



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento de Ingeniería Petrolera,
Minera, Geológica y Geofísica.

Apuntes para la clase de

MINERALOGIA OPTICA Y DETERMINATIVA

Agosto, 1971.

Ing. Leovigildo Cepeda Dávila

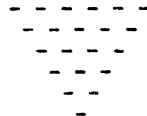


PRIMERA PARTE

NOCIONES

DE

CRITICA.





I N D I C E

PRIMERA PARTE

NOCIONES DE OPTICA

	No. Pág.
Capítulo I.- Naturaleza de la luz	(1)
Capítulo II.- Nociones de Optica Geométrica	(3)
1. Introducción	
2. Principios Fundamentales	
3. Propagación rectilínea de la luz	
4. Leyes de Descartes	
5. Principio del retorno inverso de la luz	
6. Reflexión total	
7. Trayectoria óptica	
8. Superficie de onda	
9. Teorema de Malus	
10. Principio de Huygens	
11. Construcción de Huygens.	
Capítulo III.- Generalidades sobre las vibraciones	(7)
1. Introducción	
2. Movimiento periódico, Funciones periódicas	
3. Funciones sinusoidales	
4. Representación de Fresnel	
5. Resolución de dos vibraciones	
6. Resolución de dos vibraciones paralelas de igual período	
7. Resolución de dos vibraciones rectangulares de igual período.	
Capítulo IV.- Interferencia de la luz	(13)
A) Luz Monocromática	
1. Introducción	
2. Experimento de Young	
3. Orden de interferencia	
4. Condiciones de interferencia	
5. Dominio espectral y nitidez de las franjas	
6. Espejos de Fresnel	
7. Interferencia por reflexión.	
B) Interferencias en luz blanca	
1. Composición de la luz blanca	
2. Escala de Newton de centro blanco	
3. Escala de Newton de centro negro	
Capítulo V.- Polarización de la luz	(20)
1. Luz natural y luz polarizada	
2. Polarización por reflexión	
3. Ley de Brewster	
4. Transversalidad de las vibraciones luminosas	
5. Polarización por doble refracción	
6. Polarizadores	
7. Ley de Malus.	

Capítulo VI.- Propagación de la luz en los medios cristalinos	(27)
1. Isotropía y anisotropía	
2. Elipsoide de los índices	
3. Propiedades del elipsoide	
4. Secciones circulares del elipsoide	
5. Aplicaciones del elipsoide a los cristales	
1o. Caso general: cristales de los sistemas ortorrómbico, monoclinico y triclinico.	
2o. Cristales de los sistemas tetragonal y hexagonal.	
3o. Cristales del sistema isométrico.	
Capítulo VII.- Polarización cromática en luz paralela.	(38)
1. Introducción	
2. Teoría del fenómeno	
1o.) Caso de la luz monocromática	
2o.) Caso de la luz blanca	
3. La cuña de cuarzo	
Capítulo VIII.- Absorción y pleocroísmo	(45)
1. Absorción	
2. Policroísmo	
3. Pleocroísmo	
1o. En los cristales uniáxicos	
2o. En los cristales biáxicos.	
Capítulo IX.- Refracción oblicua de una onda plana	(47)
1. Superficie de los índices	
2. Construcción de Huygens por medio de la superficie de los índices.	
3. Retardo introducido por una lámina de caras paralelas y anisotrópica sobre los rayos oblicuos.	
Capítulo X.- Polarización cromática en luz convergente.	(52)
1. Introducción	
2. Observación de una lámina anisotrópica entre nicoles cruzados y luz convergente.	
3. Cristales uniáxicos	
1o. Lámina perpendicular al eje óptico	
2o. Lámina oblicua al eje óptico	
3o. Lámina paralela al eje óptico.	
4. Cristales biáxicos	
1o. Lámina perpendicular a la bisectriz aguda	
2o. Lámina perpendicular a un eje óptico	
3o. Lámina perpendicular a la bisectriz obtusa	
4o. Lámina paralela al plano de los ejes ópticos.	
5. Posibilidades de confusión de las figuras de interferencia.	

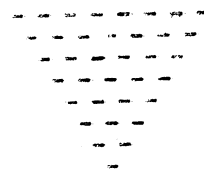
OBSERVACIONES DE SECCIONES DELGADAS DE MINERALES AL MICROSCOPIO POLARIZANTE

- Capítulo XII.- El microscopio polarizante (68)
1. Introducción
 2. Descripción general
 3. Descripción de los elementos constitutivos principales del microscopio polarizante.
 4. Láminas auxiliares o compensadores
 5. Ajustes del microscopio
 6. Precauciones en el manejo del microscopio
 7. Estudio de los minerales transparentes en el microscopio polarizante.
- Capítulo XIII.- Observaciones empleando únicamente el polarizador (69)
1. Introducción
 2. Propiedades observadas
 3. Color y pleocroísmo
 4. Forma
 5. Cruzado o extinción
 10. Cruzado en una dirección
 20. Cruzado en dos direcciones
 30. Cruzado en tres direcciones
 40. Cruzado en cuatro direcciones
 50. Cruzado en seis direcciones
 6. Tractura
 7. Medida de ángulos planos
 8. Refringencias y relieve
 9. Determinación de la refringencia al microscopio.
 10. Método de Becke
 20. Método de inmersión
 10. Determinación de la refringencia empleando refractómetros.
 11. Determinación de los índices de refracción de los cristales anisotrópicos al microscopio.
 12. Inclusiones
 13. Medida de longitudes.
- Capítulo XIII.- Observaciones en luz paralela y nicóles cruzados (85)
1. Introducción
 2. Isotropía y anisotropía
 3. Colores de interferencia anormales
 4. Determinación de las direcciones de vibración lenta n_p y rápida n_g de una sección cristalina.
 10. Método
 20. Empleo de los diversos compensadores
 5. Carta de colores de interferencia
 10. Estimación del espesor de la sección
 20. Estimación del color de interferencia
 30. Estimación de la birrefringencia.
 6. Medida del ángulo de extinción
 7. Relación entre los sistemas cristalinos y el ángulo de extinción.

8. Signo de elongación
9. Maclas (Swinning)

- Capítulo XIV.- Observaciones con nicóles cruzados y luz con vergente. (94)
1. Introducción
 2. Determinación del signo óptico de los minerales uniaxiales.
 - a) Secciones normales al eje óptico
 - b) Secciones paralelas al eje óptico
 - c) Secciones oblicuas.
 3. Determinación del signo óptico de los minerales biaxiales.
 - a) Secciones normales a la bisectriz aguda
 - b) Secciones normales a la bisectriz obtusa
 - c) Secciones normales a un eje óptico
 - d) Secciones oblicuas cualesquiera
 4. Medida del ángulo de los ejes ópticos
 5. Dispersión.

MINICRISTALA



B I B L I O G R A F I A .

1. BOLFA, J.- "Cours d'optique cristalline". Polycopié du Laboratoire de Minéralogie et cristallographie. Nancy 1962.
2. BOUASSE, H.- "Optique cristalline: Double Refraction - Polarisation rectiligne et elliptique". Libraire Delagrave, Paris 1925.
3. BRUHAT, G.- "Optique". Masson et Cie, Editeurs. Paris 1959.
4. BUTTGENBACH, H.- "Les Minéraux et les Roches". Editions Vaillant-Carbone, Liège, et Dunod, Paris 1953.
5. CAGNY, C.- "La pratique du Microscope Polarissant a -- l'usage des étudiants en géologie et pétrographie" (Texte et Atlas). Centre de Documentation Universitaire, Paris.
6. DANA, E.S. and FORD, W.S.- "A Textbook of Mineralogy" - John Wiley and Sons Inc., New York, and Chapman and Hall Ltd. London 1955.
7. DEVORÉ, G. et LEBEQUIN, R.- "Course de Physique - Optique II". Libraire Vuibert, Paris 1962.
8. HARTSHORN, N.H. y A. STUART.- "Crystals and the polarizing microscope". Edward Arnold and Co., London 1950.
9. JENKINS, F.A. and WHITE, H.E.- "Fundamentals of Optics" McGraw-Hill Book Company, New York, Toronto and London, 1957.
10. KEAR, P.F.- "Optical Mineralogy". McGraw-Hill Book Co. New York, Toronto and London, 1959.
11. LARSEN, E.S. and BERMAN, H.- "The Microscopic Determination of the Non Opaque Minerals". U.S. Geological Survey Bull. 843, 1934.
12. MCPHOUSE, ...- "The study of rocks in thin sections".
13. CHIFFA, PH.- "Manipulations du certificat d'études --- supérieures de Minéralogie". Centre de Documentation Universitaire. Paris.
14. PRAP, R.- "L'optique".- Editions du seuil. Paris 1962.
15. POLIGNO, A., BASSIS, L., et LOUJIN, ...- "Traité de -- microscopie. Instruments et techniques". Masson et Cie Editeurs. Paris 1957.
16. RINNE, F.- "La Science des Roches. Etude théorique et pratique". Traduction de l'allemand par Léon - Pervinquières. Libraire Lamarre. Paris 1949.
17. ROUBAULT, M. et FABRIES, J.- "Détermination des Minéraux des Roches au microscope polarissant". Editions Lamarre-Poinat. Paris 1963.
18. SAN MIGUEL DE LA CAMERA, M. y MARTINEZ STRONG, P.- "Estudio de los Minerales petrográficos". Imp. S.- Aguirre. Calle del General Alvarez de Castro 38 Madrid 1945.
19. SMITH, H.G. and WELLS, M.K.- "Minerals and the Microscope". Thomas Murby and Co. London, 1956.
20. THIÉRIEN, J. et MARECHAL, A.- "Optique théorique". Collection que sais-je?- Presses universitaires - de France, Paris 1959.
21. WAHLSTROM, E.C.- "Optical Crystallography". John Wiley and Sons, New York 1960.
22. WINCHELL, A.- "Elements of optical Mineralogy". Tres - tomos. John Wiley and Sons, New York 1949.
23. WRIGHT, F.E.- "The Methods of Petrographic Microscopic Research". Carnegie Inst. of Washington, Pub. - No. 158, 1911.
24. TYART, J.- "Cours de Minéralogie. Optique cristalline". Centre de Documentation Universitaire, Paris.



