45° es la más útil para las determinaciones ópticas ordinarias y frecuentemente se usa para el estudio de los minerales biáxicos. La figura en esta posición se describe como figura de *bisectriz aguda* a 45° .

La figura de bisectriz aguda a 45° . La Figura 6-12 indica la nomenclatura de las partes de una figura de bisectriz aguda a 45° . Las diversas características pueden describirse como sigue:

Isógiras. Las dos curvas anchas oscuras, o escobillas, que marcan las áreas de extinción, se conocen por isógiras. La fuerte dispersión origina ribetes rojos y azules en los márgenes de las isógiras. Observando la distribución de las franjas de color en la figura de interferencia es posible determinar el carácter de la dispersión. En los minerales que tienen fuerte

dispersión, las curvas no son tan negras o nítidas como en el caso de los minerales con dispersión débil.

Puntos de emergencia de los ejes ópticos. Los vértices de las dos curvas en forma de media luna marcan los puntos de emergencia de los ejes ópticos. La cuantía de la separación entre estos puntos varía con los diversos minerales, pero es constante para cada uno de ellos. La línea que une los dos puntos de emergencia subtiende el ángulo axial óptico.

Johannsen ha propuesto para denominar al punto de emergencia la palabra *melatopo*.

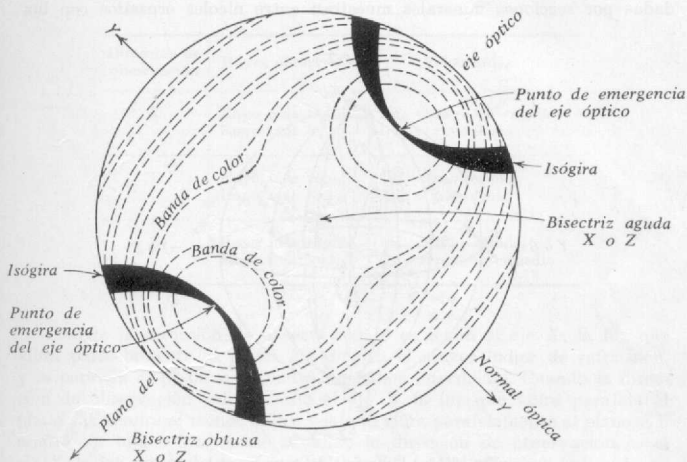


FIG. 6-12. Partes de una figura de interferencia biáxica perpendicular a la bisectriz aguda en la posición a 45° .

Plano de los ejes ópticos. El plano de los ejes ópticos, o plano axial, incluye los dos puntos de emergencia de los ejes ópticos, la dirección de la bisectriz aguda y la de la bisectriz obtusa.

Bandas de color. Las bandas de los colores de interferencia, que representan posiciones de igual retardación, están distribuidas en curvas simétricas alrededor de los puntos de emergencia de los ejes ópticos y se llaman *curvas isocromáticas*.

X, Y y Z. Los tres ejes X, Y y Z están distribuidos en la figura de interferencia tal como se ve en el diagrama. Y es normal al plano de los ejes ópticos. Si la bisectriz aguda es X, la obtusa lo es Z, y viceversa.

Normal óptica. La dirección perpendicular al plano de los ejes ópticos se conoce como normal óptica; es el eje Y.

Figuras biaxiales excéntricas. Dado que los minerales biáxicos, observados en secciones delgadas, pueden estar cortados, según un ángulo cualquiera, se tiene una gran variedad de modificaciones de las figuras de interferencia biaxiales. En una figura, una sola isógira puede oscilar a través del campo; otra, puede dar un eje óptico; otra, mostrar la bisectriz aguda, etc. Las más útiles para la determinación óptica de las propiedades de los minerales son o las de la bisectriz aguda o las del eje óptico. En las figuras de eje óptico (ver Figura 6-24) el lado convexo de la isógira, en la posición a 45° , indica la dirección de la bisectriz aguda.

Las figuras de eje óptico, y en mayor grado las de bisectriz aguda, dadas por secciones minerales muestran entre nicoles cruzados con luz

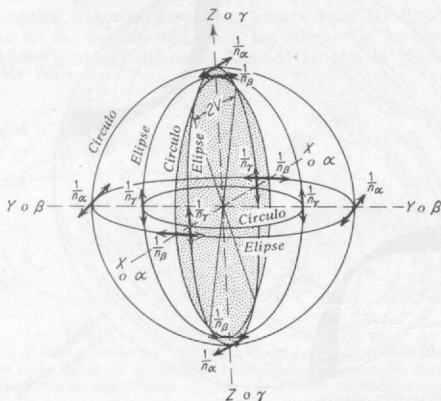


FIG. 6-13. Superficie del rayo biaxial.

paralela colores de, comparativamente, bajo orden. El examen de un cierto número de cristales de orientación variada, revelará el mineral a menudo más rápidamente que las figuras de interferencia de orientación conveniente con luz convergente.

Direcciones ópticas en los minerales biáxicos. En todos los minerales biáxicos, es posible orientar convenientemente las diversas características ópticas refiriéndolas a tres ejes, X , Y y Z , perpendiculares entre sí (Figura 6-13). X , Y y Z indican la facilidad de vibración de la luz en el mineral: la luz que viaja normalmente a X , vibra paralelamente a este eje y tiene la máxima velocidad correspondiente al mineral, $1/n_\alpha$; la que se desplaza normal a Z , vibra paralela al eje y tiene la velocidad mínima para el mineral, $1/n_\gamma$. El eje Y es perpendicular al plano de los ejes X y Z ; la luz que se mueve perpendicularmente a él, vibra paralelamente al eje Y y tiene una velocidad intermedia, $1/n_\beta$.

Para un mineral determinado, la luz que vibra paralelamente a X formará el rayo rápido, la que lo hace paralelamente a Z es el rayo lento y la paralela a Y tendrá velocidad intermedia. De esta manera, cuando la dirección de observación sea, según el eje X , XZ indicará el rayo lento y XY el intermedio. De la misma manera, cuando la dirección de observación sea el eje Z , ZX será el rayo rápido y ZY el intermedio. Y cuando la dirección sea el eje Y , YX será el rayo rápido e YZ el lento.

Las direcciones que corresponden a los rayos rápido y lento para las distintas direcciones de observación a lo largo de los ejes se indican en la tabla siguiente:

Dirección de observación	Rayos observados	Velocidades
X	Rayo más rápido Rayo más lento	$1/n_\beta$ = rayo intermedio $1/n_\gamma$ = rayo lento
Y	Rayo más rápido Rayo más lento	$1/n_\alpha$ = rayo rápido $1/n_\gamma$ = rayo lento
Z	Rayo más rápido Rayo más lento	$1/n_\alpha$ = rayo rápido $1/n_\beta$ = rayo intermedio

Cuando la dirección de observación lo es según el eje X , la luz que vibra paralelamente al plano XZ tendrá el mayor índice de refracción, y la paralela al plano XY tendrá un índice intermedio. Cuando la dirección de observación coincide con el eje Z , la luz que vibra paralela al plano ZX tendrá el menor índice y la que vibra paralelamente al plano ZY tendrá un índice intermedio. Cuando la dirección de observación es el eje Y , la luz vibrando paralela al plano YX tendrá el menor índice de refracción y la que lo haga paralela al YZ tendrá el mayor ^{ángulo} índice de refracción.

Dentro de ciertos límites, los ejes X , Y y Z toman en los minerales posiciones que dependen del sistema de cristalización. En los minerales rómbicos, X , Y y Z están fijados con respecto a los ejes cristalográficos a , b y c . En el sistema monoclinico, uno de los tres ejes (a menudo el Y) coincide con el eje cristalográfico b . En el sistema triclinico no hay limitaciones de posición respecto a los ejes cristalográficos.

En los minerales biáxicos cabe representar las direcciones ópticas de varios modos. Uno de los artificios más generalmente empleados es el de los rayos superficiales de la Figura 6-13. Otro, es el elipsoide índice de la Figura 6-16. Los rayos superficiales se colocan sobre X , Y y Z perpendicularmente entre sí. Puede desarrollarse el elipsoide índice (indicatriz óptica) sobre los mismos ejes pero, convencionalmente, se usan generalmente α , β y γ en lugar de X , Y y Z . La tabla siguiente proporciona una comparación de los dos sistemas de representación:

COMPARACIÓN ENTRE EL RAYO SUPERFICIAL BIAIXIAL Y EL ELIPSOIDE INDICE

Características	Distancia del centro a la superficie	
	Rayo superficial biaxial	Elipsoide índice
Direcciones axiales:		
Velocidad mínima.....	Z	γ
Velocidad máxima.....	X	α
Perpendicular.....	Y	β
Semieje mayor.....	$1/n_{\alpha}$ y $1/n_{\beta}$	n_{γ}
Semieje intermedio.....	$1/n_{\alpha}$ y $1/n_{\gamma}$	n_{β}
Semieje menor.....	$1/n_{\gamma}$ y $1/n_{\beta}$	n_{α}
Ejes ópticos.....	Ejes ópticos secundarios o birradiales	Ejes ópticos primarios o binormales
Superficie.....	Doble	Simple

En la Figura 6-14 se muestra la relación entre las direcciones de fácil vibración, ya se designen por X, Y y Z o por α , β y γ , con las figuras de interferencia biaxiales de distintos signos.

Supongamos una masa cristalina de un cristal biaxial de suficiente tamaño para impedir el examen de la variación de la luz en el sistema. Si la luz irradia desde el centro de un tal medio anisótropo, el frente de onda originado tendrá una superficie doble con secciones semejantes a las de la Figura 6-13. El eje óptico estará situado en el plano de X y Z y el ángulo agudo $2V$ entre los ejes ópticos variará entre 0 y 90° .

Se dice que el mineral es ópticamente positivo cuando el eje Z es la bisectriz del ángulo agudo formado por los ejes ópticos. Y se dice que es negativo si el eje X es la bisectriz aguda.

En cada sección según los ejes aparecen dos frentes de ondas: el uno un círculo, el otro una elipse. El tamaño de cada círculo está determinado por la velocidad del rayo de luz que vibra paralelamente al eje a cuyo alrededor se ha engendrado el círculo. Alrededor de X, el radio del círculo es $1/n_{\alpha}$; alrededor de Y, es $1/n_{\beta}$; y $1/n_{\gamma}$, alrededor de Z. Dado que n_{α} es el menor índice de refracción y $1/n_{\alpha}$ representa a la velocidad máxima del sistema, el círculo que está alrededor de X es el de mayor diámetro. Y como $1/n_{\beta}$ es la velocidad intermedia, el círculo alrededor de Y tiene un tamaño intermedio. Y el círculo que está alrededor de Z es menor que los otros círculos correspondientes a los demás ejes ya que $1/n_{\gamma}$ representa la mínima velocidad. Se han dibujado en la figura tres combinaciones de elipse y círculo: en la sección perpendicular a Y, plano XZ, el círculo de radio $1/n_{\beta}$ corta a la elipse de semiejes mayor y menor $1/n_{\alpha}$ y $1/n_{\gamma}$ respectivamente; en la sección perpendicular a Z, plano XY, el círculo menor, de radio $1/n_{\gamma}$, permanece interior a la elipse de semiejes $1/n_{\alpha}$ y $1/n_{\beta}$; en la sección perpendicular a X, plano YZ, el círculo mayor de radio $1/n_{\alpha}$ es exterior a la elipse de semiejes mayor y menor, respectivamente, $1/n_{\beta}$ y $1/n_{\gamma}$.

La luz que vibra paralelamente a Z, irradiada desde el centro en el

plano XY , tendrá un frente de onda circular y una velocidad $1/n_\gamma$. De modo similar, la luz que vibra paralela a X se desplazará en el plano YZ con un frente de onda circular y velocidad $1/n_\alpha$. Así mismo, la luz que vibra paralelamente a Y viajará en el plano XZ con un frente de onda circular y una velocidad de $1/n_\beta$. En cada uno de estos casos, n_α , n_β y n_γ representan respectivamente el menor, el intermedio y el mayor índice de refracción del mineral.

Los planos XY , YZ y ZX son especialmente significativos. En la Figura 6-15, a , b y c , se indican secciones según estos planos.

En el plano XZ el círculo y la elipse se cortan en cuatro puntos, en los que no existe diferencia en la longitud de onda. Estos puntos de intersección marcan la posición de los *ejes ópticos secundarios* o *birradiales*. En la mayoría de los cristales, estos ejes ópticos secundarios están muy próximos a los *ejes ópticos primarios*, pero no se identifican con ellos.

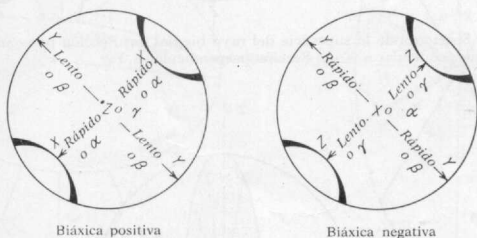


Fig. 6-14. Direcciones de fácil vibración X , Y y Z o α , β y γ , con referencia a las figuras de interferencia biaxiales positiva y negativa. También se indican las correspondientes direcciones del rayo rápido y del lento.

Elipsoide índice (Indicatriz óptica). Es conveniente representar las relaciones ópticas de los cristales rómbicos, monoclinicos y triclinicos mediante el *elipsoide índice* o *indicatriz óptica* (Figura 6-16). Geométricamente, la figura es un elipsoide triaxial. El origen está situado en el centro del elipsoide, los ejes coordenados son sus ejes y los planos coordenados, los planos principales.

Se ha asignado a los semiejes del elipsoide los valores de los índices de refracción n_α , n_β y n_γ . Las *secciones principales* son cualquier combinación cuyo plano contenga dos ejes. Estas secciones son elipses y tienen como semieje mayor y menor un par de los valores de n_α , n_β y n_γ .

Con excepción de dos secciones circulares, toda sección plana que pase por el centro del elipsoide será elipse (Figura 6-17). Las dos secciones circulares contienen el semieje de longitud n_β ; por lo tanto, el radio de estas secciones circulares tendrá una longitud de n_β . Las direcciones perpendiculares a las dos secciones circulares se llaman *ejes ópticos* o *binormales*. A veces, se conocen por *ejes ópticos primarios* y difieren ligeramente de los ejes ópticos secundarios (birradiales) de la superficie de onda biaxial.

Pueden determinarse en un elipsoide triaxial, tal como se ve en la Figura 6-18, las propiedades ópticas de los rayos luminosos en cualquier dirección dada. Los semiejes son n_α , n_β y n_γ , respectivamente, y $S'S$ representa la dirección de propagación de la luz a lo largo de una línea deter-

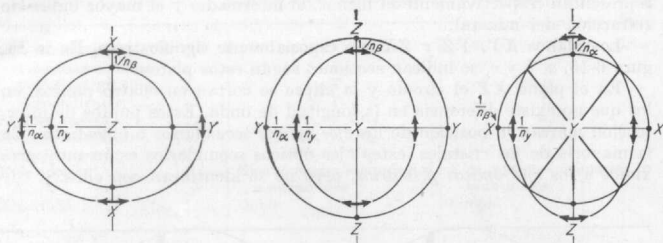


FIG. 6-15. Secciones de la superficie del rayo biaxial. (a) Sección perpendicular a Z . (b) Sección perpendicular a X . (c) Sección perpendicular a Y .

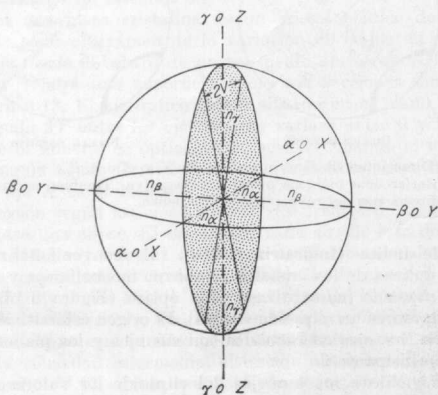


FIG. 6-16. Elipsoide índice para los cristales biáxicos.

minada. Si se conoce la dirección de $S'S$, pueden deducirse por construcción geométrica las siguientes parejas de propiedades ópticas:

1. Direcciones de vibración de los dos rayos que se desplazan a lo largo de $S'S$.
2. Los dos índices de refracción correspondientes, n_2 y n_1 .
3. Las direcciones de las dos ondas normales.

Si se conoce la dirección del diámetro $S'S$, puede conocerse también la posición de los planos tangentes a $S'S$ en los dos extremos del diámetro. Es entonces posible trazar un plano diametral paralelo por el centro del elipsoide y equidistante de los dos planos tangentes. Este plano diametral cortará según una sección elíptica en todas, excepto dos, las posiciones de $S'S$. Estas secciones elípticas proporcionan dimensiones de las que pueden deducirse las propiedades ópticas. El plano diametral tendrá un eje mayor y otro menor, los cuales marcarán las direcciones de vibración de los dos

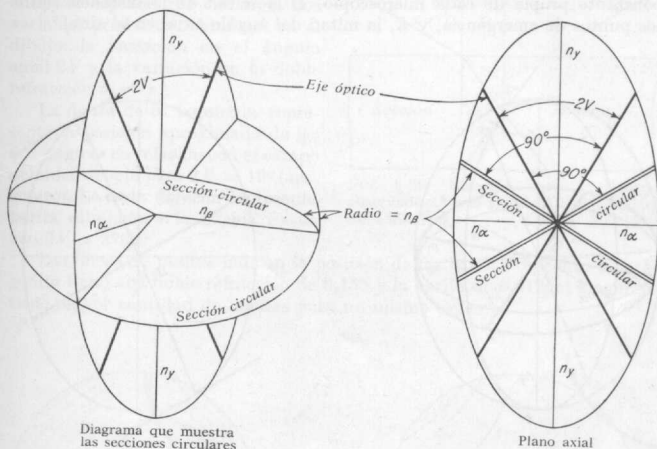


FIG 6-17. Relación entre las dos secciones circulares, los ejes ópticos y los ejes del elipsoide (n_α , n_β y n_γ) en el elipsoide índice.

rayos que se desplazan según $S'S$. Los radios mayor y menor representan los índices de refracción de las ondas asociadas con estos dos rayos, que serán n_2 y n_1 . La normal a la onda correspondiente al rayo que se propaga a lo largo de $S'S$ y vibra según el eje mayor está situado en un plano que contiene a $S'S$ y al eje mayor y es perpendicular a dicho eje. De modo semejante, la normal a la onda correspondiente al rayo que desplaza sobre $S'S$ y vibra a lo largo del eje menor está en un plano que contiene a $S'S$ y dicho eje menor y es normal a éste.

En la Figura 6-19 se ve una sección que contiene a SOS' y a $n_2 - n_2$. En la 6-18 puede visualizarse otra sección similar que incluye a SOS' y a $n_1 - n_1$.

Sea $P_2 - O_2$ una perpendicular trazada desde la intersección de $n_2 - n_2$ con la circunferencia de elipse. El recíproco $1/P_2O_2$ representa la velocidad del rayo que se propaga a lo largo de la línea SOS' y vibra según el eje $n_2 - n_2$. De una manera similar, el recíproco $1/P_1O_1$ representa la velo-

cidad del rayo propagado a lo largo de SOS' y vibrando según el eje P_1O_1 (Figura 6-18)¹.

Los ángulos axiales $2E$ y $2V$. El ángulo axial observado es mayor que el verdadero ángulo axial del mineral. Esto es debido a la refracción de los rayos oblicuos, tal como se ve en la Figura 6-20. El ángulo $2E$ es el ángulo en el aire, mientras que $2V$ es el ángulo interno.

Para determinar con el microscopio el ángulo axial aproximado puede usarse la ecuación de Mallard ($D = K \text{ sen } E$). En esta ecuación, K es una constante propia de cada microscopio, D la mitad de la distancia entre los puntos de emergencia, y E , la mitad del ángulo axial en el aire.

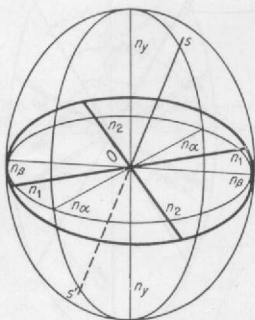


FIG. 6-18. Un rayo OS en un elipsoide índice con un plano conjugado a través de O y las paralelas a los planos tangentes en S y S' .

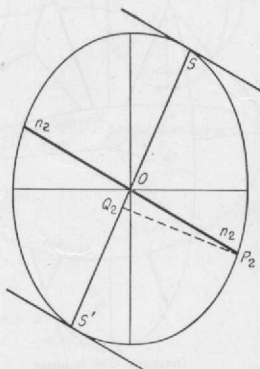


FIG. 6-19. Sección de un elipsoide mostrando el rayo OS junto con las trazas de los planos tangente y diametral.

La determinación del ángulo axial de un mineral a partir del ángulo axial observado en el aire se logra por la fórmula:

$$\text{sen } E = n_{\beta} \text{ sen } V$$

Cuando $n \text{ sen } V$ es igual a 1, el ángulo $2E$ resulta 180° y no puede medirse el ángulo axial. El valor de cualquier ángulo observado puede reducirse a dimensiones mensurables mediante la inmersión del objetivo en un aceite de índice de refracción conocido.

Para medir los ángulos axiales grandes es preciso un artificio de rotación especial. Tal artificio, para girar los cristales en un círculo vertical,

¹ La discusión anterior está ampliamente basada en el artículo del Dr. George Tunell «The Ray Surface, the Optical Indicatrix, and Their Interrelation» (*Wash. Acad. Sci.*, vol. 23, p. 235, 1933).

puede adaptarse a la platina del microscopio; de lo contrario deben emplearse aparatos especiales.

Variaciones en el ángulo axial. La Figura 6-21 muestra dos figuras de interferencia biaxiales en posición a 45° . La figura de la izquierda corresponde al aragonito y la de la derecha a la barita. Las secciones han sido cortadas normales a la bisectriz aguda y tienen aproximadamente el mismo espesor. Sin embargo, dos variables producen diferencias en el dibujo: la variación en el ángulo axial $2V$ y la variación en la doble refracción $n_2 - n_1$.

La figura de la izquierda representa la posición aproximada de las dos isóginas en relación con el campo del microscopio para $2V = 19^\circ$ (aragonito). La de la derecha representa barita dibujada a la misma escala con $2V = 37^\circ 30'$.

Las líneas de puntos indican la posición de las bandas de color. El aragonito tiene una doble refracción de 0,155 y la barita de 0,012; el aragonito tiene mayor cantidad de bandas para un mismo espesor.

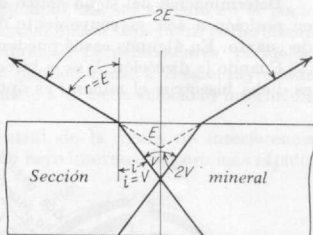


FIG. 6-20. Relación entre el ángulo observado $2E$ y el ángulo $2V$ en los minerales biaxiales.

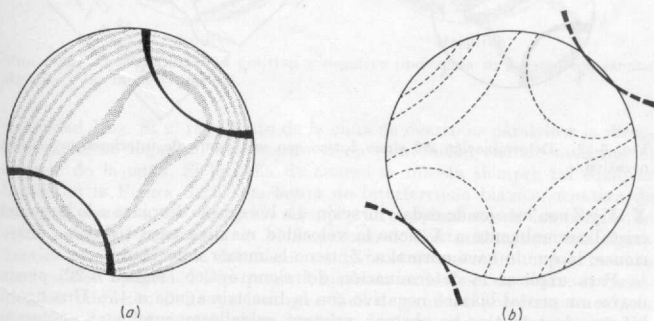


FIG. 6-21. Comparación de los ángulos axiales.

(a) Aragonito
 $2V = 19^\circ$
 $n_\gamma - n_\alpha = 0,155$

(b) Barita
 $2V = 37^\circ 30'$
 $n_\gamma - n_\alpha = 0,012$

Suele ser útil reunir en un libro de notas la posición relativa de las isóginas para ángulos próximos a 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° y 40° . Tal recordatorio ayuda a determinar el ángulo axial de cualquier mineral

desconocido. Los gráficos E, F y G de la Tabla 10-10 dan los valores correspondientes a los minerales comunes.

Conviene recordar que, permaneciendo constante el espesor, el número de bandas de color de la figura de interferencia aumenta o disminuye con el incremento o la disminución de la doble refracción.