CAPITULO I

NATURALEZA DE LA LUZ

Desde los tiempos de la Antigüedad Clásica se han emitido diferentes teorías tratando de explicar la naturaleza de la luz. Un grupo de ellas suponía la existencia de un "quid" emanando sea del objeto, sea del ojo o bien de la coexistencia de dos "quid" simultáneos. Puede decirse que este grupo, representado por Pitágoras y Euclides es el precursor de la teoría corpuscular. Por otro lado Aristóteles negaba todo tipo de emisión y pensaba que un movimiento se propagaba entre el objeto y el ojo. Se podría pensar que él es el precursor de la teoría ondulatoria.

En el siglo XVII, Issac Newton anunció y desarrolló la teoría corpuscular considerando a los cuerpos luminosos como emisoras de partículas llamadas "fotones" que se propagan en línea recta cuando no han sido sometidos a la acción de alguna fuerza.

Al mismo tiempo, Christian Huygens emitió la hipótesis de que la luz es un fenómeno vibratorio que se transmite en un medio adecuado que invade todo el espacio, medio hipotético al que denominó "éter". Debido a la inmensa autoridad de Newton, esta hipótesis fue rechazada hasta que a principios del siglo XIX, los admirables trabajos de Agustín Fresnel hicieron abandonar la teoría corpuscular y pusieron al día — aquella, ya que explicaba convenientemente las interferencias, la difracción y la polarización de la luz.

La hipótesis fundamental de la teoría ondulatoria consiste en suponer cada luz de un cierto color (monocromática) como una vibración de período T bien definido, que se propaga en cada medio transparente con una velocidad también definida. En el vacío para todo T, es decir, para todo color, esta velocidad es de 3.10 cm/seg. = c, aproximadamente.

Esta vibración se supone de forma sinusoidal y la variable luminosa "Y" es una simple función cosinusoidal del tiempo:

$$Y = a \cos(2 \pi \frac{t}{T} - \phi)$$

donde "a" es la amplitud de la vibración y "φ" su fase. Fresnel demostró también la necesidad de admitir la transversalidad de esas vibraciones, las cuales pueden ser comparadas, aproximadamente, con las vibraciones de una cuerda tendida.

Una modificación a la teoría ondulatoria fue propuesta por James Maxwell, quien demostró que las vibraciones luminosas son electromagnéticas y que sus propiedades provienen de las leyes más elementales de la electricidad. La teoría de Maxwell confirmó totalmente los resultados calculados por Fresnel. La hipótesis del éter fue abandonada porque conducía a contradicciones con la experiencia.

La teoría de Maxwell fue aceptada definitivamente cuando, un poco más tarde, Hertz demostró la realidad de tal propagación. Ella encierra que, a lo largo de un rayo luminoso en el aire, se propagan dos vibraciones perpendiculares entre sí y ortogonales al rayo luminoso, — siendo una de ellas un campo eléctrico y la otra un campo magnético. —

La teoría electromagnética presenta la gran ventaja de unir la luz, de una parte, a los rayos ultravioleta, rayos X y rayos gamma, caracterizados por períodos cada vez más cortos y, de otra parte, a los rayos infrarrojos, a las oscilaciones eléctricas y a las ondas hertzianas que poseen períodos cada vez mayores.

Sin embargo, a principios de este siglo, nuevos descubrimientos, como el efecto fotoeléctrico, han probado la insuficiencia de la teoría electromagnética de Maxwell y ha sido necesario considerar otra vez la teoría corpuscular.

Actualmente se reconoce a la luz una naturaleza a la vez ondulatoria y corpuscular, cuyos caracteres se concilian en la mecánica ondulatoria de Louis de Broglie.

Por consiguiente, una exposición correcta y moderna de la óptica debería en principio, fundarse sobre esta teoría unificada, sola capaz de describir, de un modo coherente, el conjunto de hechos conocidos. — Pero dada su complejidad y dado que ella no aporta ningún cambio en las conclusiones deducidas de la teoría ondulatoria, al menos en el dominio de la óptica que nos interesa, se abordará el problema siguiendo los métodos "clásicos".

CAPITULO II

NOCIONES DE OPTICA GEOMETRICA

1. Introducción.- Numerosos fenómenos que se producen en el microscopio polarizante pueden explicarse partiendo de la noción de rayo luminoso, fundamento de la óptica geométrica.

La Optica Geométrica es la rama de la física que se ocupa de la posición de las imágenes en los instrumentos de óptica. Esta ciencia no es exacta, dado que la noción de rayo luminoso es puramente convencional y no se ajusta a la realidad, pero tiene la ventaja de que, a través de ella, se puede hacer un estudio aproximado de los fenómenos luminosos, sin tomar en cuenta ninguna teoría sobre la naturaleza de la luz.

2. Principios fundamentales.- Los principios en que se basa la óptica geométrica, y cuyas demostraciones se omitirán por estar fuera de los objetivos de nuestro curso, son: la propagación rectilínea de la luz, las leyes de Descartes sobre la reflexión y la refracción, el retorno inverso de la luz, el teorema de Malus y el principio de Huygens.

3. Propagación rectilínea de la luz.- En un medio homogéneo o isotrópico, los rayos luminosos se propagan en forma rectilínea e independientemente los unos de los otros.

4. Leyes de Descartes.- En el límite de separación de dos medios homogéneos e isotrópicos A y B, en los cuales un haz de luz monocromática se trasmite con las velocidades v_1 y v_2 , respectivamente, los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a dicho límite, se encuentran en el mismo plano y, además, los ángulos de incidencia "i", de reflexión "i₁" y de refracción están ligados por las relaciones:

$$i = -i_1 \quad \text{y} \quad \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

La relación constante n_2/n_1 que, para la luz monocromática considerada, depende de las velocidades de propagación v_1 y v_2 , se llama -- "índice relativo de B con respecto a A" para esa radiación y es igual a:

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

Tomados separadamente, n_1 y n_2 son los índices de refracción de cada medio con respecto al vacío (cuyo índice es por convención igual a la unidad). Cada uno vale, lógicamente:

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

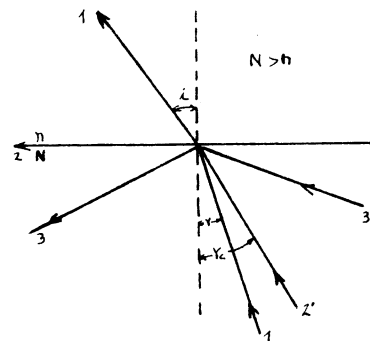
donde "c" es la velocidad de la luz en el vacío y vale, aproximadamente $3 \cdot 10^{10}$ cm/seg., como ya ha sido establecido.

5. Principio del retorno inverso de la luz.- Este principio es -- una consecuencia directa de las leyes de Descartes y se enuncia así:

"Los trayectos recorridos por la luz pueden efectuarse en un sentido o en el inverso". Dicho de otra manera: "Los trayectos recorridos por la luz son independientes de su sentido de propagación".

6. Reflexión Total.- Todo rayo proveniente de un medio A de índice "n" (Fig. II-1), al incidir en la superficie de separación con un medio B de índice N mayor que n, se refractará en su mayor parte en B y estará comprendido en un cono cuyo ángulo máximo r_c es fácil de calcular.

En efecto, para $i = 90^\circ$; $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{N}{n}$, resulta: $\frac{1}{\text{sen } r} = \frac{N}{n} \cdot \cdot \cdot \text{Sen } r_c = \frac{n}{N}$



"r_c" se denomina "ángulo crítico".
 En virtud del principio del retorno inverso de la luz, un rayo luminoso proveniente del medio B:
 a) será refractado en el medio A para toda incidencia, comprendida entre 0° y el ángulo crítico.
 b) para una incidencia mayor que el ángulo crítico, el rayo no se refractará sino que sufrirá la reflexión total en el medio B (rayo/1).

Fig. II-1

7. Trayectoria óptica.- Sea una porción ds de un rayo luminoso -- que se trasmite en un medio determinado con una velocidad "v", la cual puede variar de una manera continua si el medio no es homogéneo. El tiempo que requiere la luz para recorrer el elemento "ds" será:

$$dt = \frac{ds}{v}$$

y el tiempo necesario para recorrer dos puntos cualesquiera A y B del mismo rayo luminoso será:

$$t = \int_A^B \frac{ds}{v} = \frac{1}{c} \int_A^B n ds = \frac{1}{c} L$$

La magnitud $L = \int_A^B n ds$, se llama "trayectoria óptica" entre los puntos A y B de un rayo luminoso.

8. Superficie de onda.- Si se provoca una perturbación en un punto de un medio homogéneo, la vibración resultante se propagará en todas direcciones. El lugar de los puntos alcanzados por la perturbación, en un instante dado, constituye la superficie de onda y corresponde, por tanto, a los rayos que han recorrido igual trayecto óptico. Así, a cada superficie de onda corresponde un mismo trayecto óptico.

Como en un medio isotrópico la velocidad de la luz es independiente de la dirección de propagación, las superficies de onda que corresponden a una fuente puntual P son esferas con centro en P. A medida que la distancia a P aumenta, la curvatura de las esferas disminuye. En fin, cuando la fuente está infinitamente alejada, las superficies de onda se vuelven planas; ellas son las ondas planas.

9. Teorema de Malus.- Los rayos luminosos proveniente de una fuente puntual y que se transmiten en un medio homogéneo e isotrópico son normales a las superficies de onda de ese medio.

10. Principio de Huygens.- Los diferentes puntos de una superficie de onda " Σ " (Fig. II-2) obtenida en el instante "t", se comportan como si fuesen fuentes secundarias de luz, emisoras cada una de ondas esféricas. La vibración que se obtiene en un instante posterior ($t + \theta$) resulta de la superposición de esas ondas, y la superficie de onda " Σ' " en el instante ($t + \theta$) - que es además paralela a " Σ " - aparece como la envoltura de esas diferentes ondas esféricas.

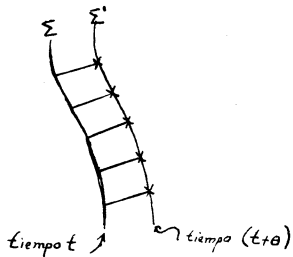
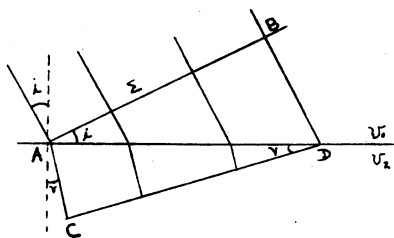


Fig. II-2

Una aplicación del principio de Huygens.- Sea la onda plana " Σ " que se propaga en un medio isotrópico y homogéneo con una velocidad " v_1 ", y que penetra en otro medio similar, separado del primero por una superficie plana, con una velocidad " v_2 " (Fig. II-3).



El punto A de la onda en el instante "t" ha emitido una onda esférica de radio $AC = v_2 t$, mientras que el punto B se ha desplazado una distancia $BD = v_1 t$.

Aplicando el principio de Huygens, la envoltura de todas las ondas esféricas en el instante "t" será la onda plana CD.

Llamando respectivamente "i" y "r" a los ángulos de incidencia y de refracción de las ondas con la superficie de separación, se obtiene de la figura:

$$BD = v_1 t = AD \text{ sen } i$$

$$AC = v_2 t = AD \text{ sen } r$$

de donde: $\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$

Como en los medios isotrópicos los rayos luminosos son normales a las superficies de onda, quedan demostradas las leyes de refracción de Descartes, para esos medios.

11. Construcción de Huygens.- La construcción de Huygens determina la dirección de las ondas planas refractadas y, por consiguiente, la dirección de los rayos refractados en los medios homogéneos e isotrópicos. Se procede como sigue:

Con el punto de incidencia I como centro (Fig. II-4a) se trazan dos círculos c_1 y c_2 , cuyos radios R_1 y R_2 son proporcionales a $\frac{1}{n_1}$ y $\frac{1}{n_2}$ de manera que:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

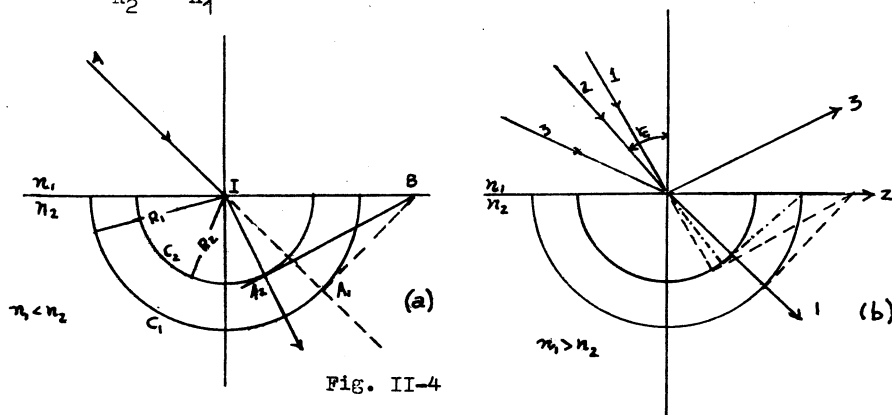


Fig. II-4

La prolongación del rayo AI encuentra C_1 en c_1 . La perpendicular a IA_1 corta la superficie de separación en B; trazando, a partir de B, la tangente BA_2 a c_2 , la perpendicular IA_2 será el rayo refractado. La construcción es siempre posible si n_2 es mayor que n_1 .

Cuando n_2 es menor que n_1 (Fig. II-4b), la construcción es posible sólo si:

$$\text{Sen } i < \text{sen } r_c \quad (\text{rayo 1})$$

donde r_c es el ángulo crítico, definido por:

$$\text{Sen } r_c = \frac{n_1}{n_2} \quad (\text{rayo 2})$$

Si i es mayor que r_c , la construcción no es posible, pues el rayo incidente sufre el fenómeno de reflexión total (rayo 3).

CAPITULO III

GENERALIDADES SOBRE LAS VIBRACIONES

1. Introducción.- El carácter ondulatorio de la luz se pone de manifiesto por los fenómenos de interferencia, polarización y difracción. Antes de abordar el estudio de éstos, es conveniente exponer algunas generalidades sobre las vibraciones y su propagación.

2. Movimiento periódico. Funciones periódicas.- Un movimiento periódico es aquél que se repite continuamente, como la oscilación de un péndulo. El caso más simple de este tipo de movimiento es el armónico simple.

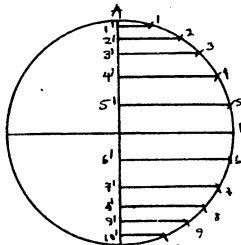


Fig. III-1

Considérese una partícula animada por un movimiento circular uniforme que sigue una trayectoria ABCD (Fig. III-1). Si se observa ese movimiento desde cualquier punto del plano del círculo y fuera de él, parecería que la partícula oscilara hacia arriba y hacia abajo a lo largo del círculo, con una velocidad variable, que sería más rápida hacia el centro de la línea y más lenta hacia los extremos.

Como en realidad la partícula viaja con velocidad uniforme, recorrerá cualquiera de las distancias iguales A1, 12, 23, etc., en intervalos iguales de tiempo, y requerirá estos mismos intervalos iguales de tiempo para moverse aparentemente a través de las distancias desiguales A1', 1'2', 2'3', etc. El movimiento hacia adelante y hacia atrás a lo largo de una línea recta a velocidad constantemente variable, como el movimiento aparente de la partícula a lo largo de la línea AOC se llama movimiento armónico simple.

La combinación de un movimiento armónico simple con un movimiento uniforme a ángulo recto con la dirección de vibración da lugar a una curva armónica (Fig. III-2). En este caso, el movimiento armónico simple, que se inicia en O y vibra hacia A, luego a B, etc., se combina

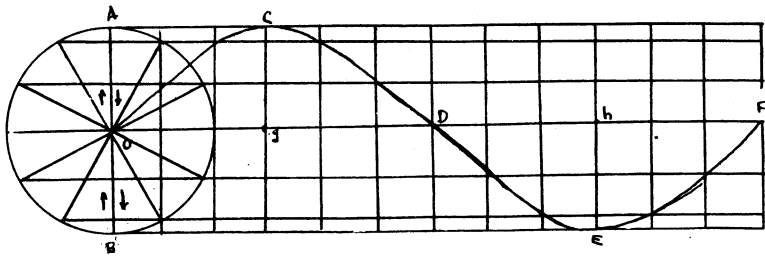


Fig. III-2

con el movimiento uniforme a lo largo de la línea ODE, produciéndose un movimiento resultante a lo largo de la sinusoida ODEF.

Una idea general sobre este tipo de movimiento se tiene al considerar el movimiento de una partícula de agua producido al arrojar una piedra en un lago tranquilo. La partícula se moverá describiendo círculos, uno de cuyos diámetros es paralela al movimiento de la onda, mientras la onda producida se moverá horizontalmente en todas direcciones a partir del centro de disturbio.

El desplazamiento máximo de una partícula a partir de su posición original de reposo es la amplitud "a" de la onda (distancia OB u OA, Fig. III-1, o bien Og o Oh, Fig. III-2).

Dos puntos en una onda están en la misma fase cuando se encuentran en la misma posición relativa con respecto a una cresta o a un valle, por ejemplo O y F (Fig. III-2).

El punto de desplazamiento máximo hacia arriba es la cresta de la onda (punto C, Fig. III-2) y el punto de desplazamiento máximo hacia abajo es el valle de la onda (punto E, Fig. III-2). La distancia entre dos crestas o valles sucesivos, o de cualquier punto, como O, al siguiente similar como F, se denomina longitud de onda (λ).

El tiempo que requiere una onda para dar una oscilación completa es el período "T" y se expresa en segundos. La inversa del período, es decir, el número de oscilaciones completas por segundo, es la frecuencia "v".

Se dice que una variable "y" es una función periódica del tiempo "t" cuando alcanza el mismo valor en dos instantes cualesquiera, separados por un intervalo de tiempo igual a su período "T".

3. Funciones Sinusoidales.- Sea un punto P, animado de un movimiento circular uniforme que gira alrededor de un punto O, que se supone fijo, con una velocidad angular " ω " y sea " ωt " el ángulo que forma el vector OP, de magnitud "a" en una posición cualquiera con el diámetro YY'. Dicho ángulo es función del tiempo "t". Sea asimismo "p" la proyección de P en YY' en un instante cualquiera (Fig. III-1).

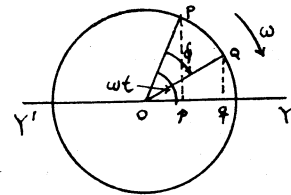


Fig. III-1

Cuando $t = T$, $\omega T = 2\pi$, y se obtiene: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

La medida que P recorre la circunferencia, p se desplazará a lo largo del diámetro, de manera que Op tomará diferentes valores que dependerán del ángulo ωt . Por construcción, el vector Op valdrá, a cada instante:

$$Op = a \cos \omega t = y$$

Trasladando la función a un sistema cartesiano (y-t), la curva que se obtiene será una cosinusoide. Puesto que el coseno de ωt varía entre los límites (-1) y (+1), "y" variará entre (-a) y (+a). El coeficiente "a" es la amplitud de la cosinusoide (Fig. III-2).

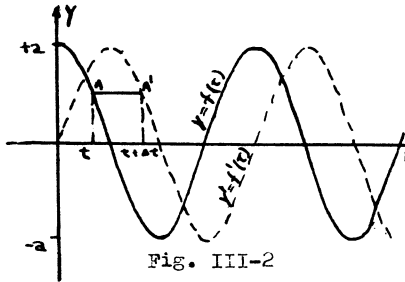


Fig. III-2

Considérese ahora otro punto Q que se desplaza sobre el mismo círculo de la Fig. III-1, con la misma velocidad angular que P. El ángulo ϕ que OQ forma con el eje X permanecará constante y el movimiento de la proyección q de Q sobre el diámetro XY', estará dado, lógicamente por la ecuación:

$$Oq = a \cos (\omega t - \phi) = y'$$

Si se traslada esta función cosinusoidal al sistema cartesiano de la Fig. III-2, las dos cosinusoides se obtendrán la una de la otra por la traslación Δt , que representa un retardo $\Delta t = \frac{\phi}{\omega}$

La función y' toma, en el instante (t + Δt) el valor que tenía la función y en el instante t. El ángulo ϕ se llama diferencia de fase de las dos funciones.

Nótese que, para ciertos valores de ϕ (0, 2π , 4π , ..., $2K\pi$) -- los movimientos coinciden, diciéndose, entonces que están en fase y el resultado es que las cosinusoides se superponen. Por el contrario, para $\phi = \pi$, 3π , ..., $(2K + 1)\pi$, los movimientos se oponen y se dice que se encuentran en oposición de fase.