Determinación del signo óptico de un mineral biáxico. Con el mineral en posición a 45° , es conveniente determinar el signo óptico con la cuña de cuarzo. En algunos casos pueden preferirse las láminas de mica o yeso.

Cuando la dirección X es la bisectriz aguda, el mineral es negativo, si Z es dicha bisectriz, el mineral es ópticamente positivo. Como se estableció,

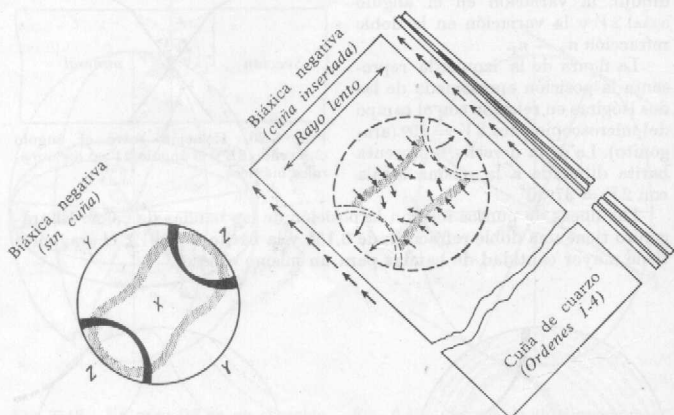


FIG. 6-22. Determinación del signo óptico con una figura de interferencia biáxica negativa.

X, Y y Z son los ejes de cada vibración. La luz que se desplaza a lo largo del cristal normalmente a X tiene la velocidad máxima para todas las direcciones; la que lo hace normal a Z, tiene la menor velocidad.

Para explicar la determinación del signo óptico (Figura 6-22) puede usarse un cristal biáxico negativo con la bisectriz aguda a 45° . Una figura biáxica de este tipo se observa primero cuidadosamente para anotar la posición de las bandas de color tanto en el área central como dentro de las dos pequeñas áreas incluidas en la porción cóncava de la isógira. Después, se inserta la cuña de cuarzo en la ranura accesoria con su rayo lento paralelo al plano axial. Cuando se intercala esta cuña, tiene lugar un desplazamiento de las bandas de color.

El desplazamiento de las bandas de color en un mineral negativo es el indicado por las flechas de la Figura 6-22. Como la cuña aumentó el espesor, las bandas de color en el área central se mueven hacia los dos «ojos», o



melátapos, de la figura de interferencia. Al mismo tiempo, las bandas de los lados opuestos de las isógiras, dentro de las dos pequeñas áreas, se desplazan alejándose de los melátapos. Cuando se quita la cuña el movimiento es inverso. En el caso de que se sustituya el cristal por otro positivo, el movimiento también es inverso.

En el cristal negativo biaxial del ejemplo, Z está situado en el plano axial, X es la bisectriz aguda, e Y la normal óptica. Dos rayos se desplazan a lo largo de X con direcciones de vibración perpendiculares, paralelos, respectivamente, a Z e Y . El que vibra paralelamente a Z es el rayo lento para el cristal de velocidad $1/n_\gamma$; el paralelo a Y tiene velocidad intermedia de valor $1/n_\beta$.

Dos rayos emergen en la zona central de la figura de interferencia en X ; un rayo lento, velocidad $1/n_\gamma$, y un rayo intermedio, pero más rápido,

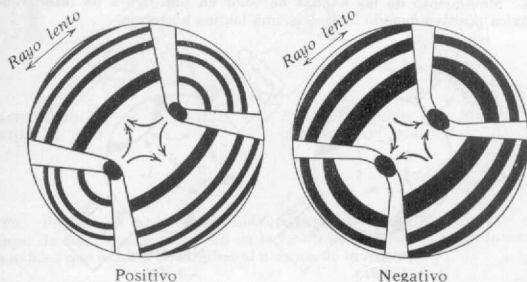


FIG. 6-23. Cristales biaxiales positivo y negativo (indicando su aspecto con lámina de mica y luz monocromática).

velocidad $1/n_\beta$. Si el rayo lento de la cuña de cuarzo es paralelo a la dirección Z , tiene lugar un incremento en la retardación cuando aumenta el espesor de la cuña. Si la cuña de cuarzo se inserta siempre tal como se indica en la Figura 6-22, una figura de interferencia biaxial negativa de bisectriz aguda a 45° , mostrará siempre un movimiento de las bandas de color hacia los melátapos en el área central. Contrariamente, una figura biaxial positiva tratada del mismo modo mostrará siempre un movimiento en dirección opuesta. Dado que está marcada en la cuña de cuarzo la dirección de vibración del rayo lento, es fácil determinar por comparación la dirección de vibración del rayo lento en la figura de interferencia. En la Figura 6-23 se indican las direcciones de movimiento para figuras de interferencia biaxiales positivas y negativas con luz monocromática con respecto a la dirección de vibración del rayo lento en una lámina accesoria superpuesta.

La figura eje óptico. Las figuras de interferencia originadas en secciones cortadas normalmente, o casi normalmente, a uno de los dos ejes ópticos de un mineral biaxial, son útiles para determinar el signo óptico. Tales secciones producen figuras de interferencia con solo una isógrafa en el campo

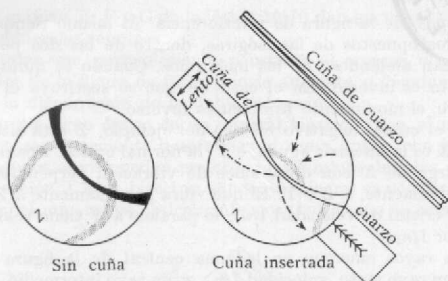


FIG. 6-24. Movimiento de las bandas de color en una figura de interferencia eje-
óptico biáxica positiva cuando se inserta una lámina accesoria.

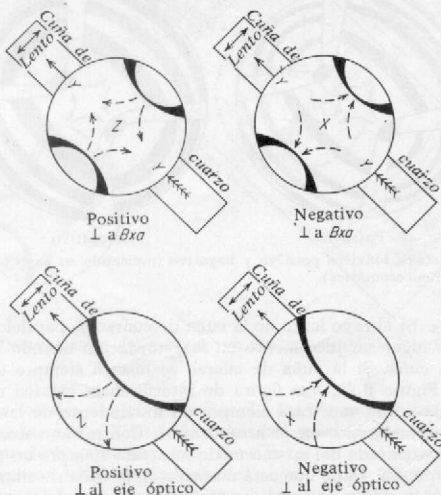


FIG. 6-25. Movimiento de las bandas de color tal como se ve cuando se inserta la
cuña de cuarzo en figuras de interferencia de signo opuesto según la bisectriz aguda y
el eje óptico.

visual. El melátipo, o punto de emergencia, puede coincidir con el eje del
microscopio o estar ligeramente alejado del centro.

Cuando se gira la platina, la isógira barre el campo permaneciendo
centrada, o casi centrada, según la excentricidad de la sección. Las bandas
de color están dispuestas casi circularmente alrededor del melátipo y
varían en retardación con la doble refracción.

La curvatura de la isógira decrece con el incremento de $2V$. Cuando el ángulo axial es grande —por ejemplo, próximo a 90° — la isógira es recta y el lado de la figura de interferencia correspondiente a la bisectriz aguda llega a ser indistinguible del lado de la bisectriz obtusa. Sin embargo,

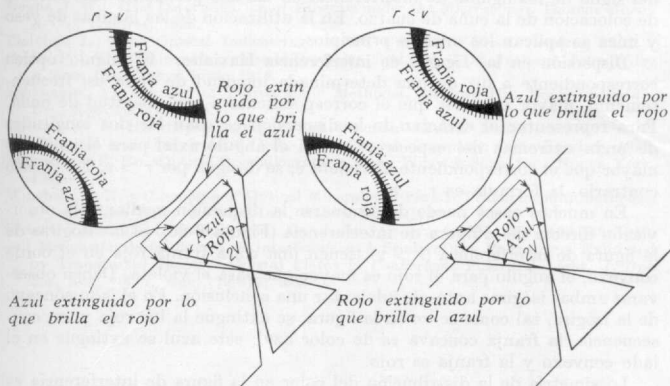


FIG. 6-26. Figuras de interferencia biaxial explicando la dispersión $r > v$ y $r < v$. Las franjas de color que se observan en la figura de interferencia son inversas de los ángulos axiales que existen en el mineral a causa de la extinción.

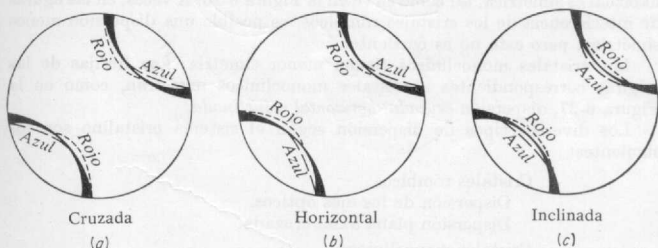


FIG. 6-27. Franjas de dispersión en los cristales monoclinicos. (a) Dispersión cruzada. (b) Dispersión horizontal. (c) Dispersión inclinada.

cuando el ángulo es pequeño, la isógira está claramente curvada en forma de media luna.

Las figuras, según el eje óptico, que muestren siquiera una débil curvatura, son útiles para determinaciones del signo óptico. Pueden emplearse la lámina de mica, la de yeso o la cuña de cuarzo dependiendo el empleo de una u otra de la doble refracción del mineral. El efecto de la cuña de cuarzo sobre una figura de interferencia eje-óptico biaxial positiva, se ve en la

Figura 6-24. A un lado del dibujo, se indica una figura eje-óptico sin cuña de cuarzo insertada y, al lado opuesto, se muestra el movimiento de las bandas de color originado por la inserción de la cuña.

Los diagramas de la Figura 6-25 pueden ser útiles para la determinación del signo de las figuras de interferencia en las dos posiciones más eficaces de colocación de la cuña de cuarzo. En la utilización de las láminas de yeso y mica se aplican los mismos principios.

Dispersión en las figuras de interferencia biaxiales. El ángulo óptico correspondiente a luz de una determinada longitud de onda es, frecuentemente, mayor o menor que el correspondiente a otra longitud de onda. Para representar el carácter de la dispersión se usan las dos longitudes de onda extremas del espectro. Así, si el ángulo axial para el rojo r es mayor que el correspondiente al violeta v , se designa por $r > v$. En el caso contrario, la fórmula es $r < v$.

En muchos casos puede determinarse la dispersión mediante la observación directa de la figura de interferencia (Figura 6-26). Si las isógiras de la figura de interferencia ($r > v$) tienen una clara franja roja en el borde convexo, el ángulo para el rojo es mayor que para el violeta. Deben observarse ambas isógiras antes de adelantar una conclusión. En el lado cóncavo de la isógira, tal como se ve en la figura, se extingue la luz roja y, en consecuencia, la franja cóncava es de color azul; este azul se extingue en el lado convexo y la franja es roja.

La simetría de la distribución del color en la figura de interferencia es un reflejo de la simetría del cristal. Conviene recordar que los elementos de simetría de los cristales rómbicos comprenden ejes de doble simetría, planos de simetría y centro de simetría. Aquí, la figura de interferencia habitual es simétrica, tal como se ve en la Figura 6-26. A veces, en las figuras de interferencia de los cristales rómbicos, es posible una dispersión menos simétrica, pero esto no es corriente.

Los cristales monoclinicos tienen menor simetría. Las franjas de las isógiras correspondientes a cristales monoclinicos muestran, como en la Figura 6-27, dispersión *cruzada*, *horizontal* o *inclinada*.

Los diversos tipos de dispersión según el sistema cristalino son los siguientes:

Cristales rómbicos:

Dispersión de los ejes ópticos.

Dispersión plana axial cruzada.

Cristales monoclinicos:

Dispersión inclinada (ambas bisectrices).

Dispersión horizontal (bisectriz aguda).

Dispersión cruzada (bisectriz obtusa).

Cristales triclinicos:

Dispersión asimétrica.

Estos tipos se distinguen bien utilizando luz de varias longitudes de onda. Son convenientes filtros de color rojo y azul colocados frente al espejo del microscopio.

BIBLIOGRAFIA

- Buchwald, E.: «Einführung in die Kristalloptik», Sammlung Göschen, Berlin, 1912.
- Burri, C.: «Das Polarisations Mikroskop», E. Birkhäuser & Cie. A. G. Basel, 1950.
- Evans, J. W.: «The Determination of Minerals under the Microscope», Thomas Murby & Co., Londres, 1928.
- Fletcher, L.: «The Optical Indicatrix», Oxford University Press, Londres, 1892.
- Groth, P.: «The Optical Properties of Crystals», trad. por B. H. Jackson, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1910.
- Johannsen, A.: «Manual of Petrographic Methods», McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1918.
- Tutton, A. E. H.: «Crystallography and Practical Crystal Measurement», vol. 2: «Physical and Chemical», 2.^a ed., Macmillan & Company, Ltd., Londres, 1922.
- Wahlstrom, E. E.: «Optical Crystallography», John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1943.
- Winchell, A. N.: «Elements of Optical Mineralogy, Part I: Principles and Methods», 5.^a ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1937.
- Wright, F. E.: The Index Ellipsoid, *Am. J. Sci.*, 4.^a ser., vol. 35, págs. 133-138, 1913.
- : Formación de las figuras de interferencia: A Study of the Phenomena Exhibited by Transparent Inactive Crystal Plates in Convergent Polarized Light, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 7, págs. 779-817. 1923.

CAPITULO 7

La platina universal

Objeto. La platina universal (Figura 7-1) está proyectada de manera que se pueda inclinar el plano de una sección delgada formando diversos ángulos con la platina del microscopio, y contiene una serie de círculos graduados (Figura 7-2), que miden la posición angular de las secciones inclinadas. Este artificio ayuda en la determinación de la orientación óptica,

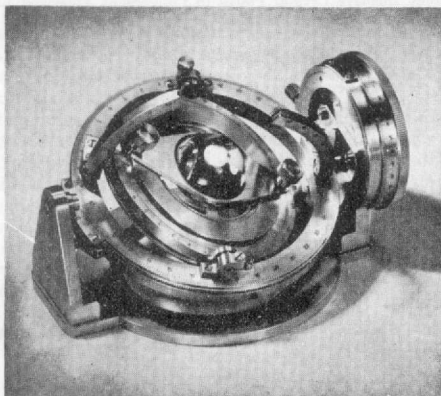


FIG. 7-1 Platina universal de cuatro ejes mostrando el hemisferio superior y los cuatro círculos graduados para las mediciones angulares. (E. Leitz, Inc.)

2 V, signo óptico, direcciones de pleocroísmo, dispersión, comparación de los índices refractivos y en el estudio de las maclas. Cuando se añade el control de la temperatura (Emmons, 1943) puede emplearse la platina en la determinación exacta de los índices de refracción de fragmentos minerales con montaje líquido. Se emplea también en el análisis de la orientación de los cristales para la interpretación de la estructura o «petrofábrica».

Conjunto de la platina. La platina universal está sujeta con tornillos a la del microscopio y el portaobjetos descansa sobre una placa circular de cristal situada en el centro. Existen dos hemisferios de cristal preparados

para hacer visible la sección delgada en diversos ángulos de inclinación; uno está colocado debajo de la lámina de cristal y el otro encima de la sección delgada. Se utilizan objetivos especiales para obtener imágenes a partir de la superficie curva del hemisferio superior, usándose aceite de cedro o glicerina para el contacto óptico encima y debajo de la sección delgada y, también, entre el hemisferio inferior y la placa de cristal. El microscopio polarizante que se utilice, debe proporcionar con una gran distancia de trabajo entre la platina y el objetivo y el área de rotación

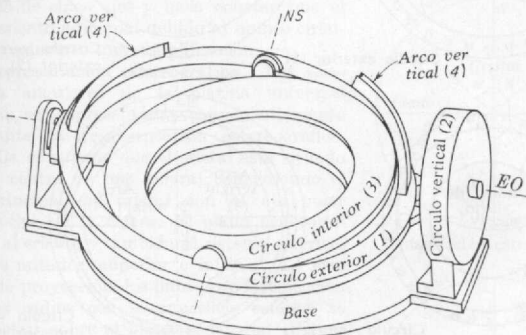


FIG. 7-2. Esquema de una platina universal de cuatro ejes; se indican los cuatro círculos graduados. Los ejes *OV* e *IV* son perpendiculares a los círculos (1) y (3), mientras que los ejes *NS* y *EO* están situados en los planos de los círculos interior y exterior.

horizontal ha de ser extensa; en general, solo son adecuados los microscopios de investigación.

Círculos graduados. En la platina universal ordinaria, de cuatro ejes, se efectúan las mediciones sobre cuatro círculos graduados, estando provista la platina del microscopio de un quinto círculo. El eje del microscopio permanece siempre en la misma posición vertical, que podemos designar por *Am*.

Los cuatro ejes móviles permanecen respectivamente perpendiculares a los cuatro círculos graduados (Figura 7-3) y pueden designarse por *OV* (normal al círculo exterior), *IV* (normal al círculo interior), *EO* (perpendicular al tambor circular) y *NS* (perpendicular a los arcos Wright). Cuando se dispone la platina con todos los círculos a cero, *OV* e *IV* son verticales, *EO* es horizontal (Este-Oeste) y *NS* es también horizontal (Norte-Sur).

El círculo exterior de la platina universal gira alrededor de *OV* y, en la posición cero, permanece en un plano horizontal. El círculo interior contiene el portaobjetos y los hemisferios, yace en un plano horizontal en la posición cero y gira alrededor de *IV*.

Este círculo exterior no solamente es libre para girar alrededor de *OV*,

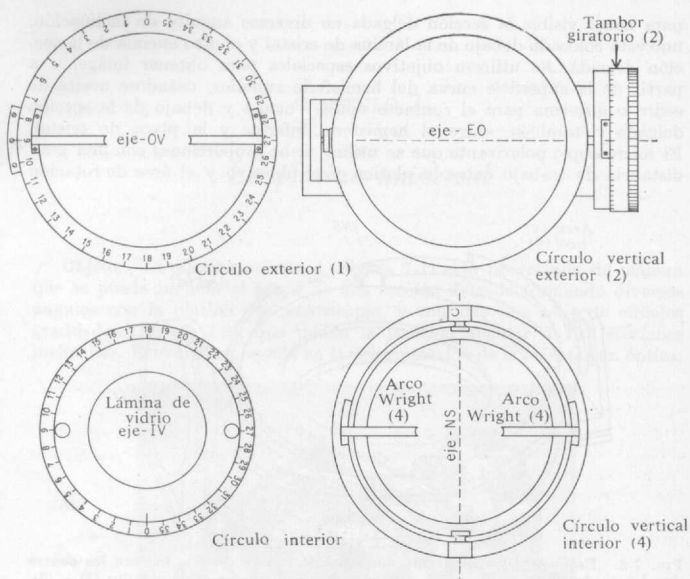


FIG. 7-3. Círculos graduados de una platina universal de cuatro ejes.

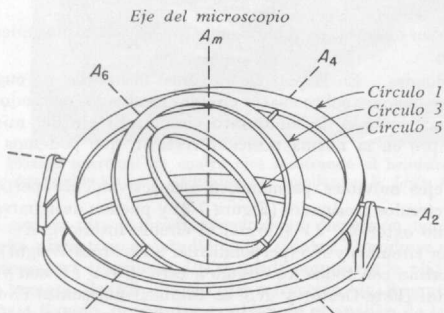


FIG. 7-4. Esquema de una platina universal de cinco ejes (según Emmens). Los ejes A_1 , A_2 y A_3 son perpendiculares a los planos de los círculos 1, 3 y 5. Los planos de los círculos están inclinados según los ejes A_4 , A_5 y A_6 .

sino que puede inclinarse a partir de la horizontal en cualquier dirección con respecto al eje *EO*. Los ángulos de inclinación se miden en un tambor graduado situado a un lado de la platina.

El círculo interior mide ángulos alrededor del eje *IV*; este círculo puede inclinarse girando sobre el eje *NS*. El ángulo de esta inclinación se mide en los dos arcos graduados Wright.

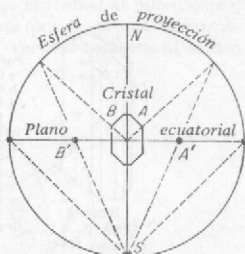
La platina universal de cinco ejes tiene un tercer círculo interior, tal como se ve en la Figura 7-4, que contiene al portaobjetos. Emmons (1943) recomienda la platina de cinco ejes y hace constar que el movimiento adicional debido al quinto círculo es realmente una simplificación.

Representación estereográfica. Las relaciones angulares de la platina universal pueden ser representadas convenientemente mediante la representación estereográfica. En ella se supone que el cristal está situado en el centro de una esfera; coincidiendo el eje principal del cristal con el eje polar Norte-Sur de la esfera. El plano ecuatorial corta al cristal, y también al sistema esférico, en dos mitades: superior e inferior. En este tipo de proyección, los puntos de intersección de los radios con la superficie esférica se proyectan sobre el plano ecuatorial (Figura 7-5), así se reduce una gran cantidad de mediciones angulares a circulares en una representación de dos dimensiones.

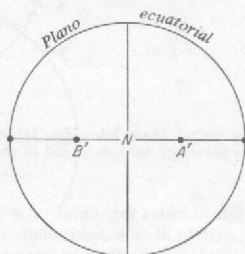
La proyección de una cara del cristal sobre el plano ecuatorial se consigue mediante dos operaciones: Se prolonga un radio normal a la cara del cristal hasta la superficie de la esfera y se traza una cuerda hasta el polo opuesto a la intersección de la normal con la superficie esférica; la intersección de esta cuerda con el plano ecuatorial es el punto de proyección esférica.

Cuando las caras son paralelas al eje polar Norte-Sur, el radio está situado en el círculo ecuatorial y las posiciones de las caras están representadas sobre la circunferencia. Cuando el radio de una cara coincide con el eje principal y está situado a lo largo del polo Norte-Sur, la cara se proyecta como un punto en el centro del plano ecuatorial.

Con respecto a la representación de las posiciones ópticas, cabe considerar a los ejes ópticos como radios faciales normales a unas caras imaginarias del cristal. De este modo, aparecerán como puntos en la representación estereográfica. Los arcos circulares que representan posiciones



Construcción estereográfica



Plano de proyec estereográfica

Fig. 7-5. Proyección de las caras *A* y *B* del cristal en *A'* y *B'* sobre el plano de proyección estereográfica. Las caras paralelas al eje vertical se proyectan sobre la circunferencia.

angulares se dibujan sobre la proyección formando la llamada red estereográfica. Cuando se conocen las relaciones angulares a partir de las medidas efectuadas con la platina universal, pueden dibujarse las diversas posiciones en la red estereográfica de la misma manera que se localizan la longitud y la latitud en un mapa; suele ser conveniente dibujar estas posiciones en una lámina transparente colocada encima de la red.

Las posiciones se indican a base de los ángulos ϕ (phi) y ρ (rho) (Figura 7-6). El ángulo ϕ se mide en el plano horizontal a partir del eje

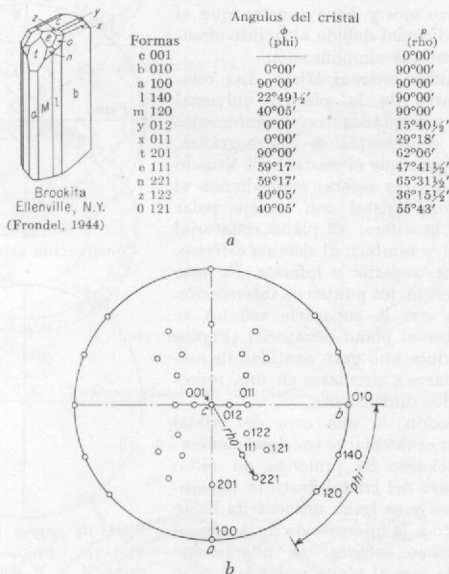


FIG. 7-6. Representación de un cristal de brookita con la correspondiente proyección estereográfica basada en los ángulos ϕ y ρ .

Este-Oeste en el sentido de las agujas del reloj. El ángulo ρ se mide sobre un plano vertical a partir del polo norte de la representación estereográfica.