4. Representación de Fresnel.- A menudo se consideran en óptica varias vibraciones de igual período pero de amplitud y fase diferentes. Es costumbre representarlas por medio de un vector cuya longitud es la amplitud y el ángulo que forma con una dirección origen es la fase. Tal es la representación de Fresnel (Fig. III-3).

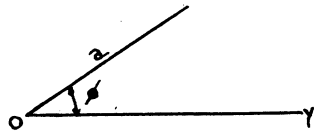


Fig. III-3

La función cosinusoidal $Y = a \cos (\omega t - \phi)$ puede escribirse también bajo la forma: $Y = A \cos \omega t + B \sin \omega t$

haciendo: $A = a \cos \phi$
 $B = a \sin \phi$

lo cual facilita los cálculos en el caso de la resolución de vibraciones. Siempre es posible volver a la forma original haciendo:

$$a^2 = A^2 + B^2$$

$$\sin \phi = \frac{B}{a}$$

La sur :

$$A^2 + B^2 = I$$

se denomina en óptica "intensidad de la vibración luminosa" y es igual al cuadrado de la amplitud, en el caso de la luz natural, sin polarizar.

5. Resolución de dos vibraciones.- En el estudio de la polarización y las interferencias es necesario emplear vibraciones resultantes de la superposición de otras dos vibraciones dadas, es decir, efectuar la adición de dos vibraciones cosinusoidales.

Las vibraciones pueden efectuarse paralelamente a la dirección de propagación; en este caso se trata de vibraciones longitudinales. Si ellas se efectúan perpendicularmente a esta dirección, se trata de vibraciones transversales.

Se considerarán únicamente los casos siguientes:

- Resolución de dos vibraciones paralelas y de igual período.
- Resolución de dos vibraciones rectangulares de igual período.

6. Resolución de dos vibraciones paralelas de igual período.- Sean las dos funciones sinusoidales:

$$Y_1 = a_1 \cos (\omega t - \phi_1)$$

$$Y_2 = a_2 \cos (\omega t - \phi_2)$$

la función resultante será:

$$Y = a_1 (\cos \omega t \cos \phi_1 + \sin \omega t \sin \phi_1) + a_2 (\cos \omega t \cos \phi_2 + \sin \omega t \sin \phi_2)$$

Haciendo: $A = a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2$

$$B = a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2$$

Se obtiene:

$$Y = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

que es la función resultante y que se puede escribir bajo la forma:

$$Y = a \cos (\omega t - \phi)$$

en la cual: $a^2 = A^2 + B^2 = a_1^2 + 2a_1a_2 \cos (\phi_1 - \phi_2) + a_2^2$

$$\tan \phi = \frac{B}{A} = \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2}$$

Se puede llegar al mismo resultado por medio de la construcción de Fresnel (Fig. III-4). En efecto:

En el triángulo OP₁P se tiene:

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos (\phi_1 - \phi_2)$$

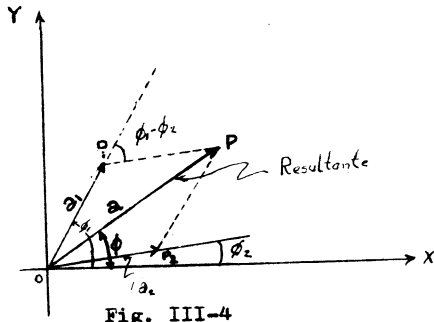


Fig. III-4

Las proyecciones de la resultante \vec{OP} son:

sobre OX : $a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2 = A$

sobre OY : $a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2 = B$

y el ángulo ϕ que forma \vec{OP} con OX está dado por:

$$\tan \phi = \frac{B}{A}$$

7. Resolución de dos vibraciones rectangulares de igual período.-

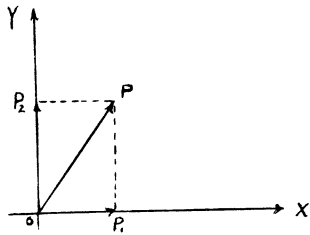


Fig. III-5

Sea encontrar la resultante \vec{OP} de dos funciones cosinusoidales de igual período, dirigidas perpendicularmente la una de la otra, según OX y OY, representadas en la figura III-5 por los vectores \vec{OP}_1 y \vec{OP}_2 .

Partiendo de $t = 0$, se pueden escribir esas dos funciones bajo la forma:

$$x = a \cos \omega t \dots\dots\dots (1)$$

$$y = b \cos (\omega t - \phi) \dots\dots (2)$$

La resultante \vec{OP} será tal que:

$$\vec{OP} = x + y$$

Se puede eliminar "t" de (1) y (2) con el fin de obtener la trayectoria del punto P. Se tiene:

$$\cos \omega t = \frac{x}{a} \dots\dots\dots (3)$$

$$\sin \omega t \sin \phi = \frac{y}{b} - \frac{x}{a} \cos \phi \dots (4)$$

Multiplicando los dos miembros de (3) por $\sin \phi$ y elevando (3) y (4) al cuadrado:

$$\cos^2 \omega t \sin^2 \phi = \frac{x^2}{a^2} \sin^2 \phi \dots\dots\dots (5)$$

$$\sin^2 \omega t \sin^2 \phi = \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \phi + \frac{x^2}{a^2} \cos^2 \phi \dots\dots (6)$$

De la adición de (5) y (6) se obtiene:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \phi + \frac{y^2}{b^2} = \sin^2 \phi$$

Por tanto, la trayectoria de P es una elipse y la vibración resultante es elíptica. El valor de x varía entre (+a) y (-a) y el de "y" entre (+b) y (-b). La elipse estará inscrita siempre en un rectángulo ABCD, sea cual fuere la diferencia de fase ϕ . (Fig. III-6).

Si $\cos \phi = +1$, la elipse se reduce a una recta, que será la diagonal AC para $\phi = 2K\pi$, o la diagonal BD para $\phi = (2K + 1)\pi$, Fig. III-9.

Si $0 < \phi < \pi$, el punto P se desplaza en el sentido inverso de las manecillas del reloj (elipses siniestras) (Fig. III-7).

Si $\pi < \phi < 2\pi$, el sentido es inverso (elipses diestras) (Fig. III-8).

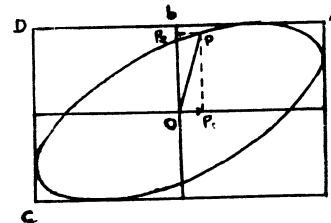


Fig. III-6

Si las dos vibraciones rectangulares tienen, además, la misma amplitud, la ecuación de la elipse resultante es:

$$x^2 - 2xy \cos \phi + y^2 = a^2 \sin^2 \phi$$

La elipse estará inscrita en un cuadrado de lado igual a "2a" -- (Fig. III-10).

Para $\phi = (2K + 1)\pi/2$, los dos ejes son iguales y la vibración se vuelve circular (Fig. III-10).

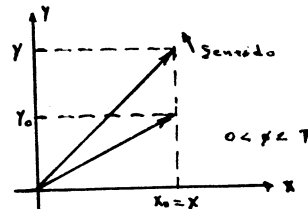


Fig. III-7

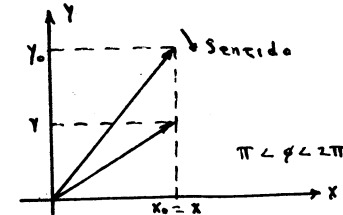


Fig. III-8

CAPITULO IV
INTERFERENCIAS DE LA LUZ

A) INTERFERENCIAS EN LUZ MONOCROMATICA.

1. Introducción.- La superposición de vibraciones luminosas provoca, bajo ciertas condiciones, el fenómeno de interferencia.

Para comprender el mecanismo de este fenómeno, obsérvese la propagación de pequeños movimientos sinusoidales a partir de dos fuentes sincrónicas, por ejemplo dos vástagos metálicos accionados verticalmente por una rama de diapasón y sumergidos, en parte, en un baño de mercurio (Fig. IV-1).

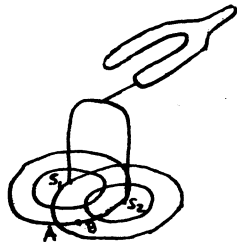


Fig. IV-1

En cambio, en un punto B, a la misma distancia de S₁, pero aproximándose a S₂, una cantidad igual a $\lambda/2$, las dos vibraciones están en oposición de fase y se destruyen: no existe ningún movimiento en B, ya que los dos movimientos superpuestos son constantemente iguales y de signos contrarios. Se comprende, de esta manera, que el movimiento resultante varíe entre un máximo y cero, según la posición del punto de observación (Fig. IV-2).

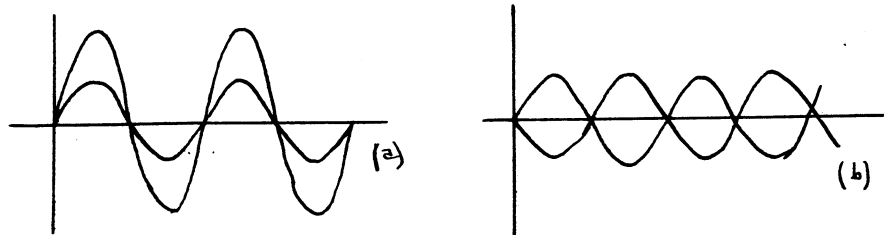


Fig. IV-2

Alrededor de cada fuente se forman ondas circulares que se suceden, guardando entre ellas una distancia " λ " constante, llamada longitud de onda y cuyo valor es:

$$\lambda = v T$$

Estas ondas disminuyen progresivamente de intensidad en el curso de la propagación. Los dos sistemas de ondas se superponen y la vibración resultante es la suma de las dos vibraciones.

Un punto A, a la misma distancia de las dos fuentes S₁ y S₂, que se suponen de misma fase, es decir que sus movimientos son simultáneos, recibe dos vibraciones idénticas. La amplitud resultante es el doble y la intensidad, proporcional al cuadrado de la amplitud, es cuádruple.

2. Experimento de Young.- El fenómeno es similar en el caso de las interferencias ópticas. Si se iluminan, mediante una fuente puntual monocromática S, dos aberturas S₁ y S₂, próximas entre sí y perforadas en una pantalla (Fig. IV-3), será posible obtener las interferencias producidas por las vibraciones que emiten S₁ y S₂.