La brookita proporciona uno de los ejemplos más claros de dispersión en los minerales y puede usarse para explicar la representación estereográfica. El plano óptico para el violeta está situado según (100), mientras que el mismo plano para el rojo es (001). Las direcciones ópticas indicadas en la Figura 7-7 pueden compararse, mediante la proyección estereográfica, con las relaciones geométricas del cristal (Figura 7-6). Las posiciones relativas de las direcciones ópticas pueden explicarse con la platina universal.

copio polarizante están alineados con la platina universal, el retículo Este-Oeste marcará de ordinario el plano del analizador y el Norte-Sur, el del polarizador. La inclinación de cada eje óptico, tal como se mide finalmente, dará lecturas angulares sobre los círculos graduados, las cuales pueden simplificarse a ϕ y ϱ y trazarse sobre una representación estereográfica (Figura 7-8).

Situación del eje óptico uniáxico. Las inclinaciones angulares de los ejes ópticos de los cristales uniáxicos pueden medirse como truncados por el plano de la sección delgada (Figura 7-9). La medida de ϕ y ϱ para un solo

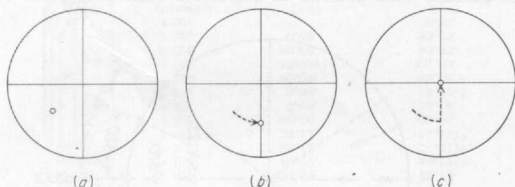


FIG. 7-8. Proyección estereográfica mostrando los pasos en la orientación del eje óptico de un cristal uniáxico. a. El eje óptico está inclinado respecto al plano de la sección delgada. b. Giro alrededor del círculo graduado exterior hasta la extinción. c. Inclinación por medio del tambor hasta que coincida con el eje del microscopio. El retículo indica los planos de los nicoles.

eje óptico viene acompañada de dos operaciones, ambas dependientes de la extinción.

En primer lugar, se gira el eje hasta que se sitúe sobre el plano de extinción Este-Oeste del microscopio. Los diversos círculos de la platina universal y la platina del microscopio están en su posición inicial. Se gira el círculo horizontal interior de la platina hasta que el cristal, bajo observación, esté en posición de extinción. El eje óptico estará situado entonces o en el plano vertical Norte-Sur o en el plano vertical Este-Oeste.

En segundo lugar, se inclina el eje hasta que se sitúe vertical y en coincidencia con el eje del microscopio. Supuesto que el eje óptico esté situado en el plano Norte-Sur, puede llevarse a la posición vertical girando el tambor situado a un lado de la platina. Mediante una simple maniobra se reconoce la posición vertical: mientras se gira el tambor, se oscilan ligeramente la platina a derecha e izquierda hasta encontrar un punto en el cual persiste la extinción a pesar de la oscilación. Tal punto corresponde al eje óptico. Si la rotación del tambor hace que el cristal abandone la extinción, el eje óptico estará situado en el plano Este-Oeste. En este caso se gira el círculo horizontal interior 90° ; entonces, el eje óptico estará situado en el plano Norte-Sur. Entonces, se sigue el procedimiento descrito anteriormente para localizar la posición del eje óptico, la cual puede localizarse sobre una representación estereográfica, trazando los ángulos ϕ (en el círculo horizontal interior) y ϱ (en el tambor) (Figura 7-9). Por convenio, en los trabajos petrofábricos se dibujan los polos en proyección sobre el

hemisferio inferior. Ocasionalmente, el eje óptico de un cristal está demasiado cerrado sobre el plano de la sección delgada para permitir, dentro de los límites de rotación de la platina universal, el llevarlo a la posición vertical. En este caso, se determina la posición angular mediante el uso combinado de la extinción y los colores de interferencia.

Primeramente, se lleva el cristal a una posición de extinción girando el círculo horizontal interior; el eje óptico permanecerá inclinado y estará situado o en el plano vertical Este-Oeste o en el Norte-Sur. Si continúa el cristal en extinción cuando se gira el tambor, el eje estará en el plano vertical Norte-Sur; y si continúa en extinción, cuando se inclina mediante el

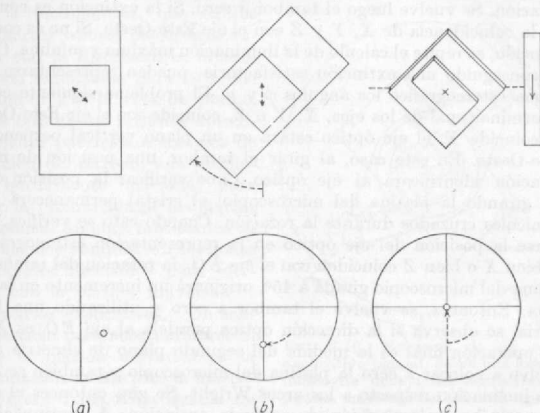


FIG. 7-9. Manipulación de un único eje óptico hasta su coincidencia con el eje del microscopio. (a) El eje uniaxial está inclinado respecto a la sección delgada (arriba); en proyección estereográfica (abajo). (b) Se gira el cristal alrededor del eje vertical interior de la platina universal hasta una posición de extinción. (c) Se inclina el eje hasta que coincide con el retículo girando el tambor alrededor del eje este-oeste.

movimiento del círculo según los arcos Wright, el eje estará en el plano vertical Este-Oeste.

Cuando ya se conoce el plano, se gira la platina del microscopio 45° y el eje de la platina universal normal al plano, hasta que el cristal muestre la máxima interferencia. El ángulo que forma el plano de la sección y la posición de máxima interferencia mide la inclinación del eje óptico respecto a la horizontal (ó $90^\circ - \rho$).

El signo de un cristal uniaxial se determina mediante la lámina de mica, la lámina de yeso o la cuña de cuarzo. Cuando se conoce la dirección del eje óptico de un cristal individual, puede llevarse el cristal a la posición 45° para observar los colores de interferencia a lo largo del eje. Si el rayo lento es normal al eje, el mineral es positivo; y, por el contrario, si el rayo rápido es normal al eje, es negativo.

Direcciones ópticas en los cristales biáxicos. Los principales objetivos son: determinar X , Y y Z en función de Este, Oeste y vertical; determinar $2V$; y determinar el signo. Esto puede conseguirse observando la máxima interferencia y la extinción.

Se colocan los círculos a cero. Se gira el círculo interior hasta la extinción. A continuación, se gira el tambor vertical: es posible que continúe la extinción; esto indica que la coincidencia de X , Y o Z con el eje Este-Oeste ya se ha conseguido. Si no continúa la extinción, se vuelve el tambor a la posición de máxima iluminación. Entonces, se inclina el círculo interior a lo largo de los arcos Wright, a derecha o a izquierda, hasta la mínima iluminación. Se vuelve luego el tambor a cero. Si la extinción es completa, indica la coincidencia de X , Y y Z con el eje Este-Oeste. Si no es completa la extinción, se repite el cálculo de la iluminación máxima y mínima. Cuando se ha conseguido una extinción satisfactoria, pueden representarse en un diagrama estereográfico los ángulos ϕ y ρ . El problema siguiente consiste en determinar cuál de los ejes, X , Y o Z , coincide con el eje Este-Oeste.

Si coincide Y , el eje óptico estará en un plano vertical perpendicular al Este-Oeste. En este caso, al girar el tambor, una posición de mínima iluminación identificará al eje óptico. Cabe verificar la posición del eje óptico girando la platina del microscopio: el cristal permanecerá oscuro entre nicoles cruzados durante la rotación. Cuando esto se verifica, puede marcarse la posición del eje óptico en la representación estereográfica.

Si bien X o bien Z coinciden con el eje EO , la rotación del tambor, con la platina del microscopio girada a 45° , originará un incremento en la interferencia. Entonces, se vuelve el tambor a cero y utilizando una lámina accesorio, se observa si la dirección óptica paralela al eje EO es X o Z .

La operación final es la medida del segundo plano de simetría óptica. Se vuelve a colocar a cero la platina del microscopio y también se lleva a cero la inclinación respecto a los arcos Wright. Se gira entonces el círculo interior 90° hacia la posición de segunda extinción. A continuación, se repiten las manipulaciones indicadas más arriba con objeto de determinar cuál de las dos direcciones ópticas permanece a 90° del eje EO anteriormente identificado.

Montajes ilustrativos. Para explicar inicialmente el trabajo con una platina universal es conveniente utilizar secciones delgadas especiales. Una sección cortada al azar de un grupo de pequeños cristales hexagonales, bien desarrollados, de cuarzo, proporciona un útil ejemplo de mineral uniáxico positivo. El perfil hexagonal siministra guías geométricas que ayudan a visualizar la posición de la indicatriz óptica de los cristales individuales cuando se giran los ejes de la platina. Se ve claramente la variación de los colores de interferencia con la orientación.

Un eje óptico individual inclinado respecto al plano de la sección puede colocarse rápidamente en la posición en la que coincide con el eje del microscopio. Se gira el círculo exterior hasta que el cristal se torne oscuro entre nicoles cruzados. Entonces, los planos ópticos principales serán paralelos a los planos de los nicoles que indica el retículo. Cuando se ha efectuado este movimiento, se oscila a intervalos la platina del microscopio. La posición del eje óptico viene indicada por el hecho de que se mantenga

la extinción con la oscilación. Entonces, pueden medirse los ángulos ϕ y ρ .

Una sección cortada de una briqueta plástica de cristales de topacio en desorden, pero cada uno con contorno rómbico, sirve como ejemplo de orientación biáxica. Cabe simplificar la orientación para el topacio inclinando la platina universal hasta que un cristal con contorno rómbico esté orientado con los ejes a , b y c en coincidencia con los planos de extinción. Con los perfiles del cristal como guía, se comprende más fácilmente el procedimiento para los cristales faltos de límites faciales.

Portaobjetos explicativos dignos de mención son: la brookita, que muestra dispersión de los ejes ópticos; la piedmontita, que exhibe unos fuertes colores pleocroicos variables con la dirección; la muscovita, con exfoliación para la determinación de $2V$; la veta de cuarzo, con los ejes de los cristales aproximadamente paralelos a los ejes de inclinación del terreno; y la plagioclase burdamente maclada, para indicar la orientación de las maclas individuales. Algunos fabricantes de preparaciones suministran secciones de minerales adecuados para ejercitarse con la platina universal.

Ejercicios explicativos. Un sencillo ejercicio para acostumbrarse al uso de la platina universal es la determinación de $2E$ para la muscovita (Figura 7-10). Una lámina de muscovita de alrededor de un centímetro cuadrado y un grueso como el de una hoja de papel, se monta con bálsamo de Canadá sobre un portaobjetos y se cubre con el cubreobjetos. Se observa entonces, sobre la platina del microscopio, el portaobjetos con luz polarizada convergente (sin la platina universal). La dirección del plano del eje óptico se marca con tinta, o, mejor, mediante una línea trazada con una punta de diamante, sobre el portaobjetos.

Se coloca entonces en posición la platina universal y se centra. Con los círculos y platina en posición inicial, se monta, entre los hemisferios, la preparación de muscovita con la línea que indica el plano axial paralela al eje NS . Una gran lámina, de un único cristal de muscovita, proporcionará una figura de interferencia biaxial tipo 90° , en esta posición. Se coloca la platina del microscopio aproximadamente a 45° de la primera posición; entonces, el retículo indicará la bisectriz aguda para la figura de interferencia tipo 45° . El plano axial es normal al eje EO . Si se gira el tambor del círculo exterior, puede hacerse que cada una de las isógiras aparezcan debajo del retículo y puede medirse directamente el ángulo compren-

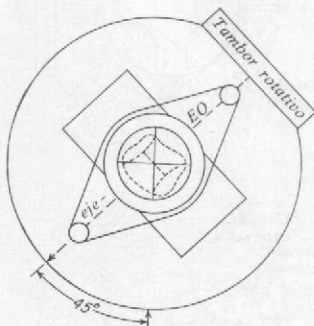


FIG. 7-10. Esquema de un ejercicio explicativo biaxial. Se ve una escama de muscovita debajo del hemisferio de la platina universal. La bisectriz aguda permanece bajo el retículo y el plano axial es normal al eje EO . Puede obtenerse cada isógira moviendo el retículo mediante la rotación del tambor.

dido entre ellas. Si se conocen n_β para la muscovita y n para el cristal de los hemisferios, cabe calcular el $2V$ correspondiente a la muscovita a partir del ángulo medido.

Puede intentarse un segundo ejercicio explicativo tal como indican los esquemas de la Figura 7-11. Servirá

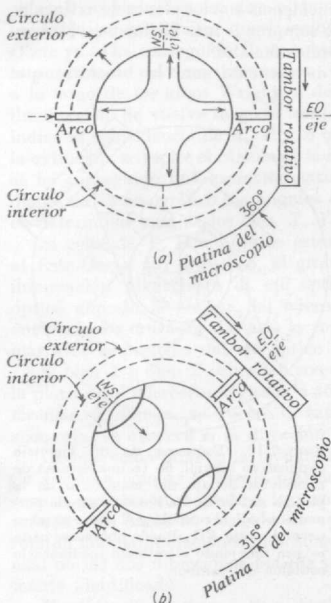


FIG. 7-11. Esquema del ajuste de un gran cristal biáxico sobre la platina universal. (a) Se coloca el cristal de modo que gire en dos planos verticales con movimiento aparente a lo largo del retículo. (b) La platina está en posición a 45° y cada isógira puede moverse hacia la intersección del retículo mediante el giro del tambor sobre el eje EO .

una sección de un cristal individual de aragonito del tipo frecuente en las colecciones de secciones delgadas. Generalmente, estas secciones se cortan aproximadamente normales a la bisectriz aguda.

Se monta la sección delgada sobre la platina universal y se maniobra con el eje NS y el círculo interior hasta la posición de extinción más completa. En esta posición, se intenta obtener una figura de interferencia, la cual es obtenible con los cristales comparativamente grandes de la mayoría de las colecciones. Primeramente, se asegura la figura en la posición 90° (Figura 7-11a); ésta debe centrarse con el círculo interior y mediante la inclinación sobre los arcos Wright hasta que pueda girarse respecto a cada uno de los brazos de la cruz sin destruir la simetría de ésta. En esta posición, por rotación sobre el eje EO y NS se moverá el retículo a lo largo de la banda de extinción de cada caso, mientras que la banda misma permanecerá paralela al retículo vertical o al horizontal.

Cuando se halla centrada la cruz de interferencia tal como acabamos de decir, se gira la platina 45° como indica la Figura 7-11b. Con la figura de interferencia en la posición 45°, la rotación según el eje EO proporciona la medida del ángulo axial, a reserva de una pequeña corrección

debida al índice del vidrio del hemisferio.

Es aconsejable el repetir este ejercicio utilizando la extinción para localizar las posiciones de los ejes ópticos sin la ayuda de las figuras de interferencia. Para el primer ajuste se emplean, como antes, el círculo interior y el eje NS . De cualquier modo, aparecerán en este caso las bandas de la extinción inferior. Cuando estas hayan sido localizadas y confirmadas

por la rotación conjunta Norte-Sur y Este-Oeste, se gira otra vez la platina 45° . Mediante la rotación según el eje EO se mide la separación de los dos puntos de baja birrefringencia, entre los cuales existe una zona de birrefringencia extremadamente elevada. Usando las láminas accesorias pueden establecerse las direcciones X , Y y Z .

Red estereográfica. En una red estereográfica pueden representarse (Figura 7-12) las relaciones angulares de los ejes ópticos, los ejes X , Y y Z ,

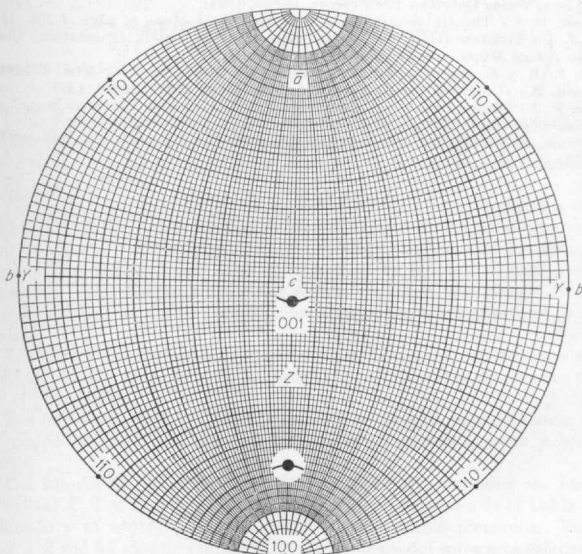


Fig. 7-12. Red estereográfica con la orientación óptica de un diópsido (hemisferio superior). Se indican los ejes cristalográficos a , b y c , los ejes ópticos, los ejes de vibración Y y Z , el crucero $\{110\}$ y las caras del cristal (100) y (001) .

las exfoliaciones significativas y las caras del cristal que se conozcan. Las relaciones angulares se trazan tomándolas de las lecturas sobre los diversos círculos de la platina universal. La proyección estereográfica proporciona una solución gráfica de los problemas que suponen las relaciones angulares sobre una superficie esférica.

Con frecuencia, es conveniente marcar en una primera etapa la posición de X , Y y Z y hacer que una de las tres coincida con el centro de la red estereográfica. Un papel transparente superpuesto puede usarse, entonces, para marcar las demás posiciones. Si se monta la red sobre un cartón

fuerte, puede clavarse en el centro del papel una tachuela pequeña que sirva como eje de rotación del transparente superpuesto.

BIBLIOGRAFIA

- Barret, C. S.: The Stereographic Projection, *Trans. AIME, Met. Tech. Publ.*, 819, 1937.
- Berek, M.: «Mikroskopische Mineralbestimmung mit Hilfe der Universaldrehtischmethoden», Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1924.
- Emmons, R. C.: The Universal Stage, *Geol. Soc. Am., Mem.* 8, págs. 1-205, 1943.
- Haff, J. C.: Fedorow (Universal Stage) Method of Indicatrix Orientation, *Quart. Colo. School Mines*, vol. 37, págs. 1-28, 1942.
- Knopf, E. B. y E. Ingerson: Structural Petrology, *Geol. Soc. Am., Mem.* 6, 1938.
- Reinhard, M.: «Universal Drehtischmethoden», B. Wepf & Co., Basel, 1931.
- Turner, F. J.: Determination of Pagoclase with the Four-axis Universal Stage, *Am. Mineralogist*, vol. 32, págs. 389-410, 1947.
- Wahlstrom, E. E.: «Petrographic Mineralogy», John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1955.

CAPITULO 8

Características generales: color, modo de agregación, exfoliación y orientación

Color y pleocroísmo. Aunque muchos minerales sean incoloros, el color, cuando existe, es una característica distintiva. Los minerales de color fuerte tienen más probabilidades de estar coloreados en sección delgada que los de tintes pálidos.

Los minerales que muestran su color natural están indicados en la Tabla 10-2. Entre éstos, los minerales isotrópicos no originan cambios de color cuando se les gira bajo luz polarizada; mientras que los minerales anisotrópicos exhiben en su color un cambio de varios grados cuando se gira la platina. Este cambio en el color es conocido por *pleocroísmo*. El color mineral natural se observa en secciones delgadas solamente con el polarizador.

Los minerales coloreados hexagonales o tetragonales son *dicroicos* —por ejemplo, el color pleocroico de los minerales de estos dos sistemas es doble con el polarizador.

Los minerales rómbicos, monoclinicos y triclínicos, cuando tienen color en sección delgada, muestran tres clases diferentes de colores y son *tricroicos*.

Los colores de pleocroísmo están normalmente orientados con los ejes del cristal X , Y y Z . Además de los colores convencionales de la Tabla 10-2, el blanco y el neutro pueden representar un cambio pleocroico. Ya que X , Y y Z son los ejes de vibración, la distribución del color está relacionada a n_α , n_β y n_γ y también a los ejes ópticos. La correspondencia de esta relación se cumple mejor refiriéndola a la figura de interferencia con objeto de determinar las direcciones de los ejes: tan pronto como se conoce la bisectriz aguda, Z (si el mineral es positivo) o X (si es negativo), se eliminan del tubo del microscopio las lentes Bertrand y el analizador y se tendrá el correspondiente color natural. El color producido por la luz que vibra en un plano perpendicular al plano axial es Y . El tercer color será debido a la luz que vibra paralelamente a la dirección de la bisectriz aguda, éste será X si el mineral es positivo, o Z si es negativo.

En los minerales pleocroicos uniáxicos, la luz que vibra paralelamente al eje óptico es de un color, mientras que la luz que lo hace perpendicularmente en ángulo recto es de otro.

Los minerales biáxicos muestran diversos grados de absorción del color.

En la hornblenda común, por ejemplo, la luz que vibra paralela a Z corresponde generalmente a la mayor absorción. Y es que menos absorbida y X la menos. Esto puede recordarse mediante la *fórmula de absorción*:

$$X < Y < Z$$

Es costumbre recordar la absorción en función de vibración paralela a los ejes de fácil vibración.

Forma o agregación. Un número considerable de las formas producidas por los grupos de cristales observados en sección delgada y de cortes de los cristales individuales son tan característicos que ayudan a la identificación (Tabla 10-3).



FIG. 8-1.



FIG. 8-2.

FIG. 8-1. ($\times 33$) Cristales incipientes de agregados en forma de varillas en una masa de vidrio volcánico.

FIG. 8-2. ($\times 33$) Grietas astilladas en halloysita (nicoles cruzados).

Muchos cristales adoptan un desarrollo peculiar con sorprendente perseverancia; tal tendencia, en el caso de cristales individuales, se califica como *hábito*. La *agregación* se refiere al agrupamiento de pocos o muchos cristales pequeños. La disposición que adopta un grupo mineral se describe como su *modo de agregación*. Ambas, la forma y la agregación, son características muy utilizadas en el estudio de los minerales.

Cristalización incipiente. El vidrio natural se forma a partir de un licor viscoso que se solidifica sin cristalización y son isotrópicos. Sin embargo, el material contiene constituyentes capaces de producir un cierto número de minerales diferentes. El desarrollo de estos minerales está impedido, durante el periodo de cristalización, por la viscosidad del líquido que los incluye, principalmente a causa del rápido enfriamiento. Los cristales no pueden desarrollarse, pero, en su lugar, agregados aciculares, crecimientos en forma de hebreo y varias otras formas originales representan la súbita detención de la cristalización. *Cristalitas*, *margaritas*, *triquitas*, *microlitas*, *globulitas* y *longulitas* son nombres que se aplican a las diferentes formas de cristalización incipiente (Figura 8-1). Las triquitas son rayas curvadas de cristales embrionarios en el vidrio. Las margaritas son largas rayas de

formas globulares que recuerdan a porciones de un collar de perlas en línea recta o curva. Las longulitas son pequeñas formas semejantes a cañas compuestas por grupos de globulitas. Las cristalitas son diminutos núcleos de cristalización suspendidos en el vidrio. Las microlitas son pequeñas formas aciculares casi cristalinas.

Minerales isotrópicos no-cristalinos. Los minerales que, carentes de cualidades direccionales, producen doble refracción, resultan oscuros entre nicoles cruzados. Tales minerales se identifican principalmente por medio de su estructura en sección delgada en combinación con la determinación de su índice de refracción.

El vidrio, el ópalo, la cliaquita (bauxita) y el colofano aparecen como no-cristalinos o microscópicamente amorfos¹. Además de los cristales inci-



FIG. 8-3.

Fig. 8-3. ($\times 33$) Secciones redondeadas de bauxita pisolítica completadas por cliaquita. Los intersticios contienen gibbsita.



FIG. 8-4.

Fig. 8-4. ($\times 33$) Estructura celular de madera conservada en ópalo.

pientes, el vidrio muestra frecuentemente líneas de flujo, grietas o fracturas concéntricas. El ópalo está usualmente fajeado y puede mostrar un juego de colores. Las grietas astilladas son una característica distintiva de los minerales de origen coloidal (Figura 8-2).

La cliaquita, mineral amorfo encontrado en la bauxita, se presenta frecuentemente en formas pisolíticas rotas y fracturadas de un modo desordenado. Los intersticios entre las pisolitas pueden estar rellenos por gibbsita formando un mosaico de pequeños cristales gris y blanco (Figura 8-3).

Las formas redondeadas, más o menos esféricas, que adoptan los minerales amorfos y metacoloidales en espacio abierto, se denominan frecuentemente *colofomas*.

Materiales de origen orgánico. Ocasionalmente se encuentran, en el estudio de las secciones delgadas, estructuras que son un residuo de la vida

¹ Se ha empleado el término *microamorfos* debido a que los estudios con rayos X han mostrado que estos minerales tienen propiedades direccionales sensibles a las longitudes de onda cortas.

orgánica. Los organismos diatomáceos, radiolarios y foraminíferos tienen estructuras características que con frecuencia se conservan en los minerales. Las diatomeas fósiles y otras huellas microscópicas son habituales en el ópalo y tienen las mismas propiedades ópticas que el mineral, estando en muchas ocasiones bien conservada la estructura original de los microorganismos (Figura 8-7). Los foraminíferos son aptos para producir calcita, generalmente de naturaleza finamente cristalina, y difícil de distinguir del aragonito a menos que la estructura sea suficientemente gruesa para permitir el desarrollo de la exfoliación romboédrica (Figura 8-8).

Los fragmentos de materia vegetal antigua conservados como materiales carbonosos —lignito, etc.— son generalmente negros o castaños en sección delgada. Las estructuras celulares de madera, tal como se conservan en el

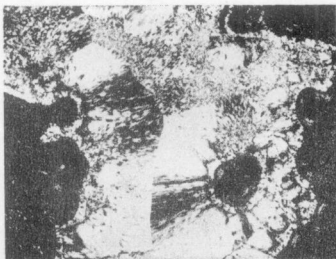


FIG. 8-5.

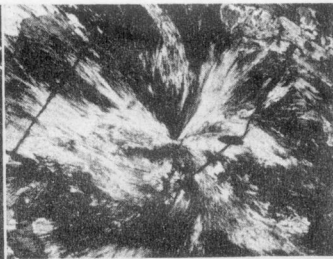


FIG. 8-6.

FIG. 8-5. ($\times 33$) Calcedonia entre nicoles cruzados mostrando conjuntamente los agregados y la estructura en bandas.

FIG. 8-6. ($\times 33$) Agregado radial llameante de sillimanita, entre nicoles cruzados.

lignito, son fácilmente distinguibles en sección delgada. El ópalo formado por el remplazamiento de la madera muestra frecuentemente una estructura celular (Figura 8-4).

El colofano, mineral formado por huesos fósiles, conserva frecuentemente la estructura del hueso que ha sido remplazado.

Agregados finos: Frecuentemente, los minerales forman agregados finos de características especiales. La estructura agregada es acentuada entre nicoles cruzados ya en grupos radiales ya en masas de grano fino semejantes a un mosaico de pequeños cristales (Figura 8-9).

En los grupos radiales, los pequeños cristales convergen como los radios de una rueda; la uniformidad radial de orientación origina, entre nicoles cruzados, una cruz negra paralela a las posiciones de extinción (Figura 8-5). Esta cruz no debe confundirse con la cruz axial de una figura de interferencia uniaxial.

A veces, la sillimanita proporciona un ejemplo de un agregado mineral (Figura 8-6). Sin embargo, las agujas de sillimanita no están dispuestas regularmente como en el caso de la calcedonia.

Cruces debidas a la disposición radial de grupos de pequeños cristales,

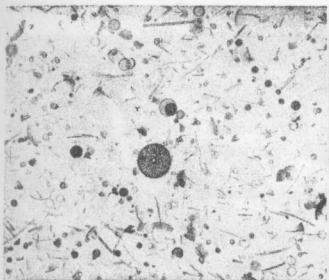


FIG. 8-7.

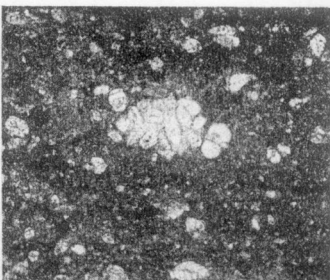


FIG. 8-8.

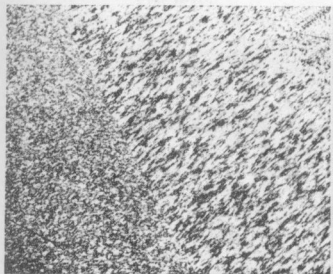


FIG. 8-9.

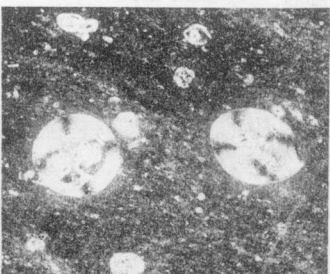


FIG. 8-10.

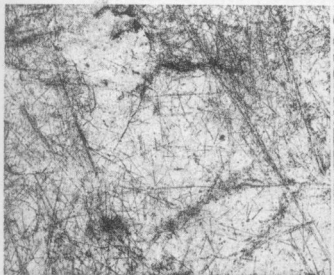


FIG. 8-11.

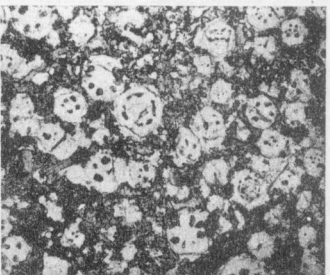


FIG. 8-12.

FIG. 8-7. ($\times 33$) Las pequeñas estructuras microorgánicas están preservadas en diatomeas fósiles en forma de ópalo. Tierra diatomácea de Lompoc, California.

FIG. 8-8. ($\times 33$) Calcita, en las secciones de foraminíferos fósiles, diseminada en pizarra carbonífera.

FIG. 8-9. ($\times 33$) Estructura en mosaico de calcedonia. Un agregado «sal y pimienta» de pequeños cristales, fotografiado entre nicoles cruzados.

FIG. 8-10. ($\times 33$) Cruz de polarización en calcita foraminífera fósil, dispuesta en bandas concéntricas de cristales radiales fibrosos.

FIG. 8-11. ($\times 33$) Cristales aciculares de sillimanita en cuarzo.

FIG. 8-12. ($\times 33$) Cristales euhédricos de leucita conteniendo inclusiones de vidrio.

cuando se observan con luz polarizada, se forman frecuentemente en los microfósiles remplazados por calcita (Figura 8-10).

La cristalización esferolítica en las rocas vítreas se pone fuertemente de manifiesto entre nicoles cruzados. La Figura 16-43d representa una sección delgada conteniendo esferolitas, fotografiada entre nicoles cruzados. A menudo se encuentran suspendidas en vidrios volcánicos esferolitas de feldespatos u otros minerales.

La orientación paralela de los agregados fibrosos se explica mediante una sección delgada de crisolita en serpentina (Figura 8-13). Venillas de fibras entrecruzadas dispuestas de manera perpendicular a las paredes de la vena son comunes en las serpentinatas. Las fibras son moderadamente anisotrópicas, en tanto que la serpentina está siempre oscura entre nicoles cruzados.

Inclusiones. Durante la cristalización, pueden ser captadas pequeñas áreas de sustancias extrañas que, por otra parte, no llegan a ser cristales claros. Por ejemplo, a menudo existen distribuidas simétricamente pequeñas zonas de vidrio volcánico semejantes a esferitas aisladas suspendidas en el cristal (Figura 8-12).

El hipersteno (Figura 8-15) puede contener inclusiones laminares pardas que frecuentemente vienen acompañadas por un fino sistema transversal de líneas, generalmente descrito como *estructura schiller*.

En la estauroлита se presentan como inclusiones pequeños crecimientos vermiculares de cuarzo (Figura 8-29). En la andalucita, la materia carbonosa forma inclusiones simétricas (Figura 8-24). A veces, pueden ser retenidas sustancias radiactivas que, durante el tiempo geológico, continuarán emitiendo radiaciones hasta, por fin, perder su energía. Estas inclusiones, cuando están en minerales coloreados como la biotita, producen manchas circulares pardo oscuro con frecuencia pleocroicas. La Figura 8-16 muestra los halos originados por la radiactividad en la biotita del oeste de Connecticut.

Cristales aciculares. Unos pocos minerales forman delgadas masas de cristales, como cabellos, que generalmente penetran en algún otro mineral, como mica o cuarzo (Figura 8-11). La dumortierita se presenta de una manera semejante; a menudo es de color rojo clavel y puede comunicar a la muestra un color rosa cuarzo, aunque de color más intenso. El rutilo forma agujas rojas o pardas que penetran en cuarzo o mica. También la turmalina se presenta de forma similar; los cristales radiales de turmalina que se muestran en la Figura 8-14 son característicos de una roca: la luxulianita.

Aunque estas inclusiones son captadas rápidamente cuando se las observa, debe recordarse que estos mismos minerales pueden presentarse como grandes cristales que tienen un hábito completamente diferente.

Cristales hojosos. Los grupos cristalinos pueden estar formados por individuos largos y gruesos que originen secciones hojosas bajo el microscopio. De la misma manera, pueden presentarse tamaños intermedios de diferentes formas y desarrollos. Un ejemplo del tipo de desarrollo de hoja gruesa lo suministra la cianita, como explica la Figura 8-17.

Cristales maclados. Los feldespatos proporcionan un excepcional ejemplo de maclado laminar, principalmente entre nicoles cruzados. Para la

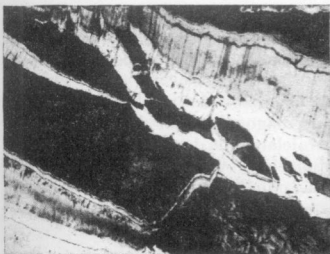


FIG. 8-13.

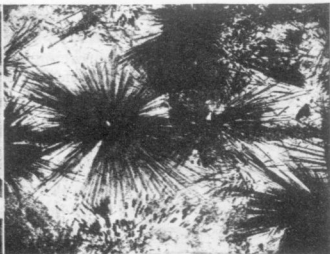


FIG. 8-14.



FIG. 8-15.

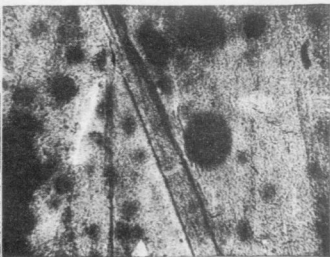


FIG. 8-16.

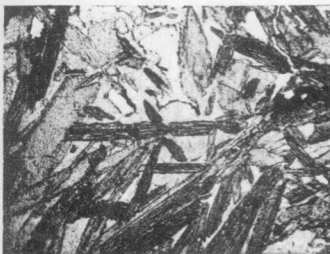


FIG. 8-17.

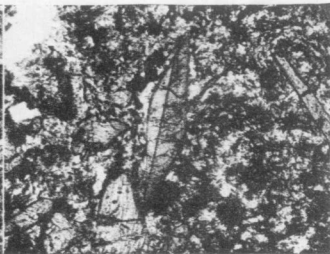


FIG. 8-18.

- FIG. 8-13. ($\times 33$) Bandas de asbesto fibroso en serpentina (nicos cruzados).
 FIG. 8-14. ($\times 33$) Cristales aciculares de turmalina dispuestos en grupos radiales.
 FIG. 8-15. ($\times 33$) Estructura Schiller en hiperstena.
 FIG. 8-16. ($\times 33$) Halos pleocroicos en biotita.
 FIG. 8-17. ($\times 33$) Cristales hojosos de cianita.
 FIG. 8-18. ($\times 33$) Esfena maclada paralelamente a la longitud de la sección.

mayoría de ellos, la macla es polisintética, comprendiendo numerosos listones individuales (Figura 13-54). La ortoclasa suministra ejemplos de maclas de contacto y penetración; la microclina, da dos tipos de maclado laminar superpuesto (Figura 13-41).

Numerosos minerales proporcionan ejemplos de maclas. La calcita casi siempre se macla paralelamente a la diagonal mayor de la exfoliación romboédrica y la dolomita lo hace paralelamente de manera simultánea a la diagonal mayor y menor de la exfoliación romboédrica. La casiterita, el corindón, el piroxeno, el aragonito, la anfíboles, la lazulita y la gibbsita se funden con frecuencia en maclas cristalinas, las cuales se reconocen fácilmente por la diferencia de extinción entre nicoles cruzados de los diferentes

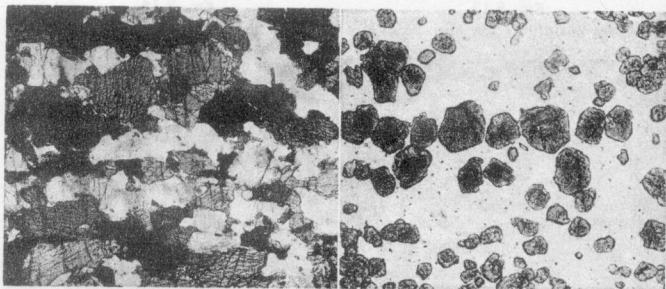


FIG. 8-19.

FIG. 8-19. ($\times 33$) Cristales anhédricos de hornblenda asociados con cuarzo.

FIG. 8-20.

FIG. 8-20. ($\times 33$) Granate subhédrico en cuarzo.

elementos individuales. El cristal de esfena de la Figura 8-18 está maclado en individuos separados por un plano paralelo a la longitud del cristal.

Formas naturales de los cristales en sección delgada. Existe una tendencia pronunciada entre los minerales cristalizados de determinadas especies, de repetir un hábito de crecimiento. Los contornos visibles en sección delgada, debidos a la forma natural del cristal, son importantes.

Por ejemplo, el apatito aparece frecuentemente en forma de pequeños cristales alargados, semejantes a listones, con sección hexagonal (Figura 8-22).

El corindón en esquistos micáceos puede formar armaduras de cristales caracterizadas por contornos alargados redondeados (Figura 8-23).

La piritita se encuentra a menudo en áreas cuadradas, aunque también se presenta en formas triangulares y variadas.

Los cristales bien desarrollados con límites geométricos se llaman *euhédricos*²; los que tienen bordes redondeados o irregulares son *anhédricos*³. Los cristales que están parcialmente desarrollados se llaman *subhédricos*.

² También llamados *idiomórficos* o *automórficos*.

³ También llamados *alotriomórficos* o *xenomórficos*.

Las Figuras 8-19, 8-20 y 8-21 muestran, respectivamente, cristales anhédricos, subhédricos y euhédricos. Puede compararse el granate subhédrico (Figura 8-20) con el granate euhédrico (Figura 15-9).

Cristales isométricos. Los cristales euhédricos pueden mostrar secciones de formas isométricas tan comunes como el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el trapezoedro.



FIG. 8-21.

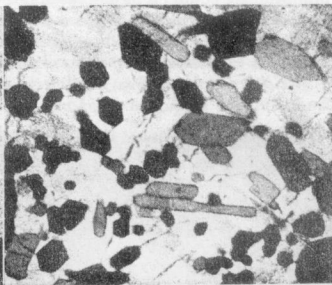


FIG. 8-22.

FIG. 8-21. ($\times 33$) Sección delgada de hornblenda euhédrica asociada con biotita.

FIG. 8-22. ($\times 33$) Cristales de apatito en sección delgada (nicoses cruzados).



FIG. 8-23.



FIG. 8-24.

FIG. 8-23. ($\times 33$) Armaduras de cristales de corindón en esquistos micáceos.

FIG. 8-24. ($\times 33$) Andalucita conteniendo inclusiones carbonosas simétricamente dispuestas.

Las Figuras 8-12 y 8-25 corresponden a la leucita y la analcima, cuyo contorno es trapezoédrico.

Ocasionalmente, los cristales isométricos están maclados y en algunos casos existe un anisotropismo débil, aunque los minerales isométricos son normalmente isotrópicos. Los minerales pseudoisométricos, como la leucita, muestran colores de interferencia del primer orden. El granate procedente

de yacimientos en calizas contacto-metamórficos puede ser fuertemente anisotrópico (Figura 8-26).

Cristales tetragonales. No son numerosos los pequeños cristales tetragonales que tienen desarrollo euhédrico. Los cortes son generalmente secciones normales correspondientes a un prisma tetragonal terminado en una bipirámide, como en el circón, o una combinación de dos prismas y dos bipirámides, como en la idocrasa. Los cristales son uniáxicos y las secciones cortadas normalmente al eje *c* dan figuras de interferencia de eje óptico. El maclado y la exfoliación están de acuerdo con la simetría tetragonal y la extinción es paralela a los ejes cristalográficos.

Cristales hexagonales. Un cierto número de minerales comunes, encontrados en las secciones delgadas, tienen cristalización hexagonal. Con fre-

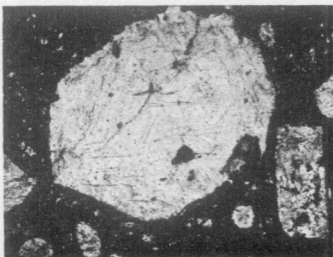


FIG. 8-25.

FIG. 8-25. ($\times 33$) Cristal euhédrico de analcima.

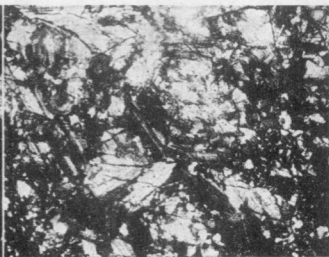


FIG. 8-26.

FIG. 8-26. ($\times 33$) Cristales isométricos de granate mostrando anisotropismo anómalo y zonado entre nicóles cruzados.

cuencia se encuentran cristales hexagonales de cuarzo, turmalina, apatito, berilo y nefelina; las secciones de estos cristales pueden ser hexagonales o triangulares cuando son normales al eje *c* y rectangulares, o modificaciones del rectángulo, cuando se cortan a lo largo del eje *c*. Los cristales están generalmente alargados paralelamente al eje *c* y muestran extinción paralela con elongación positiva o negativa, dependiendo del signo del mineral. Las secciones hexagonales son casi o completamente isotrópicas y dan figuras de interferencia uniáxicas. La nefelina (Figura 8-27) muestra con frecuencia conjuntamente secciones hexagonales y rectangulares. El apatito (Figura 8-22) proporciona a un tiempo secciones hexagonales y rectangulares alargadas, a veces redondeadas.

Los cristales romboédricos incluyen el grupo de los carbonatos romboédricos y, aunque estos minerales se encuentran ordinariamente en masas de cristales anhédricos, ocasionalmente se presentan cristales euhédricos; los cuales, en sección, son rómbicos y frecuentemente muestran líneas de exfoliación paralelas a los lados. Las secciones de los cristales romboédricos normales al eje *c* pueden aparecer hexagonales.

Cristales rómbicos. Un cierto número de minerales rómbicos, encontrados en las secciones delgadas, muestran cristales euhédricos; entre los

más comunes están el olivino, la natrolita, la barita, la zoisita, la andalucita, la dumortierita y el topacio. Frecuentemente se ven, en las secciones delgadas de rocas ígneas básicas, cristales euhédricos de olivino (Figura 8-28), que son simétricos con respecto a los ejes cristalográficos y llegan a la extinción cuando los ejes son paralelos a los planos de vibración de los nicols. Ocasionalmente se encuentran en las secciones delgadas cristales listoneados de natrolita con excelente extinción paralela, que ya han sido mencionados al tratar del ajuste del microscopio. Los cristales de barita pueden ser cuadrados, rectangulares o alargados, con extinción paralela y simétrica. Los cristales de estaurrolita (Figura 8-29) son a veces rectangulares o rómbicos. La andalucita forma cristales rómbicos simétricos (Figura 8-24).

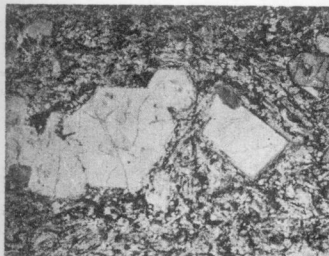


FIG. 8-27.

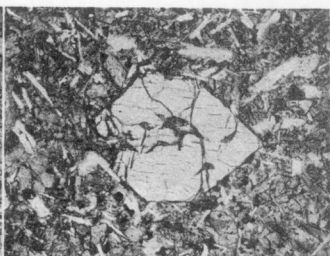


FIG. 8-28.

FIG. 8-27. ($\times 33$) Cristales de nefelina mostrando a un tiempo el contorno hexagonal y el rectangular.

FIG. 8-28. ($\times 33$) Cristal euhédrico de olivino.

Cristales monoclinicos. Frecuentemente se encuentran en las secciones delgadas, cristales euhédricos de piroxenos, anfíboles, feldespatos monoclinicos, esfena, mica, epidoto y de un cierto número de cristales monoclinicos menos comunes. Los cristales muestran extinción inclinada cuando están cortados aproximadamente paralelos al plano de los ejes a y c ; sin embargo, ciertas secciones pueden estar orientadas de modo que proporcionen extinción simétrica o paralela. Cada cristal monoclinico es un problema individual respecto a la orientación óptica y debe ser considerado en particular.

Las Figuras 8-21 y 8-30 proporcionan ejemplos comparativos de anfíbol y piroxeno euhédrico; las vistas muestran conjuntamente el contorno del cristal y la exfoliación.

Cristales triclinicos. El grupo de las plagioclasas, la microlina, la cianita y la rodonita constituyen los minerales triclinicos ordinariamente encontrados en las secciones delgadas. La extinción es generalmente inclinada en todas las secciones y los ángulos de extinción pueden ser altos.

La exfoliación, la partición y la fractura como una ayuda para distinguir a los minerales. La exfoliación puede definirse como la constante aptitud de un mineral para dividirse en partículas más y más pequeñas limitadas por superficies pulidas paralelas a las direcciones de las caras de las posibles

formas cristalinas. La exfoliación es una ayuda frecuente para distinguir a los minerales (Tabla 10-4). Desgraciadamente, muchos minerales muestran una exfoliación débil o nula. Sin embargo, si la exfoliación está bien desarrollada, a veces cabe identificar un mineral solamente mediante esta propiedad. En las secciones delgadas de minerales molidos los planos de exfoliación están a menudo desarrollados, apareciendo en las secciones pulidas como líneas o bandas de diferente anchura.

Algunos minerales se separan solo ocasionalmente o se rompen a lo largo de los planos de macla. Esto puede llamarse *partición*; no siempre está presente y puede no continuar hasta partículas cada vez menores. En una determinada muestra, en lo que concierne al efecto producido, la exfoliación puede ser distinguible de la *partición*.



FIG. 8-29.



FIG. 8-30.

FIG. 8-29. ($\times 33$) Cristales de estauroлита еuhédrica en una masa de muscovita y otros minerales.

FIG. 8-30. ($\times 33$) Cristales еuhédricos de piroхено.

En las tablas anexas para la identificación de los minerales comúnmente encontrados en las secciones delgadas se indica, para cada uno de los minerales incluidos, los planos de exfoliación, los planos de fractura o la tendencia a romperse paralelamente a ciertas direcciones definidas.

Exfoliación en una dirección. Un cierto número de minerales, la muscovita y el topacio por ejemplo (Figura 8-13), tienen un solo plano de exfoliación. En sección delgada los cristales que solo tienen una dirección de exfoliación muestran generalmente un sistema de líneas paralelas. Ocasionalmente, el plano de exfoliación puede ser siempre paralelo al de la sección, en cuyo caso prácticamente no aparecen líneas de exfoliación.

En el caso de fragmentos, los minerales con una dirección de exfoliación, reposan generalmente sobre el portaobjetos y tienen un contorno irregular. Los colores de interferencia casi siempre son uniformes para toda el área de los fragmentos con excepción de los bordes, en donde pueden observarse un cierto número de bandas de color, formando un contorno de color en los minerales que tienen una fuerte doble refracción. Con frecuencia, se presenta una orientación similar de las figuras de interferencia en tales fragmentos, dado que muchos yacen en la misma posición.

Exfoliación en dos direcciones. Varios minerales comunes desarrollan una marcada exfoliación en dos direcciones. Son prominentes ejemplos los piroxenos, los anfíboles y los feldespatos.

La hornblenda común del grupo de los anfíboles se distingue del piroxeno por una diferencia en el ángulo de exfoliación, la exfoliación de la hornblenda (Figura 8-32) paralela al prisma rómbico $\{110\}$ tiene dos direcciones a 56° y 124° . La exfoliación del prisma rómbico en el caso del piroxeno (Figura 8-33) está aproximadamente a 87° y 93° .

Las dos direcciones de exfoliación pueden estar, en los minerales rómbicos o tetragonales, a 90° . La Figura 8-34 es un ejemplo de andalucita (ortorrómbica) con dos direcciones de exfoliación a unos 90° ($89^\circ 12'$).