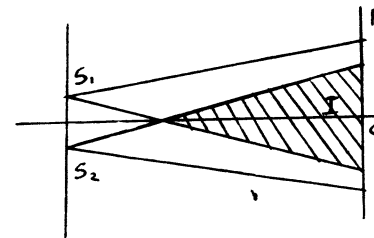


Fig. IV-3

Los haces provenientes de estas dos fuentes limitan una región común a ambos, que constituye el campo de interferencia I.

Si se coloca en esta región una pantalla P se observarán máximos y mínimos de luz. Este es el experimento de Young.

Considérese un punto M en la pantalla P (Fig IV-4). Si se llama diferencia de trayectoria a la distancia.

$$S_1N = S_1M - S_2M = \delta$$

se constata que para $\delta = K\lambda$ (K entero o nulo) hay un máximo de luz y para

$\delta = (2K + 1)\lambda/2$, hay un mínimo.

Las vibraciones provenientes de S se propagan con una velocidad "c". En un cierto instante llegan a M dos clases de vibraciones, las unas habiendo recorrido la trayectoria S₁M en el tiempo

$$t = \frac{S_1M}{c}$$

las otras el camino S₂M en el tiempo $t_2 = \frac{S_2M}{c}$, es

decir δ/c segundos después que las primeras o sea $t - \delta/c$.

Si la vibración proveniente de S₁ tiene por ecuación $Y_1 = a \cos t$ la que proviene de S₂ será:

$$Y_2 = a \cos \omega(t - \frac{\delta}{c})$$

que puede escribirse también:

$$Y_2 = a \cos \frac{2\pi}{T} (t - \frac{\delta}{c}) = a \cos 2\pi (\frac{t}{T} - \frac{\delta}{\lambda})$$

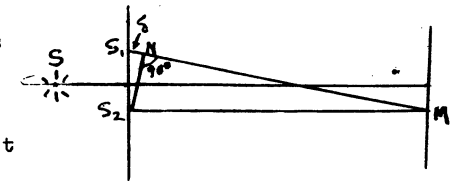


Fig. IV-4

La franja central C, para la cual las trayectorias S₁C y S₂C son iguales ($\delta = 0$) es, evidentemente, brillante.

Tanto las franjas brillantes como las oscuras son equidistantes entre sí. Dos franjas de la misma clase están separadas por un intervalo "i" llamado "interfranja". Naturalmente, las franjas de tipo contrario ocupan la mitad de los intervalos que separan a las primeras. (Fig. IV-5).

Lámina No. 1

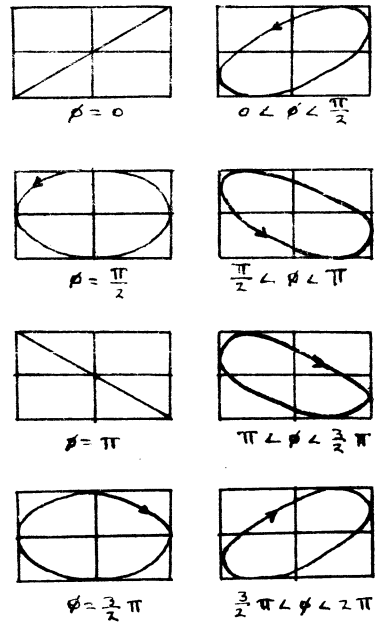


Fig. III-9.- Resolución de dos vibraciones rectangulares de igual período y amplitudes diferentes, para diversos valores de ϕ .

Lámina No. 2

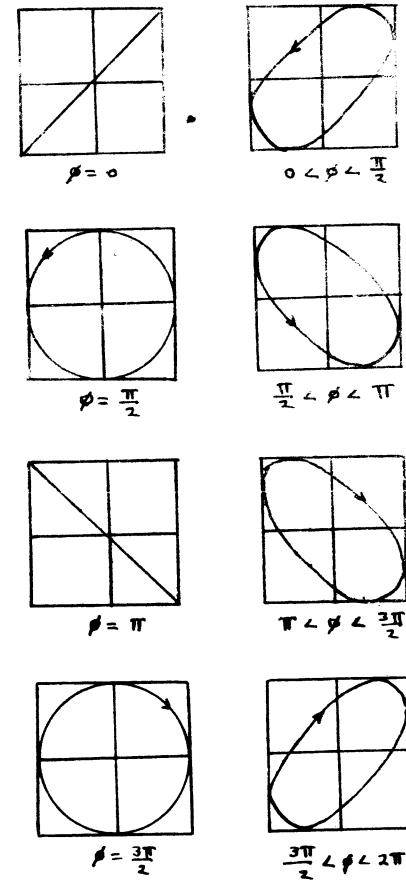


Fig. III-10.- Resolución de dos vibraciones rectangulares de período y amplitud iguales, para diversos valores de ϕ .

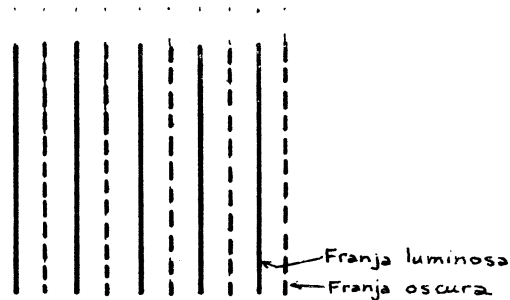


Fig. IV-5

3.- Espejos de Fresnel.- Este ingenioso dispositivo para producir interferencias consiste en dos espejos E_1 y E_2 (Fig. IV-6) cuyas caras posteriores han sido ennegrecidas y que forman entre ellos un ángulo " θ " muy pequeño.

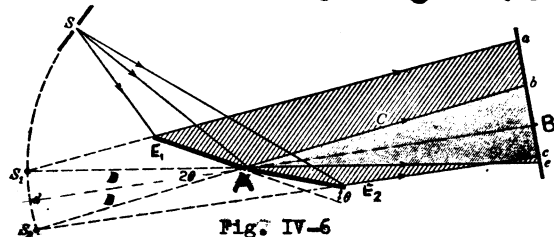


Fig. IV-6

Los espejos reciben los rayos provenientes de una fuente monocromática S y dan de ella dos imágenes S_1 y S_2 simétricas respecto de la recta AB, que pasa por la arista A, común a ambos. La proximidad de S_1 y S_2 será función directa de la pequeñez del ángulo " θ ".

Puesto que S_1 y S_2 corresponden a dos reflexiones de la misma naturaleza, están en condiciones de interferir. Los haces luminosos provenientes de ellas están limitados por los bordes de los espejos. En el campo de interferencia, cuya forma depende del ajuste de los espejos y de la incidencia empleada, se coloca un pantalla con el fin de observar las franjas. Para que sea posible observar la franja central situada en el eje AB es necesario verificar que A sea común a ambos espejos.

4.- Interferencias no localizadas y localizadas.- De acuerdo con la posición que ocupan las franjas en el espacio se distinguen dos tipos de interferencias:

a) Interferencias no localizadas, si se obtienen franjas perfectamente claras en toda una región del espacio, a menudo muy extendida, como sucede al emplear los espejos de Fresnel o el dispositivo de Young. De un modo general, se

observa este fenómeno, no importa cual sea el aparato usado, si se utiliza una fuente de luz puntual. Si no es así, cada punto de la fuente luminosa producirá un sistema de franjas diferentes y no habrá interferencia.

b) Sin embargo, puede suceder que las franjas producidas por los diferentes puntos de una fuente extendida coincidan en ciertas regiones muy particulares del espacio. En ese caso se dice que la interferencias están localizadas.

5.- Orden de interferencia.- Las vibraciones provenientes de dos fuentes luminosas S_1 y S_2 que interfieren en un punto M cualquiera, presentan una diferencia de trayectoria geométrica y óptica:

$$\delta = S_1M - S_2M,$$

es decir una diferencia de fase

$$\phi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$$

A la magnitud sin dimensiones $\frac{\delta}{\lambda}$ se le denomina "orden de interferencia", el cual caracteriza a una determinada franja brillante.

6.- Condiciones de interferencia.- Para que el fenómeno de interferencia se realice, se requieren ciertas condiciones:

a) Las vibraciones deben ser coherentes, o sea que deben provenir de una misma fuente y seguir dos caminos diferentes para producir, una vez que se vuelvan a encontrar, las franjas de interferencia. Por tanto, si en el experimento de Young se reemplaza la fuente única S por dos fuentes S_1 y S_2 , situadas enfrente de cada abertura, no se observará interferencia alguna, ya que las vibraciones emitidas por S_1 y S_2 no tienen entre ellas ninguna relación permanente de fase.

Por consiguiente, para observar las interferencias de la luz es necesario disponer de dos fuentes luminosas de igual período, cuyas vibraciones estén ligadas de tal manera que los cambios de fase se produzcan simultáneamente en las dos fuentes y que su diferencia de fase permanezca constante.

b) El orden de interferencia no debe variar de manera apreciable cuando se consideran las diversas radiaciones monocromáticas emitidas por la fuente. Se demuestra que para una repartición continua de longitudes de onda en un pequeño intervalo espectral $d\lambda$, la desaparición de las franjas se

produce cuando el orden de interferencia vale, aproximadamente

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

c) Si la fuente es puntual se obtendrán las interferencias cada vez que los haces luminosos se encuentren y, por supuesto, las franjas no estarán localizadas. Si la fuente no es puntual, será necesario que la diferencia de trayectoria "δ" se mantenga constante

7.- Interferencias por reflexión. - Para la mejor comprensión de este fenómeno, supóngase una cuerda elástica tendida AB, fija en B y sometida a un movimiento vibratorio que produce, a partir de A, una deformación CD que se propaga con la velocidad "v" (Fig. IV-7).

En la cuerda AB, inicialmente, la perturbación incide al ir desde al caso de un cierto tiempo, una posición C₁D₁ situada más allá de B. Pero como no es así, sino que ha sufrido una reflexión al incidir en B, ella ocupará una posición C₂D₂ simétrica de C₁D₁ con respecto a B (Fig. IV-7b). Es decir que, en el intervalo de tiempo considerado, la perturbación se ha invertido. Lo anterior se conoce como una reflexión con cambio de signo.