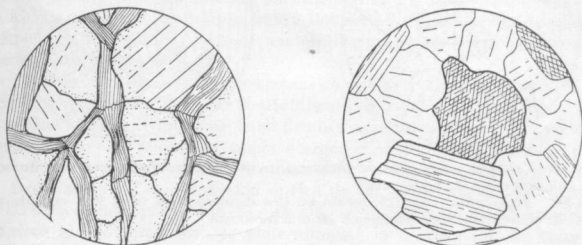


FIG. 8-31. ($\times 33$) Cristales anhédricos de topacio con exfoliación ampliamente espaciada en una dirección con muscovita penetrante con exfoliación poco espaciada en una dirección.

FIG. 8-32. Hornblenda anhédrica, con exfoliación a 56° y 124° , en una masa de feldespato.

Exfoliación en tres direcciones. Los tipos producidos a causa de la exfoliación en tres direcciones varían considerablemente. Uno de los más simples es el que se origina por exfoliación paralela a las caras de un cubo; los cuales producen en secciones delgadas figuras triangulares o cuadradas. En los fragmentos, los contornos tienden a ser cuadrados o rectangulares. La exfoliación cúbica está restringida al sistema isométrico, por lo que tanto las secciones como los fragmentos son fácilmente confirmados por el carácter isométrico del material.

La exfoliación rectangular recuerda en su aspecto, tanto en las secciones delgadas como en los fragmentos, a la exfoliación cúbica (Figura 8-35). Los minerales que tienen exfoliación rectangular pueden distinguirse sin embargo fácilmente a causa de su anisotropía entre nicóles cruzados.

La exfoliación romboédrica es uno de los tipos más comunes encontrados entre los minerales ya en sección o en fragmentos. Los carbonatos comunes tienen exfoliación de este tipo; las muestras producidas en las secciones delgadas tienen forma de cruz y los cristales muestran planos de exfoliación inclinados que penetran en la sección. Además, son frecuentes una serie de líneas de macla paralelas a la diagonal mayor del romboedro; aunque ocasio-

nalmente el maclado puede aparecer paralelamente tanto a la diagonal mayor como a la menor, como en el caso de la dolomita. En los fragmentos, los minerales con exfoliación romboédrica generalmente tienen un plano yacente con una sección rómbica completamente bien desarrollada cuyo relieve varía con la dirección. Los bordes muestran normalmente superficies límites inclinadas o en forma de cuña.

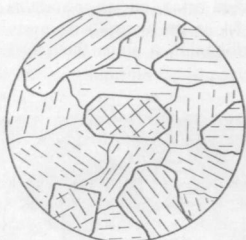


FIG. 8-33. Cristales euhédricos de piroxeno, mostrando las dos direcciones de exfoliación, en una masa de feldespato.

FIG. 8-34. Andalucita, con exfoliación en dos direcciones a unos 90°, cortada por venillas de muscovita, con exfoliación en una dirección.



FIG. 8-35. Anhidrita (exfoliación rectangular) y fluorita (exfoliación octaédrica) en la misma sección delgada. La exfoliación octaédrica de la fluorita produce una huella triangular.

En cristales de los sistemas rómbico, monoclinico y triclínico, la exfoliación en tres direcciones es, frecuentemente, originada por rompimiento paralelo a varias direcciones. En la mayoría de los casos, la parte de mineral bajo examen presenta un caso especial; sin embargo, puede decirse como regla general que la exfoliación de este tipo produce en sección delgada una cruz de características casi rectangulares y que en los fragmentos, los límites son también casi rectangulares o tienen un plano yacente con bordes en cuña.

Exfoliación en cuatro direcciones. Un mineral común, la fluorita, tiene exfoliación en cuatro direcciones paralelas a las caras de un octaedro (Figura 8-35). En sección delgada, la exfoliación de la fluorita tiende a desarrollar características triangulares o rómbicas. En los fragmentos, el contorno de los cristales individuales es triangular o irregular con bordes dentados. Entre nicols cruzados se reconocen fácilmente teniendo en cuenta el carácter isotrópico del mineral. Ocasionalmente, se encuentra espinela con partición octaédrica imperfectamente desarrollada que a veces recuerda a la exfoliación octaédrica. El diamante también tiene exfoliación octaédrica, pero, como es lógico, no es frecuente en las secciones delgadas.

Exfoliación en seis dimensiones. La blenda es uno de los pocos minerales con exfoliación paralela a las seis distintas direcciones de un dodecaedro. Ocasionalmente pueden encontrarse en algunas secciones muestras de blenda con el perfil de esta figura debido a la intersección de planos de exfoliación inclinados. A veces, pueden observarse en los fragmentos dodecaedros casi perfectos.

Tendencia a romperse en direcciones alargadas. Algunos minerales muestran una estructura decididamente fibrosa, formada por numerosas agujas pequeñas visibles al microscopio en forma de cristales paralelos, cuyo tamaño puede variar de pequeñas hojas alargadas a diminutas fibras capilares. Los minerales de este género cambian de la forma fibrosa a la hojosa.

Orientación. La orientación óptica de un cristal supone la correlación de las direcciones ópticas con las direcciones cristalográficas. En los minerales biáxicos el problema incluye generalmente la localización de la posición de la bisectriz aguda, la normal óptica y el plano axial con respecto a los ejes a , b y c del cristal. La orientación de los cristales uniáxicos se reduce a relacionar el sistema óptico con el eje c .

En la siguiente discusión se supone que el lector está familiarizado con las reglas sencillas de descripción de los cristales en los diversos sistemas y con las convenciones de orientación; en caso contrario, debe consultarse un texto de cristalografía geométrica.

Sistema isométrico. La orientación óptica de los cristales isométricos está eliminada, dado que son isotrópicos, de lo que se deduce que son no direccionales en lo concerniente a la luz.

Sistemas tetragonal y hexagonal. Los ejes ópticos de los minerales uniáxicos son paralelos a los ejes c de los minerales tetragonales y hexagonales. Las direcciones pueden relacionarse, según el signo óptico, ya con el rayo rápido ya con el lento del mineral.

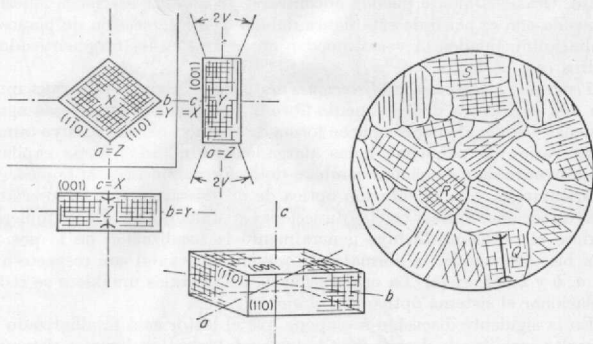
Sistema rómbico. Los ejes cristalográficos a , b y c de los minerales rómbicos se corresponden con los ejes de vibración X , Y y Z , pero no necesariamente en el orden citado. Por ejemplo, el eje cristalográfico a puede ser X , Y o Z , y son posibles las mismas sustituciones para los ejes b y c . Sin embargo, si se fijan dos direcciones de vibración, se conoce la tercera. También es evidente que X y Z definen la posición del plano axial; así, si $a = Z$ y $c = X$, el plano axial incluye a a y c . El ángulo axial $2V$ puede variar según el plano axial.

Los cristales rómbicos pueden indicarse de varias maneras. La extinción es paralela a a , b y c . Si pueden determinarse a , b y c por medio de alguna

exfoliación prominente o mediante los límites del cristal, llegará a conocerse la naturaleza de la extinción. La exfoliación reconocible y las caras del cristal ayudan en el examen. También es útil la buena dispersión.

Una vez que se han determinado las posiciones de a , b y c , las figuras de interferencia proporcionan criterios para la fijación relativa de X , Y y Z . Al mismo tiempo, pueden determinarse las posiciones de los ejes ópticos. En la práctica, cada mineral supone un problema especial en cuanto a la orientación, y en las descripciones minerales de la Parte Segunda se incluyen los datos correspondientes a los minerales comunes.

La barita proporciona un ejemplo útil del problema de la orientación óptica de un mineral rómbico. La Figura 8-36 muestra una exfoliación idealizada de la barita, juntamente con el diagrama de una sección delgada y



8-36. Sección delgada y diagramas de orientación de barita.

tres secciones en corte orientadas. En la sección delgada, los granos de barita muestran exfoliación en tres direcciones, la paralela a $\{001\}$ es la más pronunciada; el marcado con R resulta estar en una posición tal que la medida de los ángulos de cruce es $78^{\circ}22'$. El eje c es perpendicular a esta sección y los planos $\{110\}$ y $\{110\}$ son paralelos a él. En este grano, el eje a biseca al ángulo obtuso de la exfoliación y el eje b biseca al ángulo agudo. Entre nicols cruzados, la extinción será paralela, pero podrá estar normal al eje b y no en una posición que dé una figura de interferencia del tipo de bisectriz aguda. En el grano Q se ve una figura de interferencia orientada con respecto a la exfoliación. Un ensayo con la cuña de cuarzo confirma el hecho de que el cristal es positivo; por lo tanto, $Bx_a = Z$. La normal óptica es Y , y $Bx_o = X$. Refiriéndolo de nuevo a las figuras que ilustran las formas de exfoliación, es patente la siguiente relación:

$$a = Z$$

$$b = Y$$

$$c = X$$

El ángulo $2V$, estimado con el microscopio, es aproximadamente igual al ángulo ya mencionado de $37^{\circ}30'$. Por tanto, el eje óptico forma un ángulo de $18^{\circ}45'$ con el eje a .

En los cristales rómbicos no siempre es la orientación tan simple como en el caso de la barita. Sin embargo, los principios y procedimientos son siempre esencialmente los mismos y también siempre es fundamental fijar las posiciones de X , Y y Z con respecto a a , b y c .

Sistema monoclinico. En los cristales monoclinicos, al eje b , corresponde X , Y o Z . Si, como es frecuente, Y corresponde a b , X y Z ocuparán posiciones a 90° en el plano de a y c .

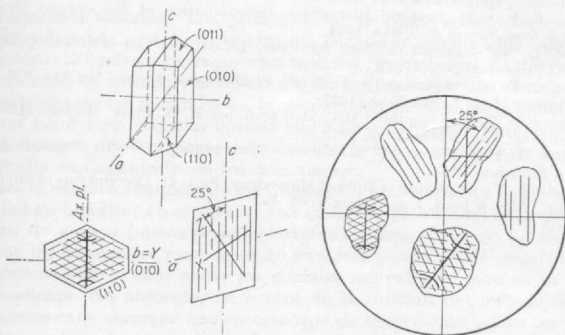


FIG. 8-37. Sección delgada y diagrama de orientación de hornblenda.

La hornblenda es un buen ejemplo para el problema de la orientación de un cristal monoclinico. El mineral tiene dos direcciones preferentes de exfoliación, paralelas al prisma rómbico $\{110\}$. El eje c es paralelo al corte entre las exfoliaciones, y el eje b biseca al ángulo entre (110) y $(\bar{1}\bar{1}0)$ (Figura 8-37). En las secciones delgadas aparece uno o dos juegos de líneas de exfoliación, dependiendo de la orientación. Los granos con dos direcciones de exfoliación tienen extinción simétrica y dan figuras de interferencia biaxiales negativas. El plano axial biseca al ángulo obtuso de la exfoliación, e Y biseca al ángulo agudo. Puede obtenerse la posición de Z a partir de una sección paralela al plano de los ejes a y c . La luz que vibra paralelamente a Z corresponde al rayo lento; con la lámina de mica se determina el ángulo de máxima extinción para el rayo lento. El ángulo de máxima extinción, para una sola exfoliación, es el ángulo entre Z y el eje c ; en la hornblenda es de 25° aproximadamente. Cuando se determina Z , se conoce el ángulo de X , ya que está a 90° de Z . Y es perpendicular al plano de Z y X .

Sistema triclinico. Cada cristal triclinico constituye un caso individual de orientación óptica. El centro del sistema óptico debe coincidir con el centro del sistema cristalográfico; pero, por otro lado, no son concordantes.

BIBLIOGRAFIA

- Grout, F. F.: «Petrography and Petrology», McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1932.
- Harker, A.: «Petrology for Students», 7.^a ed., Cambridge University Press, Londres, 1935.
- Heinrich, E. W.: «Microscopic Petrography», McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1956.
- Johannsen, A.: «Rock-forming Minerals in Thin Sections», John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1908.
- Kraus, E. H., W. F. Hunt y L. S. Ramsdell: «Mineralogy», 3.^a ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1936.
- Larsen, E. S. y H. Berman: Microscopic Determination of Non-opaque Minerals, *U. S. Geol. Survey Bull.* 848, 1934.
- Luquer, L. M.: «Minerals in Rock Sections», 4.^a ed., D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N. J., 1913.
- Rogers, A. F.: «Introduction to the Study of Minerals», 3.^a ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1937.
- Weinschenk, E.: «Petrographic Methods», trad. por R. W. Clark, McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, 1912.
- Williams, H., F. J. Turner y C. M. Gilbert: «Petrography», W. H. Freeman & Co., San Francisco, 1954.
- Winchell, A. N.: «Elements of Optical Mineralogy. Part. II: Descriptions of Minerals», John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1927.

CAPÍTULO 9

Fragmentos minerales

Fragmentos molidos. Los principios de la observación microscópica con luz polarizada se aplican igualmente cuando se estudian los minerales en secciones delgadas o en fragmentos molidos. Sin embargo, las diferencias en el método de montaje, el desarrollo de las fracturas y la distribución y orientación de los minerales en la preparación facilitan al estudiante el efectuar las determinaciones ópticas con más exactitud y facilidad sobre fragmentos que sobre secciones delgadas. Por lo tanto, suele ser aconsejable un estudio suplementario de los fragmentos.

Para el examen completo de los fragmentos molidos basta una pequeña cantidad de muestra; no se precisa una molienda preliminar; se emplea un mínimo de equipo (microscopio polarizante y una colección de líquidos índices); los fragmentos rompen según su forma y esto ayuda grandemente a su orientación; y cabe aislar los cristales individuales para su examen independiente. No obstante, en contra de la utilidad del método de los fragmentos cabe observar que en este tipo de observación faltan las magníficas muestras de asociaciones de minerales y las texturas observables en las secciones delgadas.

La utilización práctica de los fragmentos molidos para la identificación de los minerales fue intentada primeramente por Maschke en 1872, aunque no se desarrolló el método lo suficiente para ser empleado con amplitud hasta los últimos años. En 1898, Schroeder van der Kolk da una lista de fluidos adecuados para utilizarlos como líquidos de inmersión y en 1906 publica otra lista con una serie de líquidos más extensa junto con los índices refractivos de 300 minerales, determinados en comparación con estos líquidos; esto representó un gran avance. A. F. Rogers, E. S. Larsen, H. E. Merwin, C. S. Ross, F. E. Wright, H. Berman y otros autores han acumulado datos que incrementan grandemente la aplicación del método. Quizás el mayor impulso haya sido aportado por Larsen en su «Microscopic Determination of the Non-opaque Minerals».

Métodos de montaje. Los montajes permanentes se preparan con bálsamo del Canadá: se esparcen los fragmentos sobre un portaobjetos y se cubre con bálsamo, después se tapan con un cubreobjetos. Esto puede hacerse en pocos minutos y cabe marcar el portaobjetos para archivarlo.

Los montajes temporales pueden realizarse utilizando cualquiera de los líquidos inertes empleados en la determinación de los índices de refracción. Para los trabajos de rutina son preferibles fragmentos tamizados,

pero si este tamizado no es posible, pueden obtenerse fragmentos del tamaño adecuado colocando una pequeña cantidad de mineral entre dos portaobjetos y frotando uno contra otro hasta que deslicen suavemente sobre el polvo mineral. Se colocan sobre un portaobjetos limpio tan pocos fragmentos como pueden cogerse con la punta de una pequeña navaja; golpeando el borde del portaobjetos con la navaja, se distribuyen los fragmentos en un área de 6 mm². Entonces se coloca el cubreobjetos sobre los granos y se aplica una gota de bálsamo, empleando una varilla de vidrio, en el borde del cubreobjetos; fluye el aceite hacia el interior y, por efecto capilar, rodea los granos (Figura 9-1). Si no es suficiente una sola gota de aceite, puede aplicarse una segunda o una tercera gota hasta que los fragmentos estén totalmente bañados. Sin embargo, debe cuidarse el no aplicar aceite

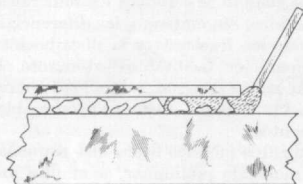


Fig. 9-1. Inmersión de granos minerales.

en exceso, pues pueden flotar los granos, lo que estorbaría las observaciones y medidas. Con suficiente cuidado, pueden realizarse dos o tres montajes sobre un mismo portaobjetos. Después de utilizado, puede limpiarse el portaobjetos con alcohol, aclarándose después con agua y secándolo.

No quiere decirse que las preparaciones temporales estén restringidas a polvo fino: pequeños cristales bien formados, granos detríticos,

fragmentos gruesos y secciones o exfoliaciones orientadas representan a los materiales que pueden examinarse al microscopio en una variedad de posiciones. Un débil movimiento del portaobjetos basta generalmente para girar los fragmentos en una preparación temporal; siendo esto algo más fácil si se mezcla con la muestra polvo de cristal ligeramente más grueso que los fragmentos. Los fragmentos de vidrio no presentan ningún crucero y permanecen en cualquier posición girando fácilmente y moviendo los fragmentos de muestra al mismo tiempo. El vidrio se diferencia fácilmente por su carácter isotrópico e índice de refracción.

Un microscopio binocular es particularmente eficaz para aislar pequeños cristales o granos minerales (Figura 9-2). Cuando se miran a través del binocular, pueden separarse con una aguja y formar así muestras ideales para su examen con el microscopio polarizante, bien en preparaciones temporales o permanentes.

Método de inmersión. En inmersión, se colocan al microscopio los fragmentos minerales en un líquido de índice conocido y pueden utilizarse la refracción de la luz observada en el borde de los fragmentos como índice de comparación.

Los fragmentos examinados pueden mostrar una gran diversidad en su tamaño. En general, son satisfactorios los fragmentos que pasan a través de la criba de 100 mallas standard y son retenidos por la de 120 mallas. Las determinaciones de los índices de refracción de los minerales es un proceso de rutina. Dado que se conoce el índice de refracción del líquido,

cabe utilizar para comparar el índice de refracción de los fragmentos minerales con el de dicho líquido, tanto el método de la iluminación central como el de iluminación oblicua. En cuanto se determina que el índice de refracción del mineral es mayor o menor que el del líquido, se coloca el portaobjetos en un vaso lavador y se monta otra preparación utilizando un líquido de índice diferente. Empleando un cierto número de líquidos y anotando las comparaciones repetidas cabe acertar, entre límites razonablemente estrechos, los índices de refracción de cualquier mineral. En

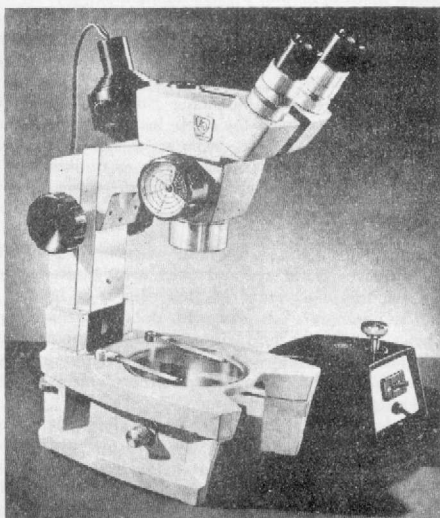


Fig. 9-2. Microscopio binocular. (Cortesía de American Optical Co.)

el caso de que el mineral sea isotrópico, teniendo solo un índice de refracción, es habitual el determinar el índice del mineral con dos o tres cifras decimales. Cuando el mineral es anisótropo, cuando sus índices de refracción varían con la dirección, es posible una exactitud igual, pero para determinar los distintos valores se precisan más comparaciones. Se suele preparar una serie de líquidos con índices de refracción 1,450, 1,455, 1,460, 1,465, ... hasta 1,740. Para estos líquidos se necesita un número considerable de frascos, que se conservan generalmente en sitio oscuro y se pintan exteriormente de negro para preservarlos de la luz. También se usa frecuentemente la serie de líquidos, menos complicada, de valores: 1,50, 1,51, 1,52, 1,53, ..., etc. Esta serie requiere la mitad de frascos, se clasifica más rápidamente y, con una cuidadosa mezcla de las gotas en el portaobjetos, asegura resultados hasta $\pm 0,003$.

No siempre es aconsejable colocar el cubreobjetos sobre fragmentos secos y dejar que el líquido moje los granos de alrededor por atracción capilar, tal como se ha explicado anteriormente. Para fijarnos en un caso particular: puede desearse establecer el índice de refracción de un mineral comprendido entre los valores de dos líquidos tales como 1,555 y 1,560. En este caso, se coloca sobre el portaobjetos una gota de líquido 1,555 y se coloca cerca otra próxima a la primera, pero sin tocarla de líquido 1,560. Entonces, se esparce el polvo mineral entre ambas gotas y se mezclan éstas con el polvo utilizando una aguja, un alambre fino o una pequeña varilla. Se pone después un pequeño cubreobjetos sobre la mezcla, se prensa ligeramente para eliminar las partículas de aire y queda lista la preparación para su examen microscópico. El índice del líquido mezclado debe estar próximo a 1,5575.

Determinación del índice por inmersión. En los minerales hexagonales o tetragonales se determinan n_e y n_{ω} ; en los rómbicos, monoclinicos y triclinicos, n_a , n_{β} y n_{γ} . Debe recordarse en estas determinaciones que cada grano mineral del campo del microscopio es doblemente refractante con valores n_2 y n_1 . Y además, que cuando un cristal está en posición de extinción, los planos de vibración de n_2 y n_1 son paralelos a los planos de vibración de los nicoles.

La determinación de n_e y n_{ω} , o n_a y n_{γ} , se resuelve generalmente tanteando líquidos sucesivos hasta que se localicen los límites superior e inferior de n_2 y n_1 . La diferencia entre los dos valores es igual a la máxima doble refracción del mineral. No obstante, debe recordarse que la exfoliación o la estructura pueden limitar las posiciones que adopte el mineral sobre el portaobjetos. En estos casos, no pueden obtenerse los dos extremos sin girar los fragmentos, moviendo el cubreobjetos, o empleando las figuras de interferencia como orientación.

La determinación de n_{β} en los minerales biáxicos puede enfocarse por dos caminos. Si cabe obtener, para varios granos dentro de distintos líquidos, figuras de interferencia próximas a la bisectriz o a un eje óptico, la determinación de n_{β} es sencilla. Esto se debe a que el índice del rayo que vibra normalmente al plano axial es n_{β} . Siendo conveniente recordar asimismo que cualquier grano mineral en una posición tal que dé figuras de eje óptico producen en todas direcciones rayos con índice n_{β} . Si no es posible obtener tales figuras y se desconoce cualquier información sobre la posición de n_{β} en los fragmentos, cabe aun determinar este valor por un proceso de eliminación como se explica a continuación.

Para cada fragmento visible en el campo del microscopio, siempre se encuentra n_{β} entre n_1 y n_2 . Cabe que, en ciertos fragmentos, ya n_2 o ya n_1 sea igual a n_{β} , pero la consideración de los cristales biáxicos muestra que ambos valores pueden aproximarse, pero nunca sobrepasar juntos, a n_{β} , en un mismo fragmento. Así, cabe localizar n_{β} variando los líquidos y observando la pareja n_2 y n_1 en un cierto número de fragmentos. En la Figura 9-3 se supone que las líneas verticales son los índices refractivos de un cierto mineral y que las horizontales abarcan los índices de refracción de varios granos que tengan diferentes valores de n_2 y n_1 . Se observa que todas las líneas cruzan o tocan a 1,680, éste es el valor de n_{β} ; también, que

las líneas no exceden de 1,699, que es el valor de n_γ ; y que no bajan de 1,662, valor de n_α . Si se ensayan fragmentos con débil refracción con líquidos sucesivos, ensayando en cada caso juntamente n_1 y n_2 , cabe aproximar el valor de n_β entre límites estrechos.

Es conveniente recordar, como una confirmación de la determinación del signo óptico, que cuando $(n_\beta - n_\alpha)$ es mucho mayor que $(n_\gamma - n_\beta)$ el mineral es ópticamente negativo; y, por el contrario, que cuando $(n_\beta - n_\alpha)$ es francamente menor que $(n_\gamma - n_\beta)$, el mineral es positivo.

Forma de los fragmentos minerales. A menudo, los fragmentos minerales al microscopio muestran formas características que son extremadamente útiles para su identificación. Tales formas pueden deberse a la exfoliación de los cristales del mineral o a un crecimiento característico

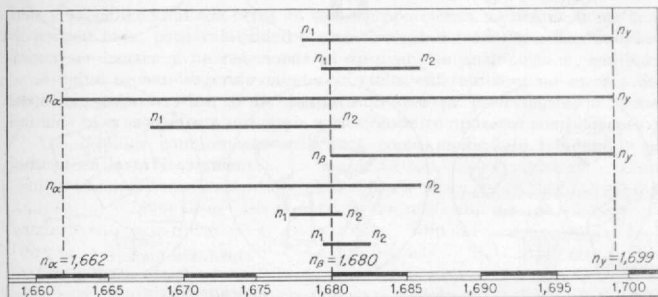


FIG. 9-3. Determinación de n en fragmentos irregulares no orientados.

que origina fragmentos peculiares o a que los cristales sean tan pequeños que aparezcan como individuales al microscopio.

Probablemente, la forma de los minerales en los fragmentos molidos está principalmente relacionada con la exfoliación. Esta es la facilidad de un mineral para romperse en partículas cada vez más pequeñas con superficies planas que son paralelas a las posibles caras del cristal, de lo que se deduce que ésta es una característica que puede ser tan evidente en los fragmentos como en una muestra manual. Los minerales pueden presentar exfoliación en una, dos, tres y, aún, en cuatro y seis direcciones (Figura 9-4). La identificación de los planos de exfoliación de unos fragmentos minerales puede ser facilitada por el hecho de que dichos fragmentos frecuentemente se orientan por sí mismos con una de las superficies de exfoliación, paralela a la superficie del portaobjetos. Así, si un mineral tiene una dirección principal de exfoliación, da normalmente fragmentos planos con bordes desiguales o rotos. Bajo nicoles cruzados, si el mineral es anisótropo, la superficie plana mostrará un solo color de interferencia y en los bordes se verán bandas de color. Si el mineral tiene dos direcciones de exfoliación, una de ellas será probablemente sobre la que descansa y la otra originará bordes paralelos o verticales; siendo así

si la exfoliación es perpendicular. Sin embargo, si la exfoliación se efectúa en un ángulo inclinado, aparecerán bordes biselados.

La influencia de la exfoliación u otras separaciones direccionales a lo largo de planos lisos se ve en la Figura 9-4. Los dibujos que correspon-



FIG. 9-4. Exfoliación y fractura de los fragmentos. (a) Una dirección; placas irregulares (no ilustrada). (b) Dos direcciones; ortoclase, augita y hornblenda. (c) Tres direcciones; cianita, anhidrita (rectangular), calcita (romboédrica). (d) Cuatro direcciones; fluorita (octaédrica). (e) Sillimanita-prismática. (f) Acicular; natrolita.

den a fragmentos exfoliados se han idealizado. En un campo que contenga muchos fragmentos rotos, solamente unos pocos corresponderán indudablemente a la forma idealizada; la mayoría, sin embargo, mostrará solo parte de un máximo desarrollo de la exfoliación. Aun los minerales que se sabe que tienen una excelente exfoliación dan lugar a un gran número de fragmentos irregulares cuando se rompen.

Además de los planos, verticales o inclinados, de exfoliación que modifican los fragmentos minerales, cabe observar formas debidas a características originales de cristalización. Por ejemplo, el asbesto produce fibras semejantes a hilos. Las formas minerales aciculares o de forma de aguja originan frecuentemente fragmentos formados por haces de cristales alargados delgados. Las finas láminas de mica pueden mostrar a un tiempo láminas planas y de forma de aguja. Cuando las láminas son inelásticas, pueden resultar placas curvas u onduladas.

El conocimiento de la exfoliación de los fragmentos es necesario para utilizar el método de inmersión en la determinación de los índices de refracción.

Medios de inmersión. Los líquidos a emplear como medios de inmersión deben ser incoloros, tan inodoros como sea posible, químicamente estables y miscibles unos con otros en todas proporciones. Deben de tener una dispersión baja, poca volatilidad y una viscosidad moderada. Los líquidos deben ser inertes y no reaccionar ni disolver las sustancias a ensayar.

Aunque se han sugerido muchos líquidos diferentes como medios de inmersión satisfactorios, se ha encontrado que es preferible unos pocos líquidos bien escogidos a una gran variación de compuestos complicados.¹

Los líquidos comúnmente utilizados como medios de inmersión, se indican en la tabla siguiente:

<i>Líquido</i>	<i>Índice de refracción aproximado</i>
Agua.....	1,333
Isoamil isovalerato ¹	1,428
Keroseno ²	1,466
Aceite de petróleo.....	1,475
α -monobromonaftaleno ³	1,658
Yoduro de metileno ⁴	1,740
Solución de yoduro de metileno y azufre hasta.....	1,794

¹ Eastman Kodak Co., Rochester, N.Y., U. S. A.

² Un producto limpio altamente refinado, que tiene el valor indicado más arriba, es vendido, con el nombre de *government oil*, por Leeds & Northrup Co., U. S. A.

³ Numerosos investigadores han encontrado que el monocloronaftaleno, o *halowax oil* ($n = 1,63$), es igualmente satisfactorio y más económico. Lo vende la Bakelite Corp.

⁴ Edcan Laboratories, 12 Pine St., South Norwalk, Conn., U. S. A.

En la preparación de estos líquidos pueden mezclarse, para obtenerlos, con índices de refracción hasta 1,466, el isoamil isovalerato y el keroseno; éste y el «halowax oil» (aceite de madera) forman mezclas entre 1,466 y 1,63; este aceite de madera y el yoduro de metileno se mezclan para dar líquidos con índices entre 1,63 y 1,74. Existen dificultades para encontrar los líquidos adecuados para dar índices por debajo de 1,43; pero dado que más de cuarenta minerales y muchas sustancias inorgánicas tienen índices de refracción inferiores a este valor, son necesarios los líquidos de este orden. Los experimentos con los destilados del petróleo han demostrado

¹ Pueden obtenerse líquidos adecuados para las determinaciones de los índices de refracción por el método de inmersión en R. P. Cargille Laboratories, Inc. 117 Liberty St., Nueva York, N.Y., U. S. A.

que fraccionando, con puntos de ebullición comprendidos entre límites estrechos, ligroina, gasolina y keroseno se obtienen líquidos con índices comprendidos entre 1,548 y 1,593 a 22 °C.

También se ha demostrado que el etilpropionato y el mesityleno son miscibles en todas proporciones formando satisfactoriamente medios índices comprendidos entre 1,385 y 1,43.

Los líquidos convenientes con índices de refracción por encima de 1,74 constituyen, también, un problema. Se ha utilizado, para valores desde 1,74 hasta 1,78, yoduro de metileno que contenga azufre disuelto; para valores entre 1,78 y 1,84, se ha empleado fenil-diiodo-arsina ($n = 1,84$) mezclada con yoduro de metileno. C. D. West, ha descrito una serie de líquidos de alto índice formados por fósforo, azufre y yoduro de metileno que cubren los órdenes entre 1,78 y 2,06; estos líquidos son baratos, prácticamente estables y seguros si se manejan con las precauciones adecuadas.

L. H. Borgström ha descrito también una serie de líquidos de índice elevado, que abarcan valores comprendidos entre 1,78 y 1,95, compuestos por bromuro de arsénico, sulfuro de arsénico y yoduro de metileno.

Se han usado, para las determinaciones de índices altos, mezclas fundidas de azufre y selenio (2,05 a 2,72) o piperina y triyoduros de arsénico y antimonio (1,68 a 2,10). Estas fusiones se preparan con antelación y se ordenan en una serie de mezclas. Los valores de los índices de estas mezclas se determinan por el método del prisma: se fabrica un pequeño prisma que se monta sobre la platina de un goniómetro, midiéndose conjuntamente el ángulo del prisma y el de mínima desviación y determinándose entonces el índice de refracción como se explicó anteriormente al tratar de este método. Se moldean las sustancias fundidas en forma de prisma, empleando dos cubreobjetos formando un ángulo de 30°, en cuyo interior se vierte la mezcla fundida que se deja enfriar. Cuando ya está fría, se quitan, rompiéndolos, los cristales cubreobjetos que dejan un prisma con las superficies pulidas. Debe tenerse gran cuidado en no sobrecalentar, pues, entonces, los índices de las mezclas de piperina varían considerablemente. Una vez determinado el índice de la mezcla, se la coloca en un tubo lacrado y se archiva para su futuro empleo. Cuando se utiliza, se funde el material, anteriormente preparado alrededor de los fragmentos de mineral y se comparan los índices por el método de iluminación central.

Larsen y Meyrowitz han efectuado una amplia investigación de los medios de alto índice adecuado para el trabajo con los minerales. Azufre precipitado en tribromuro de arsénico se ha utilizado, mezclado en diversas proporciones con yoduro de metileno, para formar una serie de líquidos de inmersión de alto índice entre 1,74 y 1,81; siendo estos líquidos estables y razonablemente duraderos. La curva de mezcla no es una línea recta, pero puede considerarse como tal. Entre 1,82 y 2,00 se han preparado soluciones con los elementos finales siguientes: (1) azufre precipitado, 10 por ciento, en tribromuro de arsénico, (2) azufre precipitado, 20 por ciento, y disulfuro de arsénico en tribromuro de arsénico, 60 por ciento. La curva de mezcla es una línea recta.

Normalización y cuidado de los líquidos. Los índices de refracción de los líquidos normales se determinan de acuerdo con los métodos de deter-

minación de los índices refractivos anteriormente mencionados. Los refractómetros standard son adecuados para índices hasta 1,7; el goniómetro y el prisma pueden emplearse para cualquier orden, incluso con mezclas fundidas. Los líquidos deben ser normalizados para la temperatura a la que se utilizan, dado que hay cambios en el índice de un líquido con las variaciones de temperatura; en general, el aumento de temperatura, hace descender el índice del líquido. Esta variación es aproximadamente de 0,0004 por grado centígrado en los líquidos con índices por bajo de 1,658, pero para el yoduro de metileno llega a ser de 0,007 por grado.

Para preparar un líquido de un determinado índice por mezcla de dos líquidos de índice conocido, conviene la fórmula siguiente:

$$V_1 n_1 + V_2 n_2 = V_x n_x$$

en la que V representa volumen, n índice y $V_x n_x$ el volumen y el índice deseado. Por ejemplo, sea el volumen de $n_1 = V_1$ y el volumen de $n_2 = V_2$, $n_1 = 1,4$, $n_2 = 1,65$ y $V_x n_x = 20$ cm³ de índice 1,5. Las dos ecuaciones pueden escribirse como sigue:

$$1,4 V_1 + 1,65 V_2 = 30$$

$$V_1 + V_2 = 20$$

y, resolviendo,

$$V_2 = 8$$

$$V_1 = 12$$

Por tanto, 8 cm³ de líquido de índice 1,65 y 12 cm³ de líquido 1,4 darán 20 cm³ de un líquido con un índice de 1,5. Se ha encontrado que, para las mezclas de yoduro de metileno, se necesita ligeramente más yoduro del que indica la fórmula.

Es importante, para garantizar el trabajo, proteger los líquidos de la luz y de la evaporación. Para el almacenamiento son preferibles los frascos oscuros (de 15 a 20 cm³) con tapón aplicador de cristal y tapa de vidrio. Resulta un recipiente seguro y adecuado para una serie completa una caja de madera en la que se ha adaptado un bloque con orificios redondos en los que encajan las botellas. Cuando los líquidos están en uso, debe cuidarse de mantener los frascos tapados, excepto cuando se utilice en ese momento el aplicador.

BIBLIOGRAFIA

- Borgström, L. H.: Contribution to the Development of the Immersion Method, *Bull. comm. géol. Finlande* 87, págs. 58-63, 1929.
- Glass, J. J.: Standardization of Index Liquids, *Am. Mineralogist*, vol. 19, págs. 459-465, 1934.
- Kaiser, E. P. y W. Parrish: Preparation of Immersion Liquids, *Ind. Eng. Chem., anal. ed.*, vol. 11, págs. 560-562, 1939.
- Larsen, E. S. y H. Berman: The Microscopic Determination of the Nonopaque Minerals, *U. S. Geol. Survey Bull.*, 848, 1934.
- Larsen, Esper S., Jr., y Robert Meyrowitz: Immersion Liquids of High Refractive Index, *Am. Mineralogist*, vol. 36, págs. 746-750, 1951.

- Maschke, O.: Über Abscheidung krystallisirter Kieselsäure aus wässrigen Lösungen, *Pogg. Ann.*, 5.^a ser., vol. 25, págs. 549-578, 1872.
- Merwin, H. E.: Media of High Refraction, etc., *Am. J. Sci.*, vol. 34, págs. 42-47, 1912.
- : Media of Lower Refraction, *J. Wash. Acad. Sci.*, vol. 3, págs. 35-40, 1913.
- Meyrowitz, Robert: A Compilation and Classification of Immersion Media of High Index of Refraction, *Am. Mineralogist*, vol. 40, págs. 398-409, 1955.
- : A New Series of Immersion Liquids, *Am. Mineralogist*, vol. 37, págs. 853-856, 1952.
- : Solvents and Solutes for the Preparation of Immersion Liquids of High Index of Refraction, *Am. Mineralogist*, vol. 41, págs. 49-59, 1956.
- Rogers, A. F.: The Determination of Minerals in Crushed Fragments by Means of the Polarizing Microscope, *Quart., Columbia School Mines*, vol. 27, págs. 340-359, 1906.
- Schroeder van der Kolk, J. L. C.: «Tabellen zur mikroskopischen Bestimmung der Mineralien nach ihrem Brechungsindex», Wiesbaden, 1906.
- Switzer, George: Butyl «carbitol» as an Immersion Liquid, *Am. Mineralogist*, vol. 29, págs. 389-391, 1944.
- West, C. D.: Immersion Liquids of High Refractive Index, *Am. Mineralogist*, vol. 21, págs. 245-249, 1936.
- Wright, F. E.: The Methods of Petrographic-microscopic Research, *Carnegie Inst. Pub.* 158, 1911.

CAPITULO 10

Identificación sistemática

Tablas. La identificación de las especies minerales incluye procedimientos que han de repetirse muchas veces aunque se examinen solamente unas pocas secciones delgadas. Si se adopta una marcha sistemática, pueden evitarse muchos esfuerzos inútiles. Las Tablas 10-1 a 10-10 están dispuestas en una sucesión progresiva que exige, en primer lugar, sólo la simple observación y, por último, operaciones más complicadas, según el siguiente esquema:

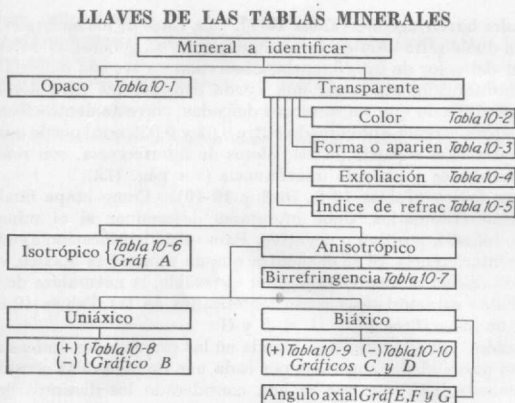


FIG. 10-1.

Minerales opacos (Tabla 10-1). Conviene, como primer paso, observar si un mineral es opaco o transparente. A veces, se encuentran zonas con minerales opacos, las cuales se iluminarán desde encima de la platina y se identificarán por referencia a la Tabla 10-1. Sin embargo, para los minerales opacos, se recurre, con mayor frecuencia, a métodos mineralógicos convencionales que quedan fuera del plan de este texto.

Minerales transparentes (Tablas 10-2 a 10-10). Primordialmente, estas tablas están ideadas para minerales transparentes en secciones delgadas; pero, con dos excepciones (Tablas 10-1 y 10-3), son aplicables en la mayoría de los casos tanto a fragmentos minerales como a secciones delgadas.

El orden sistemático de observación para cada mineral transparente es: (1) color, (2) apariencia o forma, (3) exfoliación, (4) índice de refracción y (5) anisotropismo. Cuando alguna de estas características parezca significativa, se consultará la tabla adecuada.

Si el mineral es coloreado, obsérvese también si es pleocroico o no pleocroico; si lo es, obsérvense los colores de pleocroísmo. Si el mineral se presenta con alguna apariencia característica, compáresele con las apariencias y formas reseñadas. La presencia de exfoliación debe llevar a compararlos con los tipos indicados en las tablas. Los cristales alargados pueden ensayarse sobre su elongación positiva o negativa. Si es posible obtener de las exfoliaciones alguna indicación de la orientación, debe tenerse esto en cuenta.

Minerales isotrópicos (Tabla 10-6). El grupo de los minerales isotrópicos es pequeño y, probablemente, podrá reconocerse el mineral directamente si se tiene en cuenta el color, la exfoliación y el índice de refracción relativo.

Minerales birrefringentes (Tabla 10-7). La clase de los minerales anisótropos con doble refracción es muy amplia; pero, en general, el orden de la intensidad del color de interferencia, observado en sección delgada de un mineral desconocido, puede ser una ayuda considerable para determinar dicho mineral. Dado que las secciones delgadas, correctamente efectuadas, deben tener un espesor aproximado entre 0,03 y 0,035 mm, puede estimarse la doble refracción a partir de los colores de interferencia, con referencia a la lámina de los colores de interferencia (ver pág. 163).

Carácter óptico (Tablas 10-8, 10-9 y 10-10). Como etapa final en la identificación sistemática, debe intentarse determinar si el mineral es uniaxial o biaxial, positivo o negativo. Para esta identificación ayudan las figuras de interferencia. Si se encuentra que un mineral es biaxial, es conveniente establecer el ángulo axial y, si es posible, la naturaleza de la dispersión. Estas características están sintetizadas en las Tablas 10-8, 10-9 y 10-10 y en los gráficos B, C, D, E, F y G.

Conclusión. La identificación basada en las propiedades ópticas dependerá de las posibilidades sugeridas por cada una de las tablas consultadas. Frecuentemente, una vez que se han considerado los distintos criterios abarcados por las tablas, quedan varias posibilidades, las cuales pueden investigarse posteriormente consultando las descripciones de los minerales de la Parte Segunda, en la que se encuentran datos más completos. Pueden utilizarse los fragmentos minerales para la determinación del índice refractivo, tal como se ha descrito en el Capítulo 9, y datarlos por aplicación de la Tabla 10-5. Las asociaciones minerales y sus proximidades, como se describirán más adelante, son a menudo útiles.

La experiencia ha mostrado que las tablas son adecuadas para la identificación rutinaria de la mayoría de los minerales comunes que se encuentran en las secciones delgadas. Como una nueva ayuda para la identificación

sistemática, se sugiere el siguiente esquema de procedimiento para los minerales transparentes anisotrópicos:

ESQUEMA PARA LA IDENTIFICACION

(Minerales transparentes *)

Descripción del mineral

Color.....	Colores pleocroicos
Forma	
Exfoliación.....	Elongación.....
	Extinción
Índice de refracción	Relieve en el bálsamo.....
+ o — bálsamo.....	Comparado a otros minerales
Birrefringencia.....	de la sección.....

Minerales posibles sugeridos por las Tablas 10-2, 10-3, 10-4, 10-5 y 10-7

10-2.....	10-3	10-4
10-5.....	10-7.....	

Carácter óptico

Uniaxial +	—	Biaxial +	—	2V estimado.....
				Dispersión.....

Orientación óptica dada.....

Identificación del mineral según las Tablas 10-8, 10-9 y los Gráficos B, C, D, E, F y G.

Minerales asociados.....

Conclusión (comprobada por referencia a la descripción de los minerales de la Parte 2.ª)

.....

* Los minerales opacos pueden identificarse por medio de la Tabla 10-1.

TABLA 10-1. MINERALES OPACOS

Color con luz reflejada	Mineral	Particularidades
Negro.....	Grafito, C.....	Frecuentemente se presenta en escamas delgadas o partículas aisladas con exfoliación micácea. La materia carbonosa puede presentarse en forma de pequeñas inclusiones negras.
Amarillo latón.....	Pirita, FeS_2	Los cristales euhédricos son comunes, con secciones cuadradas, triangulares o rectangulares. Exfoliación indistinta o ausente. Relieve alto debido a la dureza.
Bronce o rojo cobre	Pirrotina, FeS(S)	Se encuentra en masa y, ocasionalmente, en cristales tabulares. Partición basal paralela a {0001}. De color más oscuro que la pirita.
Amarillo latón fuerte.....	Calcopirita, CuFeS_2	Se encuentra en masas y, ocasionalmente, en cristales euhédricos. Amarillo más oscuro que la pirita y con menor relieve.
Azul acero, rojo o negro.....	Hematites, Fe_2O_3	Rojo sangre en los bordes translúcidos. A veces muestra partición. Se encuentra en cristales euhédricos y en masas.
Negro violeta.....	Ilmenita, FeTiO_3	Más violeta o púrpura que la hematites. Partición basal y, comúnmente, cristales laminares. A menudo se encuentra con magnetita.
Negro azulado acero.....	Magnetita, $\text{Fe}^{\text{II}}\text{Fe}_2^{\text{III}}\text{O}_4$	Los cristales octaédricos (ocasionalmente dodecaédricos) son comunes. El mineral puede tener partición octaédrica. Frecuentemente es un mineral primario.
Negro hierro o negro parduzco....	Cromita, $(\text{Fe, Mg})(\text{Cr, Al, Fe})_2\text{O}_4$	Usualmente pardo en los bordes delgados. Con frecuencia se la encuentra con serpentina.
Pardo amarillo.....	Limonita, $\text{H}_2\text{Fe}_2\text{O}_4(\text{H}_2\text{O})_x$	Son comunes los agregados pisolíticos, porosos y masivos. Los bordes delgados, transparentes, oscurecen entre nicoles cruzados.
Blanco.....	Leucoxeno, TiO_2 , etc.....	Una alteración opaca, blanca y de grano fino, producto de los minerales primarios de titanio.