En efecto, considérese la cuerda en un instante en el cual la perturbación inicial CD pase por B (Fig. IV-7c). En rigor, sólo la parte CE es real. La parte ED debe de ser reemplazada por la perturbación reflejada E'D'; el desplazamiento real de los puntos de la cuerda es igual a la adición de las curvas CE y E'D', siendo el punto B fijo, por definición, es necesario que los desplazamientos componentes BE y -BE' sean opuestos.

Sea Y₀ = f(t) el movimiento de la fuente A. En un punto M, situado a una distancia "δ" de A, la perturbación incidente es:

$$Y_i = f\left(t - \frac{\delta}{v}\right)$$

Si se denomina "L" la longitud de la cuerda, la perturbación reflejada habrá recorrido el trayecto AB + B'M, es decir, (2L - δ). Se puede considerar que esta perturbación proviene del punto A', imagen de A, que constituye una fuente que produce a cada instante un movimiento opuesto al originado en A y con una ecuación Y₀' = -f(t). La perturbación reflejada en M es, entonces:

$$Y_r = -f\left(t - \frac{2L - \delta}{v}\right)$$

Si la fuente A emite vibraciones cosinusoidales, las ecuaciones de la onda incidente y de la onda reflejada son respectivamente:

$$Y_i = a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\delta}{\lambda} \right)$$

$$Y_r = -a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2L - \delta}{\lambda} \right)$$

$$= a \cos 2\pi \left[\left(\frac{t}{T} - \frac{2L - \delta}{\lambda} \right) - \pi \right]$$

$$= a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2L - \delta}{\lambda} - \frac{\pi}{2\pi} \right)$$

es decir:

$$Y_r = a \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2L - \delta + \frac{\lambda}{2}}{\lambda} \right)$$

Se observa que la vibración reflejada en B ha recorrido, a partir de la fuente A, la trayectoria AB + B'M aumentada en λ/2. Se acostumbra decir, en lugar de "reflexión con cambio de signo", que la reflexión introduce un retardo de media longitud de onda, o una diferencia de fase π.

En resumen, el estado vibratorio de un punto de la cuerda resulta de la superposición de las ondas incidentes y reflejadas.

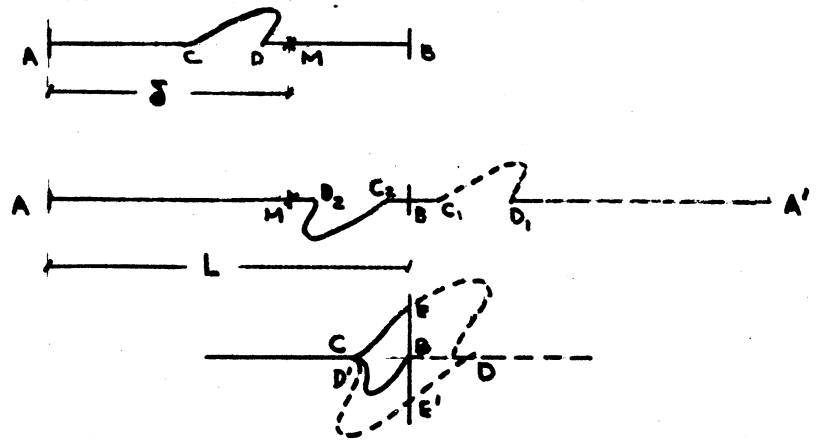


Fig IV-7

B) INTERFERENCIA DE LUZ BLANCA.

1. Composición de la luz blanca.— La luz blanca está compuesta de una combinación de todas las longitudes de onda visibles al ojo, es decir, de radiaciones monocromáticas comprendidas entre 0.39 micras, para la luz violeta, y 0.76 μ para la luz roja, aproximadamente, las que constituyen el espectro visible. Estas radiaciones se continúan hacia longitudes de onda más pequeñas (rayos ultravioleta, rayos X y rayos gamma) del orden de 1 a 0.01 μ , e igualmente hacia las grandes longitudes de onda para los rayos infrarrojos y las ondas hertzianas (del orden de centenas de metros).

2. Escala de Newton de centro blanco.— Si en lugar de luz monocromática se emplea luz blanca en cualquier dispositivo para producir interferencias (p.ej.: los espejos de Fresnel); a cada radiación correspondiente un sistema de franjas, el cual se mezclará con los sistemas de otras radiaciones. La intensidad observada en un punto será la suma de las intensidades correspondientes a las diferentes radiaciones.

Puesto que la franja central coincide para todos los colores, será una franja blanca rodeada de dos franjas más oscuras, de una manera semejante a las obtenidas en luz monocromática; pero a partir de las dos franjas brillantes siguientes que la rodean de cada lado, se comenzarán a observar irisaciones (Figs. IV-8 y 9). Los puntos más brillantes parecen ser A_1 y A_1' , respectivamente, donde la intensidad es máxima para las radiaciones amarillas, ya que corresponde al máximo de

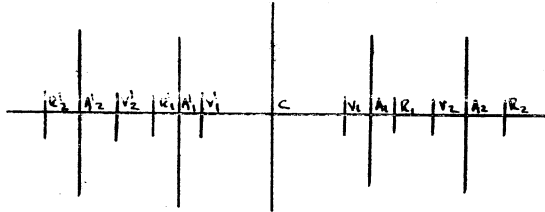


Fig. IV-8

intensidad es visto por el ojo; pero la intensidad de las radiaciones violetas, la longitud de onda más corta, es ya mínima en V_1 y V_1' mientras que la de las radiaciones rojas lo es en R_1 y R_1' . Por consiguiente, cada franja brillante estará rodeada de violeta al interior y rojo al exterior.

Los colores observados pertenecen a una escala denominada "Escala de Newton de centro blanco". Se dice que aquellos colores comprendidos entre 0 y A_1 pertenecen al "primer orden", entre A_1 y A_2 al "segundo orden", etc. Sin embargo, a medida que se aleja de la franja central, los colores van cambiando de "blanco" y con cada vez menos perceptibles, dando a la superposición de diversas radiaciones que constituyen el "blanco" o "orden superior".

* 1 μ = 1 micra = 10^{-6} metros.

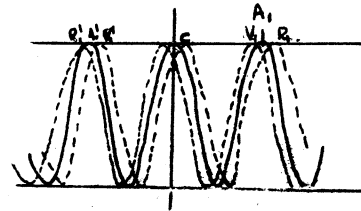


Fig. IV-9

De esta manera, mientras que en luz monocromática existe un número prácticamente ilimitado de franjas, en luz blanca es imposible obtener más de 5 o 6 franjas de cada lado de la franja central.

3. Escala de Newton de centro negro.— Si se utiliza el dispositivo de Lloyd, el cual consiste en un espejo largo E, de caras paralelas que recibe un haz de rayos luminosos provenientes de una fuente alejada "S" de luz blanca, situada, al mismo tiempo, muy cerca de la superficie del vidrio, se producirá el fenómeno de interferencia entre los rayos incidentes y reflejados como lo probará una pantalla P colocada junto al borde opuesto B del espejo.

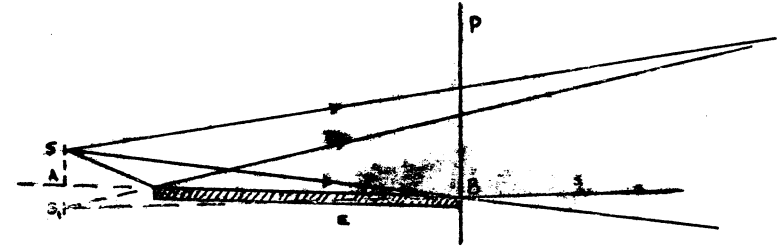


Fig. IV-10

Se podrá decir igualmente que las franjas de interferencia provienen de dos fuentes S y S₁, siendo S₁ la imagen de S. En consecuencia el fenómeno será de interferencia por reflexión y se ha visto que, en este caso, se introduce un retardo óptico de $\lambda/2$ o una diferencia de fase π .

Por lo tanto, la franja central, correspondiente a longitudes iguales de los rayos SB y S₁B es negra, pues los puntos S y S₁ están en oposición de fase. En este dispositivo no se observa más que las franjas situadas encima de la franja central. Se tiene, de este modo, la escala de Newton de centro negro y, como se mostrará más adelante, al hablar de polarización cromática, cada color de esta escala es complementario del correspondiente a la escala de Newton de centro blanco. La discusión de los colores observados se hará, igualmente, en dicho capítulo.



CAPITULO V
POLARIZACION DE LA LUZ

1. Luz natural y luz polarizada.- La luz natural es aquella que proviene directamente de la fuente luminosa sin haber sufrido ni reflexión ni refracción y vibra en todas direcciones alrededor de la línea de transmisión. Estas vibraciones pueden ser separadas en dos componentes rectangulares, observándose que no presentan ninguna relación de fase, pues existen cambios repentinos y al azar en ϕ , que se producen en intervalos de tiempo del orden de 10^{-8} seg.; en otras palabras, las componentes rectangulares de la luz natural son incoherentes entre ellas.

Si se establece la coherencia por algún método que será descrito inmediatamente, se dice que la luz es polarizada. Este tipo de luz vibra en una sola dirección. Si la coherencia es sólo parcial, la luz será parcialmente polarizada.

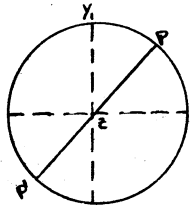


Fig. V-1

Supóngase un haz luminoso que se transmite hacia el observador a lo largo del eje z, perpendicular al plano de la Fig. V-1, y que vibra linealmente con la dirección y amplitud indicadas. Si esta vibración continúa sin cambiar será plana polarizada, ya que sus vibraciones estarán confinadas al plano que contiene al eje Z y orientadas al ángulo ϕ con respecto a una dirección origen. En cambio, en el caso de la luz natural, al sucederse los cambios bruscos y al azar de ϕ , en intervalos de tiempo infinitamente pequeños, cada orientación de PP' será igualmente probable y el efecto promedio será simétrico respecto de la dirección de propagación, como lo muestra el círculo de dicha figura.

Se acostumbra representar la luz polarizada de la manera que se ilustra en las figuras V-2a y b, y la luz natural tal como se ilustra en la figura V-2c (como si estuviera constituida de dos componentes planas polarizadas a ángulo recto). Se ha dibujado, también, cómo se verían los extremos de esas vibraciones, perpendicularmente a la dirección de los rayos.