TABLA 10-2. MINERALES COLOREADOS

		Rojo	Rosa pálido	Anaranjado	Pardo	Amarillo
Isotrópico no pleocroico	Isométrico	<i>Blenda</i> <i>Espinela</i> <i>Claquita</i> Perovsquita	<i>Sodalita</i> <i>Fluorita</i> Perovsquita Granate	 Perovsquita	 <i>Blenda</i> <i>Fluorita</i> <i>Espinela</i> <i>Colofana</i> <i>Claquita</i> Perovsquita Granate	<i>Sodalita</i> <i>Blenda</i> <i>Fluorita</i> <i>Espinela</i> <i>Colofana</i> <i>Granate</i>
	Uniaxial (+)	 Rutilo			 Circonio Casiterita Rutilo	 Circonio Casiterita Rutilo [Cloritoide]
	(-)		<i>Corindón</i>		[Biotita] Dravita Stilpnomelana Turmalina <i>Apatito</i>	[Biotita] Dravita Stilpnomelana Escorolita <i>Turmalina</i> Jarosita
Anisotrópico pleocroico	Biaxial (+)	Piedmontita	<i>Piedmontita</i> Titanita <i>Estaurolita</i> <i>Clinocloro</i>	<i>Piedmontita</i> <i>Estaurolita</i>	<i>Titanita</i> <i>Monacita</i> Egirina-augita Condrodita Perovsquita	Piedmontita Titanita Estaurolita Monacita Cloritoide <i>Clinocloro</i> Egirina-augita Condrodita
		Perovsquita	Perovsquita	Perovsquita		
	(±)	Iddingsita			Iddingsita	
	Biaxial (-)	<i>Allanita</i>	Hiperstena Andalucita Dumortierita		Biotita Allanita Flogopita Basáltico Hornblenda <i>Egirina</i> <i>Hiperstena</i> Hornblenda	Biotita Epidoto <i>Glaucofana</i> Allanita Flogopita Actinolita <i>Glaucónita</i>

Nota: Los caracteres *italicos* indican ejemplos menos frecuentes; los corchetes, ejemplos ocasionales. Los minerales, normalmente pleocroicos, pueden inducir a error por la variación de su color con la rotación en

TABLA 10-2. MINERALES COLOREADOS. (Continuación)

		Verde	Azul	Violeta	Gris	Negro
Isotrópico no pleocroico	Isométrico	Fluorita Espinela <i>Perovskita</i> <i>Granate</i>	Sodalita Fluorita Espinela Lazurita	Fluorita <i>Perovskita</i>	<i>Sodalita</i> <i>Claquita</i> <i>Perovskita</i>	Espinela <i>Granate</i>
	Uniaxial (+)	<i>Rutilo</i> [Cloritoide] [Clorita]	<i>Rutilo</i> [Cloritoide] [Clorita]	<i>Rutilo</i>	<i>Circonio</i> <i>Casiterita</i> <i>Rutilo</i>	
	(-)	[Biotita] Stilpnomelana Escorolita <i>Turmalina</i> <i>Apatito</i>	Escorolita Corindón <i>Apatito</i>	Escorolita Corindón	Escorolita <i>Apatito</i>	Escorolita
Anisotrópico pleocroico ¹	(+)	<i>Esfena</i> Cloritoide Clorita Egirina-augita <i>Perovskita</i>	Cloritoide	Piedmontita <i>Perovskita</i>	<i>Esfena</i> <i>Perovskita</i>	<i>Esfena</i>
	(±)	Crocidolita Clorita Riebeckita	Crocidolita Clorita Riebeckita	<i>Crocidolita</i>		
	Bláxico	Biotita Epidoto	<i>Epidoto</i> Glaucófana	Glaucófana	<i>Glaucófana</i>	
	(-)	Lamprofilita Egirina Hiperstena Actinolita Glaucionita Hornblenda	Dumortierita <i>Cordierita</i> Lazurita	Dumortierita		<i>Egirina</i> <i>Glaucionita</i>

circunstancias excepcionales.

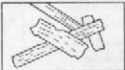
TABLA 10-3. FORMA¹

Minerales encontrados en cristales euhédricos

cc = muy comunes c = comunes r = raros rr = muy raros

Isométrico	Tetragonal	Hexagonal	Ortorómbico	Monoclínico	Triclínico
Pirita c Fluorita r Espinela r Magnetita c Perovskita c Leucita cc Sodalita c Häfyna c Granate cc Analcima r	Rutilo c Casiterita c Melilita c Idocrasa c Circonio c Escapolita r	Cuarzo c Corindón c Calcita r Dolomita r Jarosita rr Alunita rr Apatito cc Dalita c Cancrinita r Turmalina r Chabasita c Nefelina r	Celestina r Forsterita c Olivino c Fayalita c Monticellita c Topacio r Andalucita r Zoisita r Estaurolita c Lawsonita r Dumortierita r	Gibbsita r Monacita r Lazulita rr Ortoclasa c Sanidina cc Adularia c Egirina-augita c Isopodumena c Jadeita rr Lamprofilita cc Esfena c Epidoto c Piroxeno c Anfíbolita c	Microclina r Plagioclasea c

Forma de los cristales individuales

 Cristales uniformes	 Aciculares	 Listonados	 Columnares
Fluorita Cuarzo Periclasa Rutilo Casiterita Espinela Magnetita Cromita Anhídrita Apatito Leucita Sodalita Häfyna Melilita Forsterita Olivino Fayalita Condrodita Granate Círcón Topacio Andalucita Axinita Allanita Cordierita Esfena Lawsonita Glauconita Analcima	Rutilo Aragonito Sillimanita Dumortierita Turmalina Estilbita Natrolita	Ilmenita Aragonito Barita Celestina Yeso Egirina Mullita Dumortierita Turmalina Epidoto Piedmontita Prehnita Pirofillita Cianita	Cuarzo Corindón Ortoclasa Sanidina Microclina Amortoclasa Plagioclasea Nefelino Cancrinita Piroxeno Espodumeno Wollastonita Anfíbol Glaucófano Berilo Escapolita Idocrasa Topacio Cianita Zoisita Clinzoisita Estaurolita Micas Cloritas Barita

¹ Tal como se observa en las secciones delgadas.

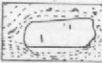
TABLA 10-3. FORMA (Continuación)

Forma de los agregados cristalinos

				
Granular	Fibrosa	Acicular	Listonada	Foliada
Cuarzo Calcedonia Gibbsita Calcita Dolomita Magnetita Siderita Barita Celestina Anhidrita Yeso Polihalita Alunita Jarosita Dahllita Olivino Epidoto Caolinita Halloysita Montmorillonita Analcima	Brucita Yeso Polianita Jadeíta Wollastonita Antrofilita Tremolita-actinolita Cummingtonita Grunerita Nefrita Riebeckita Sillimanita Prehnita Sepiolita Antigorita Crisótilo Mesolita Pirofilita	Aragonito Dumortierita Turmalina Estilbita Natrolita Thomsonita Escolecita	Feldespato Hedenbergita Jadeíta Wollastonita Tremolita-actinolita Grunerita Glaucófana Berilo Escapolita Topacio Andalucita Turmalina Zoisita Clinozoisita Epidoto Piedmontita Estaurolita Biotita Thomsonita Escolecita Idocrasa Escapolita Dumortierita Aragonito	Grafito Hematites Brucita Muscovita Biotita Estilpnomelano Flogopita Lepidolita Proclorita Clinocloro Pennina Cloritoide Antrofilita Iddingsita Talco Pirofilita Caolinita Montmorillonita Dickita Hidromuscovita
				
Radiada	Esferulítica	Cementada	Intercalaciones gráficas	Cristales incipientes
Dahllita Cummingtonita Escorlita (Turmalina) Proclorita Pirofilita Natrolita Calcedonia Gibbsita Thomsonita Aragonito Estilbita Dumortierita	Calcedonia Cristobalita Calcita Siderita Dahllita Ortoclasa Prehnita	Gibbsita Antigorita	Cuarzo-feldespato Cuarzo-estaurolita Cuarzo-actinolita Nefelino-feldespato Corindón-andalucita Vidrio-leucita	Cristobalita en vidrios

TABLA 10-3 FORMA (conclusión)

Estructuras

				
Grietas astilladas	Fragmen- tada	Perlítica agrietada	Litofísica	Fluidal (con fenocristales)
Vidrio Halloysita Opalo	Vidrio Montmorillonita	Vidrio	Tridimita	Lechatelierita Vidrio

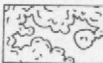
				
Bandeada	Coloforme	Oolítica	Pisolítica	Estructuras orgánicas
Lechatelierita Dahllita Calcedonia Opalo Calcita Aragonito Barita Fluorita	Opalo Siderita Colofana Halloysita	Limonita Calcita Siderita Colofana Chamosita Palagonita	Cliaquita Limonita	Oscas (a): Colofana Celular (b): Calcedonia Opalo Cuarzo
				
				Remplaza- miento de microfósiles
				Opalo Calcita Aragonito Dolomita Colofana Glaucónita Calcedonia

TABLA 10-4. EXFOLIACIÓN

 P = perfecta D = distintiva

Minerales con exfoliación en una dirección

Índice	Relieve	Doble refracción 0,01 ó menos	Doble refracción 0,01 — 0,03	Doble refracción 0,03 ó mayor
$n < \text{bálsamo}$	Bajo	Estilblita (010) P Heulandita (010) P Thomsonita (010) D Yeso (010) P	Montmorillonita (001) D	
$n > \text{bálsamo}$	Bajo	Caolinita (001) D Dickita (001) D Clorita (001) P	Cordierita (010) D Gibbsita (001) D Alunita (0001) D Brucita (0001) P Polihalita (100) D	
	Bajo o moderado		Cancrinita (1010) D	Prehnita (001) D Pirofilita (001) P Talco (001) P Muscovita (001) P Lepidolita (001) P
	Moderado o alto	Topacio (001) P Zoisita (010) P Clinzoisita (001) P Estaurolita (010) D Cloritoide (001) P Corindón (0001) partición	Prehnita (001) D Glauconita (001) P Sillimanita (100) P Mullita (100) D Dumortierita (100) D	Flogopita (001) P Blotita (001) P Stilpnomelana (001) P Chondrodita (001) P Epidoto (001) P Piedmontita D Jarosita (0001) D Monazita (001) (partición)

Minerales con exfoliación en dos direcciones

$n < \text{bálsamo}$	Bajo	Mesolita (110) P (1 $\bar{1}$ 0) P Escolecita (110) D Ortoclasa (001) P (010) D Sanidina (001) P (010) D Anortoclasa (001) P (010) D Microclina (001) P (010) D Albita (001) P (010) D	Natrolita (110) P	
$n > \text{bálsamo}$	Bajo	Plagioclasa (010) P (010) D	Escapolita (110) D	
	Moderado a alto	Enstatita (110) P Andalucita (110) D Riebeckita (110) P	Tremolita-actinolita (110) P Antofilita (110) Glaucofana (110) P Wollastonita (100) P (001) D Hornblenda (110) P Cummingtonita (110) P Jadeita (110) P Hedenbergita (110) P Augita (110) P Enstatita (110) P Hiperstena (110) P Egirina-augita (110) P Espodumena (110) P	Diópsido (110) P Grunerita (110) P Paseonita (110) P Egirina (110) P Lamprohobita (110) P Rutilo (110) D Esfena (partición)

TABLA 10-4. EXFOLIACIÓN (*Conclusión*)

Minerales con exfoliación en tres o más direcciones

Indice	Relieve	Doble refracción 0,01 ó menos	Doble refracción 0,01 — 0,03	Doble refracción 0,03 ó mayor
<i>Tres direcciones (tipos diversos)</i>				
$n \wedge$ balsamo	Relieve bajo	Halita (100) <i>P</i> (isotrópica)	Cancrinita (10 $\bar{1}$ 0) <i>D</i> Escapolita (100) <i>P</i> (110) <i>D</i> Ext. paralela o sim. Celestina (001) <i>P</i> (110) <i>D</i>	Anhidrita (001)(010)(100) <i>P</i> Ext. paralela
	Moderado a relieve alto	Axinita (001) (130) (010) <i>D</i> Ext. inclinada Corindón (1011) (partición)	Barita (001) (110) <i>P</i> Ext. paralela o sim. Lawsonita (010) <i>P</i> (110) <i>D</i> Cianita (110) (010) <i>P</i> (001) partición: Ext. inclinada	Diaspora (010) (210) <i>P</i> Ext. paralela o sim. Iddingsita (100) (010) (001) <i>D</i> Ext. paralela o sim.
	Relieve extremo	Periclasa (100) <i>P</i> (isotrópica) Perovskita (100) <i>P</i> (isotrópica)		Rutilo (100) (110) <i>D</i> Ext. paralelo o sim.

Tres direcciones (carbonatos romboédricos)

Calcita
Dolomita
Magnesita
Siderita

Todos los minerales de este grupo muestran lo siguiente: Variación del relieve con la dirección: moderada a alta. Muy alta doble refracción. 0,172 (calcita)-0,234 (siderita). Generalmente maclados. Uniaxiales negativos. Crucero romboédrico.

Casos especiales

Isotrópico	$n \wedge$ balsamo $n \vee$ balsamo		Fluorita (111) octaédrica Yeso (010) <i>P</i> (100) <i>D</i> (111) <i>D</i> Espínela (111) partición octaédrica Blenda (110) <i>P</i> crucero dodecaédrico	
Anisotrópico	$n \wedge$ balsamo	Relieve bajo	Nefelina (10 $\bar{1}$ 0) <i>D</i> (hexagonal)	

TABLA 10-5. INDICES DE REFRACCIÓN

Se han abreviado los índices de refracción n , n_a , n_γ , n_t y n_ω en n , a , γ , ϵ y ω .

Indice		Mineral	Indice		Mineral
1,40-1,46	n	Opalo	1,525-1,530	γ	Microclina
1,434	n	Fluorita	1,525-1,532	a	Albita
1,458-1,462	n	Lechatelierita	1,526	γ	Ortoclasa
1,469	a	Tridimita	1,527-1,543	ϵ	Nefelina
1,47-1,63	n	Palagonito	1,527-1,541	γ	Anortoclasea
1,473-1,480	n	Natrolita	1,529	γ	Yeso
1,473	γ	Tridimita	1,530	a	Aragonito
1,478-1,485	a	Chabasita	1,530-1,547	ω	Nefelina
1,48-1,61	n	Vidrio volcánico	1,531	a	Calcedonia
1,480-1,490	γ	Chabasita	1,532-1,545	a	Oligoclasea
1,483-1,487	n	Sodalita	1,532-1,552	a	Cordierita
1,484	a	Cristobalita	1,533	γ	Palygorskita
1,485-1,493	γ	Natrolita	1,535-1,570	a	Hidromuscovita
1,486	ϵ	Calcita	1,536-1,541	γ	Albita
1,487	n	Analcima	1,538-1,545	a	Talco
1,487	γ	Cristobalita	1,539	γ	Calcedonia
1,490-1,506	a	Sepiolita	1,539-1,570	γ	Cordierita
1,492	a	Montmorillonita	1,540-1,571	ϵ	Escapolita
1,493-1,546	a	Crisótilo	1,541-1,552	γ	Oligoclasea
1,494-1,500	a	Estilbita	1,541-1,579	a	Biotita
1,496-1,499	a	Heulandita	1,544	n	Halita
1,496-1,500	ϵ	Cancrinita	1,5442	ω	Cuarzo
1,496-1,510	n	Haüyna	1,545-1,555	a	Andesita
1,500-1,508	γ	Estilbita	1,548	a	Polihalita
1,500-1,526	ϵ	Dolomita	1,549-1,561	n	Halloysita
1,50-1,57	n	Antigorita (Serpofita)	1,550-1,607	ω	Escapolita
1,501-1,505	γ	Heulandita	1,551-1,562	a	Flogopita
1,505	a	Mesolita	1,552	a	Pirofilita
1,505-1,526	γ	Sepiolita	1,552-1,562	γ	Andesita
1,506	γ	Mesolita	1,5533	ϵ	Cuarzo
1,507-1,524	ω	Cancrinita	1,554-1,567	a	Gibbsita
1,508	a	Leucita	1,555-1,563	a	Labradorita
1,509	γ	Leucita	1,555-1,564	a	Antigorita
1,509-1,527	ϵ	Magnesita	1,556-1,570	a	Muscovita
1,510	a	Palygorskita	1,560	a	Lepidolita
1,512	a	Escolecita	1,560	a	Dickita
1,512-1,530	a	Thomsonita	1,561	a	Caolinita
1,513	γ	Montmorillonita	1,562-1,571	γ	Labradorita
1,517-1,520	a	Sanidina	1,562-1,573	γ	Antigorita
1,517-1,557	γ	Crisótilo	1,563-1,571	a	Bytownita
1,518	a	Ortoclasa	1,564-1,590	ϵ	Berilo
1,518-1,522	a	Microclina	1,565-1,605	γ	Hidromuscovita
1,518-1,542	γ	Thomsonita	1,566	ω	Brucita
1,519	γ	Escolecita	1,566	γ	Dickita
1,520	a	Yeso	1,566	γ	Caolinita
1,522-1,536	a	Anortoclasea	1,567	γ	Polihalita
1,524-1,526	γ	Sanidina	1,568-1,598	ω	Berilo

TABLA 10-5. INDICES DE REFRACCIÓN (Continuación)

Indice		Mineral	Indice		Mineral
1,570	α	Anhidrita	1,628-1,658	ϵ	Escorlita (Turmalina)
1,57-1,61	n	Cliaquita	1,629-1,640	α	Andalucita
1,57-1,62	n	Colofana	1,630-1,651	ϵ	Apatito
1,571-1,575	α	Anortita	1,631	γ	Celestina
1,571-1,582	γ	Bytownita	1,632-1,634	ω	Melilita
1,571-1,588	α	Clinocloro	1,632-1,655	ω	Dravita (Turmalina)
1,572	ω	Alunita	1,633-1,655	ω	Apatito
1,574-1,638	γ	Biotita	1,633-1,701	γ	Hornblenda
1,575-1,582	α	Penina	1,634	γ	Wollastonita
1,575-1,590	γ	Talco	1,635	n	Chamosita
1,576-1,583	γ	Penina	1,635-1,640	α	Forsterita
1,576-1,589	γ	Gibbsita	1,635-1,655	ω	Elbaita (Turmalina)
1,576-1,597	γ	Clinocloro	1,636	α	Barita
1,582-1,588	γ	Anortita	1,635-1,642	γ	Lazulita
1,585	ϵ	Brucita	1,639-1,647	γ	Andalucita
1,588-1,658	α	Proclorita	1,639-1,657	α	Cummingtonita
1,590-1,612	α	Glaucónita	1,639-1,668	γ	Glaucófana
1,592	ϵ	Alunita	1,64-1,77	α	Allanita
1,592-1,643	α	Chondrodita	1,641-1,651	α	Monticelita
1,593-1,611	γ	Muscovita	1,642	α	Mullita
1,596-1,633	ϵ	Siderita	1,645-1,665	γ	Prehnita
1,598-1,606	γ	Flogopita	1,648	γ	Barita
1,598-1,652	α	Antrofilita	1,650-1,665	α	Enstatita
1,599-1,667	γ	Proclorita	1,650-1,698	α	Diópsido
1,600	γ	Pirofilita	1,651-1,668	α	Espodumeno
1,600-1,628	α	Nefrita	1,651-1,681	α	Olivino
1,600-1,628	α	Tremolita-actinolita	1,652-1,698	ω	Escorlita (Turmalina)
1,603-1,604	α	Lazulita	1,654	γ	Mullita
1,605	γ	Lepidolita	1,655-1,666	α	Jadeíta
1,607-1,629	α	Topacio	1,655-1,669	γ	Monticelita
1,610-1,644	γ	Glaucónita	1,657-1,661	α	Sillimanita
1,612-1,634	α	Estilpnomelana	1,657-1,663	α	Grunerita
1,613-1,628	ϵ	Dravita (Turmalina)	1,658	ω	Calcita
1,614	γ	Anhidrita	1,658-1,674	γ	Enstatita
1,614-1,675	α	Hornblenda	1,659-1,678	α	Dumortierita
1,615-1,629	ϵ	Elbaita (Turmalina)	1,66-1,80	γ	Allanita
1,615-1,635	α	Prehnita	1,664-1,686	γ	Cummingtonita
1,617-1,638	γ	Topacio	1,665	α	Lawsonita
1,619-1,626	ϵ	Dahlita	1,667-1,688	γ	Jadeíta
1,620	α	Wollastonita	1,670-1,680	γ	Forsterita
1,621-1,655	α	Glaucófana	1,670-1,692	α	Lamprobolita
1,621-1,670	γ	Chondrodita	1,673-1,715	α	Hipersteno
1,622	α	Celestina	1,674-1,730	α	Iddingsita
1,623-1,635	ω	Dahlita	1,677-1,681	γ	Espodumena
1,623-1,676	γ	Antrofilita	1,677-1,684	γ	Sillimanita
1,625-1,655	γ	Nefrita	1,678-1,684	α	Axinita
1,625-1,655	γ	Tremolita-actinolita	1,680-1,716	ω	Dolomita
1,626-1,629	ϵ	Melilita	1,680-1,718	α	Pigeonita

TABLA 10-5. INDICES DE REFRACCIÓN (*Conclusión*)

Indice		Mineral	Indice		Mineral
1,680-1,745	α	Egirina-augita	1,736-1,763	n	Grosularita
1,681-1,727	γ	Diópsido	1,738-1,760	n	Periclasa
1,683-1,731	γ	Hipersteno	1,741-1,760	n	Piropo
1,684	γ	Lawsonita	1,745-1,758	α	Piedmontita
1,686	γ	Aragonita	1,745-1,777	α	Egirina
1,686-1,692	γ	Dumortierita	1,746-1,762	γ	Estaurolita
1,688-1,696	γ	Axinita	1,750	γ	Diasporo
1,688-1,712	α	Augita	1,751-1,757	γ	Hedenbergita
1,689-1,718	γ	Olivino	1,759-1,763	ϵ	Corindón
1,693	α	Riebeckita	1,767-1,772	ω	Corindón
1,693-1,760	γ	Lamprobolita	1,778-1,815	n	Almandita
1,696-1,700	α	Zoisita	1,782-1,836	γ	Egirina
1,697	γ	Riebeckita	1,786-1,800	α	Monacita
1,699-1,717	γ	Grunerita	1,792-1,820	n	Espesartina
1,700-1,726	ω	Magnesita	1,805-1,835	α	Fayalita
1,700-1,745	γ	Estilpnomelana	1,806-1,832	γ	Piedmontita
1,701-1,726	ϵ	Idocrasa	1,820	ω	Jarosita
1,702	α	Diasporo	1,830-1,875	ω	Siderita
1,702-1,718	γ	Zoisita	1,837-1,849	γ	Monacita
1,705-1,732	ω	Idocrasa	1,838-1,870	n	Uvarovita
1,709-1,782	γ	Egirina-augita	1,847-1,886	γ	Fayalita
1,710-1,723	α	Clinozoisita	1,857-1,887	n	Andradita
1,712	α	Cianita	1,887-1,913	α	Esfena
1,713-1,737	γ	Augita	1,925-1,931	ω	Circón
1,715	ϵ	Jarosita	1,979-2,054	γ	Esfena
1,715-1,724	α	Cloritoide	1,985-1,993	ϵ	Circón
1,718-1,768	γ	Iddingsita	1,996	ω	Casiterita
1,719-1,734	γ	Clinozoisita	2,00-2,10	n	Limonita
1,719-1,744	γ	Pigeonita	2,07-2,16	n	Cromita
1,72-1,78	n	Espinela	2,093	ϵ	Casiterita
1,720-1,734	α	Epidoto	2,34-2,38	n	Perovskita
1,728	γ	Cianita	2,37-2,47	n	Blenda
1,731-1,737	γ	Cloritoide	2,603-2,616	ω	Rutilo
1,732-1,739	α	Hedenbergita	2,889-2,903	ϵ	Rutilo
1,734-1,779	γ	Epidoto	2,94	ϵ	Hematita
1,736-1,747	α	Estaurolita	3,22	ω	Hematita

TABLA 10-6. MINERALES ISOTRÓPICOS

Relieve	Mineral	Indice
Relieve moderado	Opalo	1,40 -1,46
	Fluorita	1,434
	Lechatelierita	1,458-1,462
	Sodalita	1,483-1,487
	Analcima	1,487
	Haüyna	1,496-1,510
Relieve bajo	Bálsamo = 1,537	
	Halita	1,544
	Halloysita	1,549-1,561
	Antigorita (Serpofita)	1,50 -1,57
	Cliaquita	1,57 -1,61
	Colofana	1,57 -1,62
Relieve de moderado a fuerte	Periclasa	1,738-1,760
	Grosularita	1,736-1,763
	Piropo	1,741-1,760
	Almandita	1,778-1,815
	Espeartina	1,792-1,820
	Uvarovita	1,838-1,870
Relieve muy alto	Andradita	1,857-1,887
	Limonita	2,00 -2,10
	Espinela	1,72 -1,78
	Cromita	2,07 -2,16
	Perovsquita	2,34 -2,38
	Blenda	2,37 -2,47
	Vidrio volcánico (mineraloide)	1,48 -1,61
	Palagonito (mineraloide)	1,47 -1,63