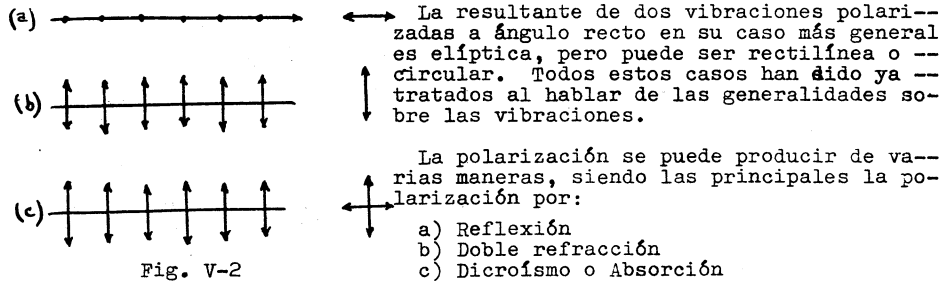


Fig. V-2

Supóngase un haz luminoso que se transmite hacia el observador a lo largo del eje z, perpendicular al plano de la Fig. V-1, y que vibra linealmente con la dirección y amplitud indicadas. Si esta vibración continúa sin cambiar será plana polarizada, ya que sus vibraciones estarán confinadas al plano que contiene al eje Z y orientadas al ángulo ϕ con respecto a una dirección origen. En cambio, en el caso de la luz natural, al sucederse los cambios bruscos y al azar de ϕ , en intervalos de tiempo infinitamente pequeños, cada orientación de PP' será igualmente probable y el efecto promedio será simétrico respecto de la dirección de propagación, como lo muestra el círculo de dicha figura.

2. Polarización por reflexión.- Etienne MALUS (1775-1812), descubrió este fenómeno de la manera siguiente:

Un espejo de cristal E, cuya cara posterior está ennegrecida, recibe un haz SI de luz natural bajo un ángulo de incidencia de 57° . Un segundo espejo E', semejante al primero, recibe el haz reflejado II' bajo el mismo ángulo de incidencia. El segundo haz reflejado I'R se observa en una pantalla blanca (Fig.V-3).

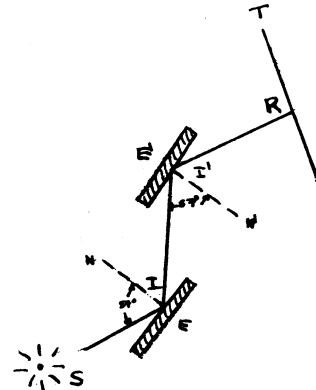


Fig. V-3

Si se designan por P y P' los dos planos de incidencia definidos, el primero por las dos direcciones IN e II' y el segundo por II' e I'N' se observa que cuando los dos planos se confunden, la mancha luminosa que se obtiene en la pantalla T es muy brillante.

Partiendo de esta posición y haciendo girar E' alrededor de un eje paralelo a II', de modo que el ángulo II'N' permanece constante, la mancha luminosa se vuelve cada vez menos brillante, a medida que el ángulo α entre los dos planos PP' aumenta, hasta anularse cuando éstos son perpendiculares, para volver a aumentar progresivamente, si se continúa la rotación, hasta alcanzar de nuevo un valor máximo, igual al inicial, cuando $\alpha = 180^\circ$.

La luz que proviene de la fuente S y recorre el trayecto SI es luz natural: su intensidad no cambia si se gira E alrededor de SI. Se dice que posee una simetría de revolución alrededor de SI.

El haz II', en cambio, no presenta simetría de revolución, porque la rotación de E' alrededor de II' modifica el valor de la intensidad reflejada. Este último haz está formado por luz polarizada.

El espejo E recibe el nombre de polarizador; el espejo E', que permite constatar la polarización de II' es el analyzer; el plano P que contiene a II' es el plano de polarización; el plano que le es perpendicular es el plano de vibración.

3. Ley de Brewster.- La polarización de la luz por reflexión sobre una sustancia transparente es completa únicamente para un valor del ángulo de incidencia "i" perfectamente definido. La experiencia muestra que esta incidencia está relacionada con el índice de refracción "n" de la sustancia transparente mediante la ley de David Brewster (1781-1868).

$\tan i = n$

En el caso del vidrio, cuya índice n es igual a 1.5, se obtiene $i = 57^\circ$.

En las cercanías de esta incidencia, llamada "brewsteriana", la luz se encuentra parcialmente polarizada.

Si se comparan la ley de la refracción de Descartes con la ley de Brewster, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{sen } i &= n \text{ sen } r \\ \text{sen } i &= n \text{ cos } i \end{aligned}$$

de donde se concluye que:

$$\begin{aligned} \text{sen } r &= \text{cos } i \\ r &= 90^\circ - i \end{aligned}$$

es decir, para que se cumpla la ley de Brewster, es necesario que los ángulos de incidencia y de refracción sean complementarios. Dicho de otro modo: "La incidencia brewsteriana es tal que el rayo reflejado es normal al rayo refractado" (Fig. V-4).

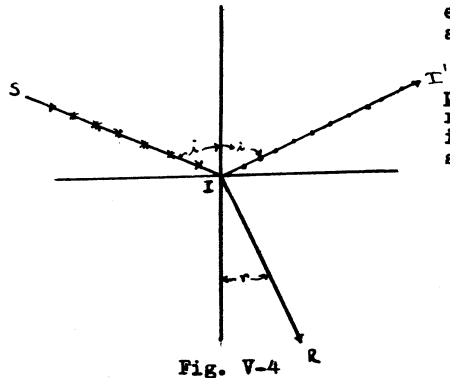


Fig. V-4

Los polarizadores por reflexión son poco luminosos: La intensidad del haz reflejado II' es del orden del 7% de la intensidad incidente; por tal razón no se les emplea en la práctica.

4. Transversalidad de las vibraciones luminosas. - La polarización de la luz nos muestra que la vibración luminosa no puede ser longitudinal, pues si se girase E' alrededor de II' (Fig. V-3), no se obtendría ninguna variación en la intensidad del rayo reflejado.

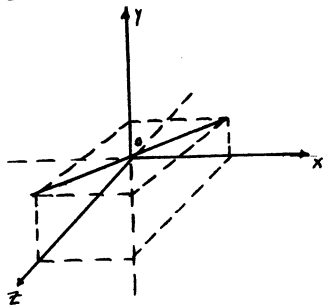


Fig. V-5

La vibración no puede efectuarse tampoco en una dirección oblicua a II' , pues si así fuera, habría que descomponerla en tres vibraciones rectangulares: una según II' (eje OY , Fig. V-5), otra en el plano de polarización (OX) y la tercera en el plano perpendicular a ambas (eje OZ). Pero para que se pueda obtener una extinción completa es necesario que la componente II' sea nula. Por consiguiente, la vibración luminosa es transversal.

5. Polarización por doble refracción. - Si se hace incidir un haz paralelo de luz natural, normalmente a una lámina de calcita de caras paralelas, tallada de manera que el eje ternario se encuentre en el plano de la figura V-6, se obtendrán dos haces luminosos, uno IO no

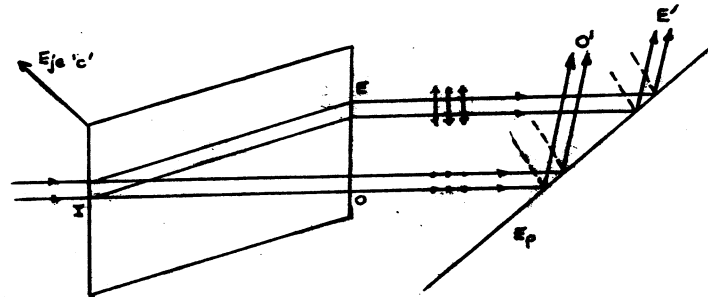


Fig. V-6

desviado, el otro IE desviado, que se propagan con velocidades diferentes, y por tanto, con índices n_o y n_e diferentes, respectivamente. El primero se designa como "haz ordinario" y el segundo como "haz extraordinario", porque no sigue las leyes de refracción de Descartes para las sustancias isotrópicas.

Como la calcita es un mineral muy birrefringente, es decir que la diferencia entre sus n_o y n_e es muy grande, siempre será posible obtener, con una lámina gruesa y un haz incidente oblicuo, dos haces emergentes, separados por completo a la salida de la lámina.

Se constata que el haz extraordinario vibra en un plano de sección principal, es decir, en un plano determinado por la normal a la cara de incidencia y el eje ternario, mientras que el rayo ordinario vibra en un plano que le es perpendicular. Se constata, además, que los dos haces emergentes poseen la misma intensidad (Fig. V-7).

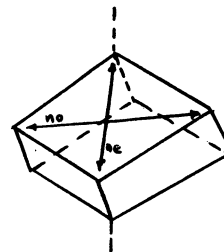


Fig. V-7

Si se reciben estos haces en un analizador (espejo E_p bajo incidencia brewsteriana), se observa que los haces reflejados no poseen en general la misma intensidad, lo que demuestra que los haces transmitidos por el cristal están polarizados.

Haciendo girar el analizador alrededor de la dirección de incidencia cuando el plano de incidencia coincide con el plano de sección principal, el haz ordinario tendrá un máximo de intensidad, mientras que el haz extraordinario se extinguirá. Cuando el plano de incidencia gira a partir de esta po-

sición, la intensidad del rayo extraordinario aumenta y la del haz ordinario disminuye, hasta que éste se extingue cuando los dos planos son perpendiculares.

Por tanto, se concluye que los dos haces emergentes están polarizados rectilíneamente a ángulo recto; el plano de vibración del haz extraordinario es el plano de la sección principal, y el del haz ordinario lo es perpendicular.

6. Polarizadores.- Los polarizadores se emplean para producir luz polarizada rectilíneamente. Su principio general consiste en separar la luz natural en dos componentes y en eliminar a una de ellas.

a) Esta separación puede realizarse de manera espontánea con una lámina de turmalina de caras paralelas, con un espesor suficiente (1 a 2 mm) y tallada paralelamente a su eje ternario; de esta forma, sólo el haz extraordinario, que vibra en un plano paralelo al eje puede atravesarla, ya que la vibración ordinaria es absorbida por completo. Se obtiene así, un polarizador por absorción, llamado también por dicroísmo.