TABLA 10-7. BIRREFRINGENCIA

Birrefringencia	Mineral	Birrefringencia	Mineral
0,00 -0,002	Analcima (posiblemente)	0,009	Cuarzo
0,00 -0,002	Perovskita	0,009-0,010	Topacio
0,00 -0,003	Antigorita (Serpofita)	0,009-0,011	Albita
0,00 -0,004	Haüyna (ocasional)	0,010-0,012	Axinita
0,001	Leucita	0,010-0,015	Estaurolita
0,001	Mesolita	0,010-0,016	Hiperstena
0,001	Halloysita	0,01 -0,03	Allanita
0,001-0,004	Penina	0,010-0,036	Escapolita
0,001-0,001	Proclorita	0,011-0,013	Anortita
0,002-0,010	Chabasita	0,011-0,014	Crisótilo
0,003	Cristobalita	0,011-0,020	Dumortierita
0,003-0,004	Apatito	0,012	Barita
0,003-0,004	Nefelina	0,012	Mullita
0,004	Tridimita	0,012-0,013	Natrolita
0,004	Riebeckita	0,012-0,023	Jadeita
0,004-0,006	Idocrasa	0,013-0,016	Cloritoide
0,004-0,008	Berilo	0,013-0,018	Glaucófana
0,004-0,009	Dahlita	0,013-0,023	Espodumena
0,004-0,011	Clinocloro	0,014	Wollastonita
0,005	Colofana	0,014-0,018	Monticellita
0,005	Caolinita	0,014-0,045	Epidoto
0,005-0,006	Melilita	0,015-0,020	Sepiolita
0,005-0,007	Anortoclasa	0,015-0,023	Elbaita (Turmalina)
0,005-0,011	Clinozoisita	0,016	Cianita
0,006	Dickita	0,016-0,025	Antrofilita
0,006-0,008	Estilbita	0,018-0,019	Hedenbergita
0,006-0,012	Thomsonita	0,019	Brucita
0,006-0,018	Zoisita	0,019	Lawsonita
0,007	Sanidina	0,019	Polihalita
0,007	Heulandita	0,019-0,025	Dravita (Turmalina)
0,007	Andesina	0,019-0,026	Hornblenda
0,007	Escolecita	0,020	Alunita
0,007	Microclina	0,020-0,023	Sillimanita
0,007-0,008	Chamosita	0,020-0,032	Glaucónita
0,007-0,008	Labradorita	0,020-0,033	Prehnita
0,007-0,009	Antigorita	0,021	Montmorillonita
0,007-0,009	Oligoclasa	0,021-0,025	Augita
0,007-0,011	Andalucita	0,021-0,033	Pigeonita
0,007-0,011	Cordierita	0,022	Gibbsita
0,007-0,028	Cancrinita	0,022-0,027	Nefrita
0,008	Calcedonia	0,022-0,027	Tremolita-actinolita
0,008	Ortoclasa	0,022-0,040	Escorlita (Turmalina)
0,008-0,009	Corindón	0,023	Palygorskita
0,008-0,009	Enstatita	0,025-0,029	Cummingtonita
0,008-0,011	Bytownita	0,026-0,072	Lamprobolita
0,009	Celestina	0,027-0,035	Condroidita
0,009	Yeso	0,029-0,031	Diópsido
0,029-0,037	Egirina-augita	0,045	Lepidolita
0,030-0,035	Hidromuscovita	0,048	Diaspora

GRAFICO DE LOS COLORES DE INTERFERENCIA PARA LOS MINERALES COMUNES

ESPESOR DE LA SECCION DELGADA EN MILIMETROS

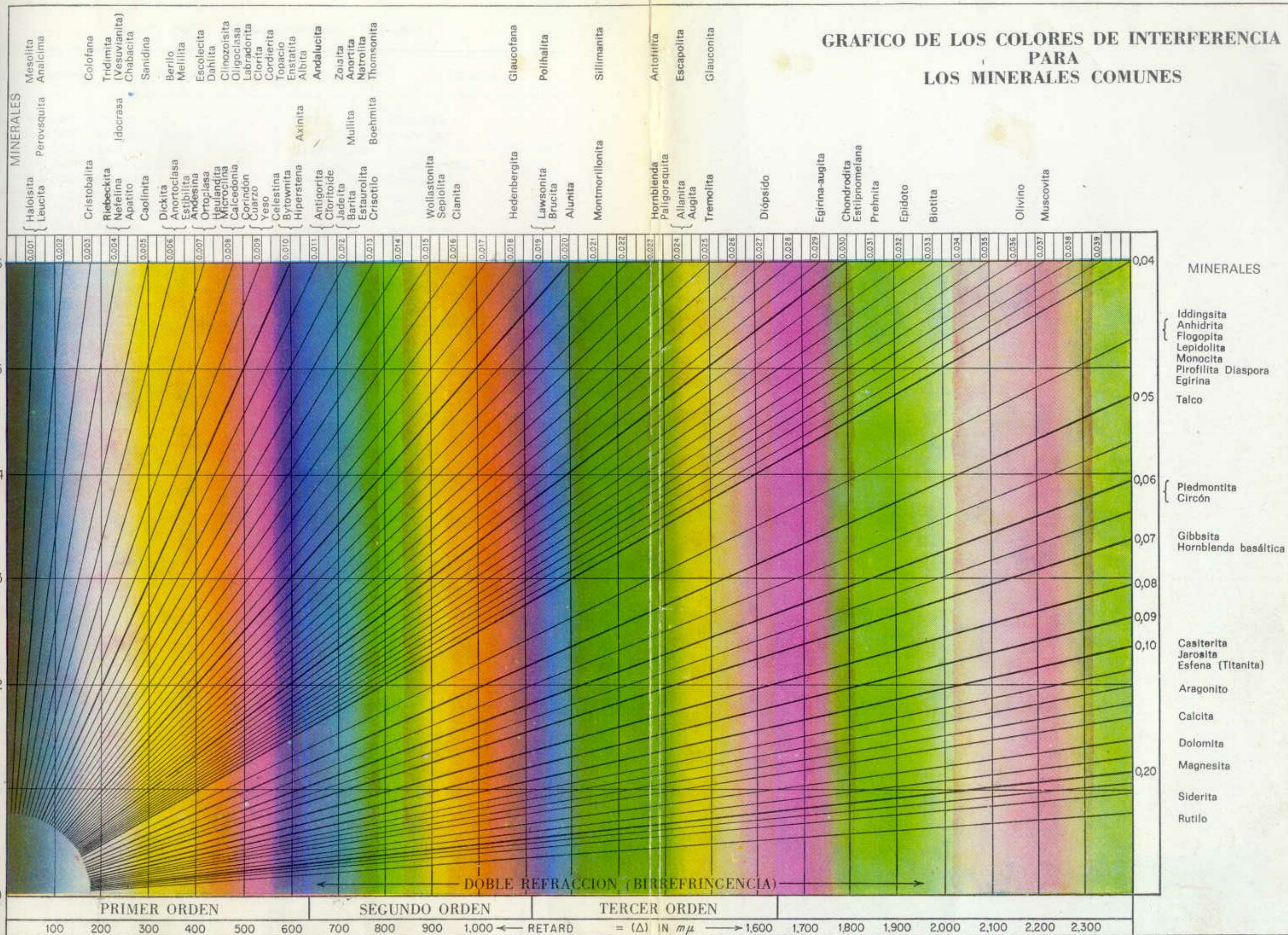


TABLA 10-7. BIRREFRINGENCIA (*Conclusión*)

Birrefringencia	Mineral	Birrefringencia	Mineral
0,030-0,050	Talco	0,048	Pirofilita
0,030-0,119	Stilpnomelana	0,049-0,051	Monacita
0,033-0,059	Biotita	0,060-0,062	Circón
0,035-0,040	Forsterita	0,061-0,082	Piedmontita
0,036-0,038	Lazulita	0,092-0,141	Esfena
0,037-0,041	Olivino	0,097	Casiterita
0,037-0,041	Muscovita	0,105	Jarosita
0,037-0,059	Egirina	0,156	Aragonito
0,038-0,044	Iddingsita	0,172	Calcita
0,042-0,051	Fayalita	0,180-0,190	Dolomita
0,042-0,054	Grunerita	0,191-0,199	Magnesita
0,044	Anhidrita	0,234-0,242	Siderita
0,044-0,047	Flogopita	0,286-0,287	Rutilo

TABLA 10-8. MINERALES UNIÁXICOS

Mineral	n_e	n_o	Signo	Birrefringencia
Calcita	1,486	1,658	—	0,172
Cancrinita	1,496-1,500	1,507-1,524	—	0,007-0,028
Dolomita	1,500-1,526	1,680-1,716	—	0,180-0,190
Magnesita	1,509-1,527	1,700-1,726	—	0,191-0,199
Nefelina	1,527-1,543	1,530-1,547	—	0,003-0,004
Escapolita	1,540-1,571	1,550-1,607	—	1,010-0,036
Berilo	1,564-1,590	1,568-1,598	—	0,004-0,008
Siderita	1,596-1,633	1,830-1,875	—	0,234-0,242
Stilpnomelana	1,612-1,634	1,700-1,745	—	0,030-0,119
Dravita (Turmalina)	1,613-1,628	1,632-1,655	—	0,019-0,025
Elbainita (Turmalina)	1,615-1,629	1,635-1,655	—	0,015-0,023
Dahllita	1,619-1,626	1,623-1,635	—	0,004-0,009
Melilita	1,626-1,629	1,632-1,634	—	0,005-0,006
Escorlita (Turmalina)	1,628-1,658	1,652-1,698	—	0,022-0,040
Apatito	1,630-1,651	1,633-1,655	—	0,003-0,004
Idocrasa	1,701-1,726	1,705-1,732	—	0,004-0,006
Jarosita	1,715	1,820	—	0,105
Corindón	1,759-1,763	1,767-1,772	—	0,008-0,009
Hematites	2,94	3,22	—	

Mineral	n_o	n_e	Signo	Birrefringencia
Cuarzo	1,5442	1,5533	+	0,009
Brucita	1,566	1,585	+	0,019
Alunita	1,572	1,592	+	0,020
Circón	1,925-1,931	1,985-1,993	+	0,060-0,062
Casiterita	1,996	2,093	+	0,097
Rutilo	2,603-2,616	2,889-2,903	+	0,286-0,287

TABLA 10-9. MINERALES BIÁXICOS POSITIVOS

Mineral	n_a	n_b	n_c	Birrefringencia
Tridimita.....	1,469	1,469	1,473	0,004
Natrolita.....	1,473-1,480	1,476-1,482	1,485-1,493	0,012-0,013
Chabacita.....	1,478-1,485		1,480-1,490	0,002-0,010
Crisótilo.....	1,493-1,546	1,504-1,550	1,517-1,557	0,011-0,014
Heulandita.....	1,496-1,499	1,497-1,501	1,501-1,505	0,007
Mesolita.....	1,505	1,505	1,506	0,001
Thomsonita.....	1,512-1,530	1,513-1,532	1,518-1,542	0,006-0,012
Yeso.....	1,520	1,522	1,529	0,009
Albita.....	1,525-1,532	1,529-1,536	1,536-1,541	0,009-0,011
Oligoclasa.....	1,532-1,545	1,536-1,548	1,541-1,552	0,007-0,009
Cordierita.....	1,532-1,552	1,536-1,562	1,539-1,570	0,007-0,011
Andesina.....	1,545-1,555	1,548-1,558	1,552-1,562	0,007
Gibbsita.....	1,554-1,567	1,554-1,567	1,576-1,589	0,022
Labradorita.....	1,555-1,563	1,558-1,567	1,562-1,571	0,007-0,008
Dickita.....	1,560	1,562	1,566	0,006
Anhidrita.....	1,570	1,576	1,614	0,044
Clinocloro.....	1,571-1,588	1,571-1,588	1,576-1,597	0,004-0,011
Pennina.....	1,575-1,582	1,576-1,582	1,576-1,583	0,001-0,004
Proclorita.....	1,588-1,658	1,589-1,667	1,599-1,667	0,001-0,011
Condroidita.....	1,592-1,643	1,602-1,655	1,621-1,670	0,027-0,035
Antrofilita.....	1,598-1,652	1,615-1,662	1,623-1,676	0,016-0,025
Topacio.....	1,607-1,629	1,610-1,631	1,617-1,638	0,009-0,010
Prehnita.....	1,615-1,635	1,624-1,642	1,645-1,665	0,020-0,033
Celestina.....	1,622	1,624	1,631	0,009
Forsterita.....	1,635-1,640	1,651-1,660	1,670-1,680	0,035-0,040
Barita.....	1,636	1,637	1,648	0,012
Cummingtonita.....	1,639-1,657	1,645-1,669	1,664-1,686	0,025-0,029
Mullita.....	1,642	1,644	1,654	0,012
Enstatita.....	1,650-1,665	1,653-1,670	1,658-1,674	0,008-0,009
Diópsido.....	1,650-1,698	1,657-1,706	1,681-1,727	0,029-0,031
Espodumena.....	1,651-1,668	1,665-1,675	1,677-1,681	0,013-0,027
Olivino.....	1,651-1,681	1,670-1,706	1,689-1,718	0,037-0,041
Jadeita.....	1,655-1,666	1,659-1,674	1,667-1,688	0,012-0,023
Sillimanita.....	1,657-1,661	1,658-1,670	1,677-1,684	0,020-0,023
Lawsonita.....	1,665	1,674	1,684	0,019
Iddingsita.....	1,674-1,730	1,715-1,763	1,718-1,768	0,038-0,044
Egirina-augita.....	1,680-1,745	1,687-1,770	1,709-1,782	0,029-0,037
Pigeonita.....	1,680-1,718	1,698-1,725	1,719-1,744	0,021-0,033
Augita.....	1,688-1,712	1,701-1,717	1,713-1,737	0,021-0,025
Zoisita.....	1,696-1,700	1,696-1,703	1,702-1,718	0,006-0,018
Diaspora.....	1,702	1,722	1,750	0,048
Clinzoisita.....	1,710-1,723	1,715-1,729	1,719-1,734	0,005-0,011
Cloritoide.....	1,715-1,724	1,719-1,726	1,731-1,737	0,013-0,016
Hedenbergita.....	1,732-1,739	1,737-1,745	1,751-1,757	0,018-0,019
Estaurolita.....	1,736-1,747	1,741-1,754	1,746-1,762	0,010-0,015
Piedmontita.....	1,745-1,758	1,764-1,789	1,806-1,832	0,061-0,082
Monacita.....	1,786-1,800	1,788-1,801	1,837-1,849	0,049-0,051
Esfena.....	1,887-1,913	1,894-1,921	1,979-2,054	0,092-0,141

TABLA 10-10. MINERALES BLÁNCOS NEGATIVOS

Minerales	n_a	n_β	n_λ	Birrefringencia
Sepiolita.....	1,490-1,506		1,505-1,526	0,015-0,020
Montmorillonita.....	1,492	1,513	1,513	0,021
Estilbita.....	1,494-1,500	1,498-1,504	1,500-1,508	0,006-0,008
Escolecita.....	1,512	1,519	1,519	0,007
Sanidina.....	1,517-1,520	1,523-1,525	1,524-1,526	0,007
Ortoclasa.....	1,518	1,524	1,526	0,008
Microclina.....	1,518-1,522	1,522-1,526	1,525-1,530	0,007
Anortoclasa.....	1,522-1,536	1,526-1,539	1,527-1,541	0,005-0,007
Aragonito.....	1,530	1,682	1,686	0,156
Oligoclasa.....	1,532-1,545	1,536-1,548	1,541-1,552	0,007-0,009
Cordierita.....	1,532-1,552	1,536-1,562	1,539-1,570	0,007-0,011
Hidromuscovita.....	1,535-1,570		1,565-1,605	0,030-0,035
Talco.....	1,538-1,545	1,575-1,590	1,575-1,590	0,030-0,050
Biotita.....	1,541-1,579	1,574-1,638	1,574-1,638	0,033-0,059
Andesina.....	1,545-1,555	1,548-1,558	1,552-1,562	0,007
Polihalita.....	1,548	1,562	1,567	0,019
Flogopita.....	1,551-1,562	1,598-1,606	1,598-1,606	0,044-0,047
Pirofilita.....	1,552	1,588	1,600	0,048
Antigorita.....	1,555-1,564	1,562-1,573	1,562-1,573	0,007-0,009
Muscovita.....	1,556-1,570	1,587-1,607	1,593-1,611	0,037-0,041
Lepidolita.....	1,560	1,598	1,605	0,045
Caolinita.....	1,561	1,565	1,566	0,005
Bytownita.....	1,563-1,571	1,567-1,577	1,571-1,582	0,008-0,011
Anortita.....	1,571-1,575	1,577-1,583	1,582-1,588	0,011-0,013
Pennina.....	1,575-1,582	1,576-1,582	1,576-1,583	0,001-0,004
Glauconita.....	1,590-1,612	1,609-1,643	1,610-1,644	0,020-0,032
Tremolita-actinolita.....	1,600-1,628	1,613-1,644	1,625-1,655	0,022-0,027
Nefrita.....	1,600-1,628	1,613-1,644	1,625-1,655	0,022-0,027
Lazulita.....	1,603-1,604	1,632-1,633	1,639-1,642	0,036-0,038
Hornblenda.....	1,614-1,675	1,618-1,691	1,633-1,701	0,019-0,026
Wollastonita.....	1,620	1,632	1,634	0,014
Chamosita.....		1,635		0,007-0,008
Glaucofana.....	1,621-1,655	1,638-1,664	1,639-1,668	0,013-0,018
Andalucita.....	1,629-1,640	1,633-1,644	1,639-1,647	0,007-0,011
Allanita.....	1,640-1,770	1,650-1,770	1,660-1,800	0,010-0,030
Monticellita.....	1,641-1,651	1,646-1,662	1,655-1,669	0,014-0,018
Olivino.....	1,651-1,681	1,670-1,706	1,689-1,718	0,037-0,041
Grunerita.....	1,657-1,663	1,684-1,697	1,699-1,717	0,042-0,054
Dumortierita.....	1,659-1,678	1,684-1,691	1,686-1,692	0,011-0,020
Lamprobolita.....	1,670-1,692	1,683-1,730	1,693-1,760	0,026-0,072
Hiperstena.....	1,763-1,715	1,678-1,728	1,683-1,731	0,010-0,016
Iddingsita.....	1,674-1,730	1,715-1,763	1,718-1,768	0,038-0,044
Axinita.....	1,678-1,684	1,685-1,692	1,688-1,696	0,010-0,012
Riebeckita.....	1,693	1,695	1,697	0,004
Cianita.....	1,712	1,720	1,728	0,016
Epidoto.....	1,720-1,734	1,724-1,763	1,734-1,779	0,014-0,045
Egirina.....	1,745-1,777	1,770-1,823	1,782-1,836	0,037-0,059
Fayalita.....	1,805-1,835	1,838-1,877	1,847-1,886	0,042-0,051

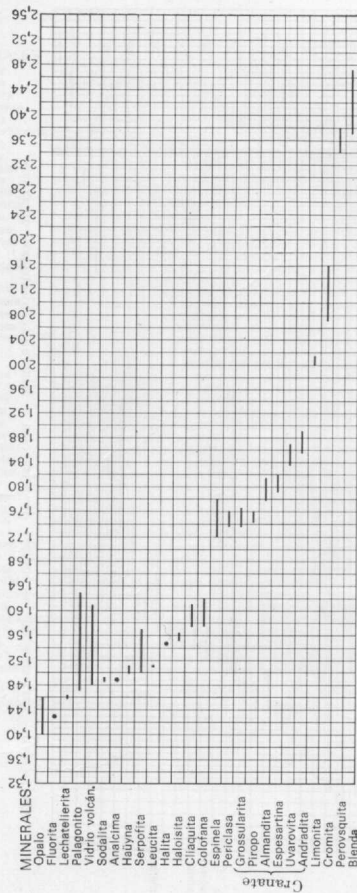


GRÁFICO A. Variación de los índices de refracción — Minerales isotrópicos

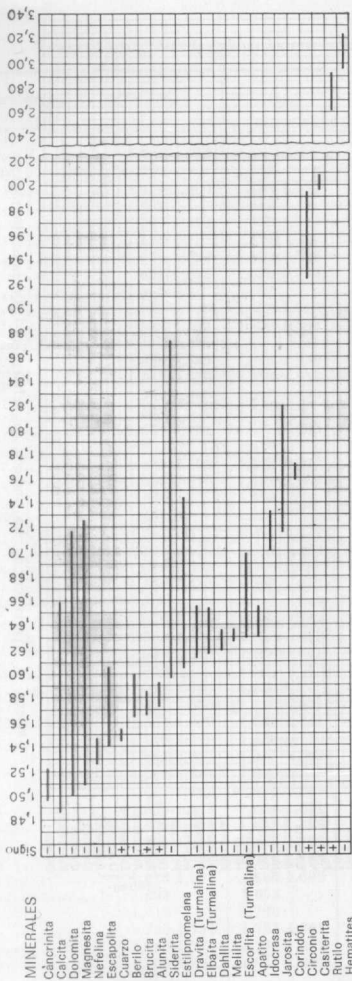


GRÁFICO B. Variación de los índices de refracción — Minerales anisótropos uniáxicos

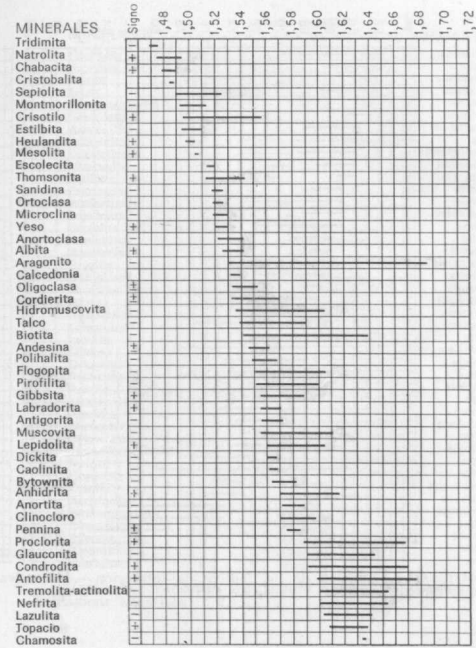


GRÁFICO C.—Variación de los índices de refracción — Minerales anisotrópicos biáxicos

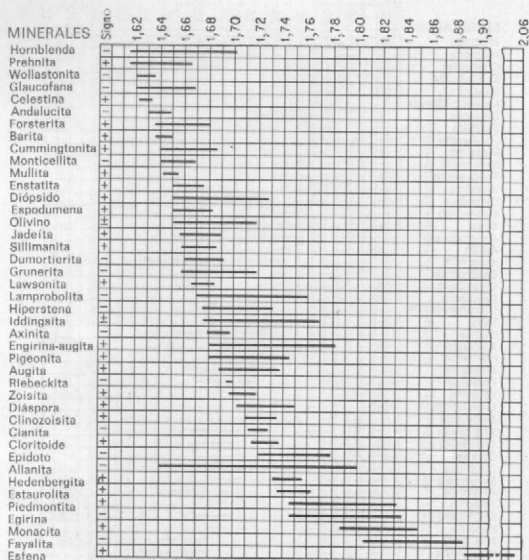


GRÁFICO D. Variación de los índices de refracción — Minerales anisotrópicos biáxicos

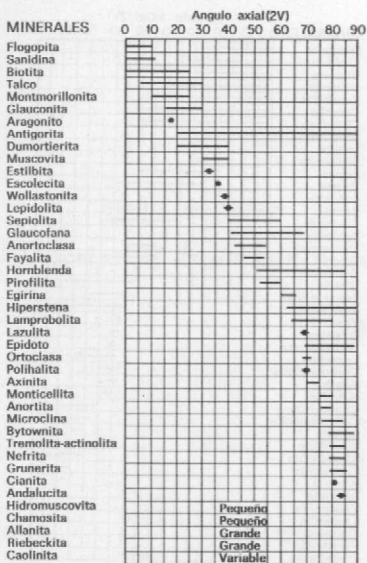


GRÁFICO E. Variación del ángulo axial — Minerales biáxicos negativos

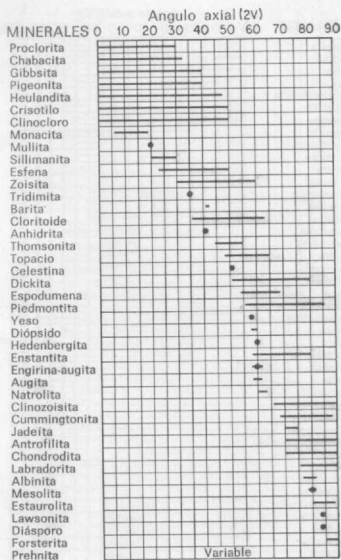


GRÁFICO F. Variación del ángulo axial — Minerales biáxicos positivos

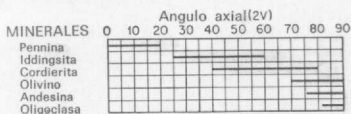


GRÁFICO G. Variación del ángulo axial — Minerales biáxicos positivos negativos