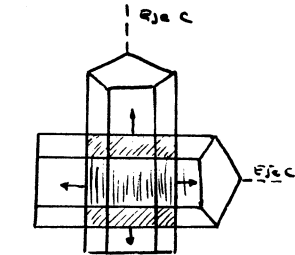
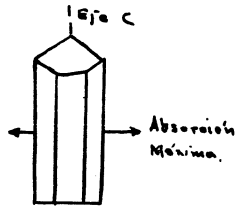


Fig. V-8

El prisma de Nicol está formado por un romboedro de espato de Islandia tallado de tal manera que la arista AC' sea aproximadamente 2.5 a 3 veces más grande que la arista AB (Fig. V-9a). El eje ternario se encuentra en el plano de simetría ACA'C' normal a la cara incidente ABCD.

Si se superpone a esta lámina otra lámina de turmalina similar, de modo que una desempeñe el papel de polarizador y la otra de analizador, se verificará la polarización, produciéndose extinción cuando sus ejes ternarios respectivos son perpendiculares (Fig. V-8).

Los polaroides empleados en el comercio son suspensiones en un material plástico de microcristales dicroicos, orientados paralelamente los unos a los otros, antes de la solidificación del conjunto. Uno de estos materiales es la herapatita o "turmalina artificial", compuesta de sulfato de yodocincondina, substancia fuertemente absorbente.

b) Siendo la calcita un mineral muy birrefringente y puesto que se puede encontrar en bellos cristales transparentes y homogéneos (espato de Islandia), es posible la fabricación de polarizadores a partir de ella. Para absorber uno de los haces luminosos transmitidos se la talla de diversas maneras convenientes. El proceso más antiguo de este tipo de tallado es el de William Nicol (1768-1851).

Se corta al cristal siguiendo un plano AA', perpendicular al plano de simetría (el ángulo que forma AA' con AC será de alrededor de 88°). Las dos mitades obtenidas se vuelven a unir con bálsamo de Canadá, cuyo índice $n_p = 1.54$ está comprendido entre los dos índices extremos del cristal ($n_o = 1.658$ y $n_e = 1.486$).

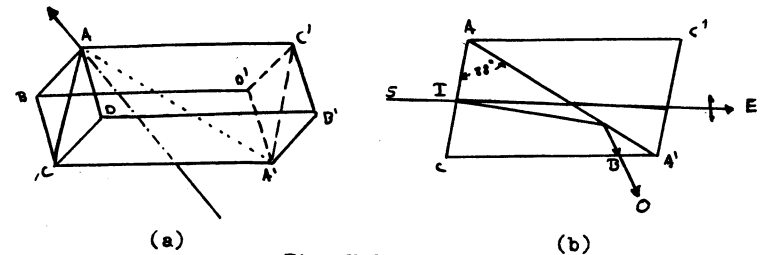


Fig. V-9

Supóngase un rayo incidente SI paralelo a las aristas laterales del espato (Fig. V-9). Al entrar en este medio se descompondrá en un rayo ordinario y otro extraordinario, siendo el primero el más desviado. La longitud AC' ha sido escogida de tal manera que el rayo ordinario incida en la superficie de separación AA' bajo un ángulo superior al crítico, lo cual es siempre posible, ya que el índice del bálsamo es menor que el del rayo ordinario. Por tanto, éste último sufre la reflexión total y es absorbido por una capa negra que cubre las aristas laterales. Al mismo tiempo el rayo extraordinario, que en esas condiciones tiene un índice casi igual al del bálsamo, atraviesa la capa cementante con una desviación insignificante; este rayo emergente está polarizado por completo. Su plano de vibración es el plano de sección principal del nicol.

En consecuencia, un prisma de Nicol es atravesado únicamente por las vibraciones luminosas situadas en su plano de simetría.

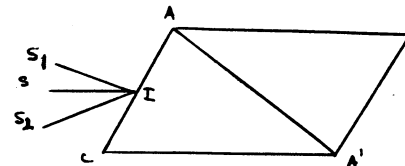


Fig. V-10

El prisma de Nicol polariza sólo los rayos comprendidos en el ángulo S_1IS_2 , el cual es de 27 grados (Fig. V-10). Si los rayos incidentes están más inclinados que S_1I , los rayos extraordinarios sufren reflexión total, pues sus índices de refracción aumentan a partir de SI; si los rayos incidentes están más inclinados que S_2I , los rayos ordinarios producidos ya no sufren la reflexión total. Este ángulo de 27° se denomina "campo del nicol" y es casi simétrico con respecto a SI.

7. Ley de Malus.- Si se colocan dos prismas de Nicol, uno enfrente de otro, y se hace incidir sobre uno de ellos un haz de luz paralelo a la arista AC' (Fig. V-11), se constata que la intensidad transmitida es máxima cuando los planos de sección principal son paralelos y nula cuando son perpendiculares, siguiendo la ley de Malus.

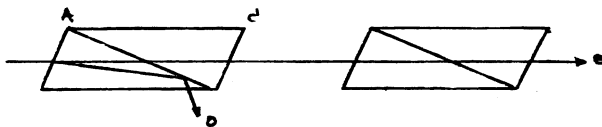


Fig. V-11

La ley de Malus, comprobada mediante efectos fotoeléctricos, evalúa la intensidad de la luz transmitida por un sistema polarizador-analizador. Se enuncia como sigue:

"La intensidad transmitida por un sistema polarizador-analizador es proporcional al cuadrado del coseno del ángulo α formado por los dos planos de polarización".

La comprobación de esta ley descansa en el hecho de que cualquier vibración plana polarizada, por ejemplo la que proviene del primer nicol, puede descomponerse en dos vibraciones, una paralela al plano de vibración del segundo nicol (analyzer) y la otra perpendicular a él (Fig. V-12). Si "a" representa la amplitud de la vibración que proviene del polarizador, sólo podrá entrar al analizador la onda cuya amplitud a_1 es igual a:

$$a_1 = a \cos \alpha$$

y la intensidad resultante será:

$$I_1 = a_1^2 = a^2 \cos^2 \alpha$$

Si $\alpha = 0^\circ$, o sea cuando los planos de polarización son paralelos, la intensidad es máxima. Para $\alpha = 90^\circ$ ella será nula. Se dice, en estas condiciones, que los nicols están cruzados.

Por otro lado, en un nicol los haces ordinarios y extraordinarios tienen la misma intensidad; se puede decir, en consecuencia, que cada uno posee la mitad de la intensidad I_0 del haz incidente, o sea $I_1 = I_0/2$.

CP = plano de vibración del polarizador.
 CP' = plano de vibración del analizador.

Fig. V-12

CAPITULO VI

PROPAGACION DE LA LUZ EN LOS MEDIOS CRISTALINOS

1. Isotropía y Anisotropía.- Según sea la uniformidad con que la luz se transmite a través de ellos, los cristales pueden ser isotrópicos o anisotrópicos. En los primeros, la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones; en los segundos, dicha velocidad varía con la dirección de propagación.

Todos los cristales son anisotrópicos, a excepción de aquellos que pertenecen al sistema isométrico. Entre éstos, sólo son perfectamente isotrópicos los que no han sido sujetos a deformaciones.

2. Elipsoide de los índices.- Si se coloca entre dos nicols cruzados una lámina cristalina anisotrópica de caras paralelas, normalmente a un haz luminoso, se observará que la luz vuelve a aparecer, salvo para ciertas orientaciones de la lámina respecto a los elementos de simetría, las cuales se precisarán más adelante.

Si se gira la lámina en su plano, se observará que existen dos direcciones perpendiculares entre sí en las cuales se produce extinción. A partir de una de estas posiciones la luz vuelve a aparecer, aumentando de intensidad progresivamente, hasta alcanzar un máximo a los 45° , para después disminuir de la misma manera y anularse, para una posición de 90° respecto de la primera.

Por tanto, una lámina cristalina anisotrópica transmite sin alteración en general, normalmente a su sección, dos vibraciones polarizadas a ángulo recto, a las cuales corresponden dos índices de refracción n_1 y n_2 diferentes.

Se puede materializar fácilmente sobre la lámina las dos direcciones de extinción, con respecto a una línea de referencia. En consecuencia, a partir del centro O del cristal de donde se tomó la lámina, se trazan en el plano de la lámina las direcciones de extinción y sobre cada una de ellas se lleva el índice que les corresponde a partir de O (Fig. VI-1).

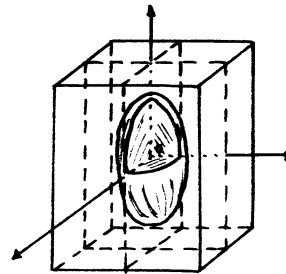


Fig. VI-1

Si se opera de la misma manera para una infinidad de láminas orientadas diversamente, el lugar de las extremidades de los vectores Om es un elipsoide denominado "elipsoide de los índices de Fresnel" o bien "indicatriz óptica".

Dicho de otra manera, si a partir de una fuente luminosa monocromática puntual colocada en el centro de un cristal anisotrópico, se llevan longitudes OP, OP', OP'', \dots iguales a los índices de refracción n, n', n'', \dots del cristal según esas direcciones, el lugar de los puntos P, P', P'', ... es un elipsoide (Fig. VI-2).

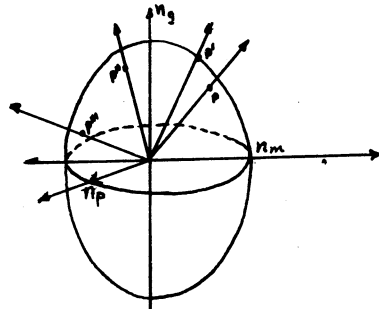


Fig. VI-2

3. Propiedades del elipsoide.- El elipsoide es una superficie centrada en la cual la inmensa mayoría de las secciones diametrales son elipses. Posee tres ejes rectangulares perpendiculares entre sí, que corresponden a las direcciones de mayor índice " n_g ", menor índice " n_p " y de índice intermedio " n_m ", sin ser esta última el promedio aritmético de las otras dos. Dichos índices se denominan "índices principales" del medio anisotrópico considerado. Todas las vibraciones paralelas a cada eje se propagan con la misma velocidad. En general, cada uno de los radios vectores del elipsoide de los índices representa a la vez la dirección de una vibración luminosa y su índice de refracción.

La ecuación del elipsoide referida a un sistema cartesiano, cuyos ejes OX, OY, OZ coinciden con los índices principales, respectivamente será:

$$\frac{x^2}{n_g^2} + \frac{y^2}{n_m^2} + \frac{z^2}{n_p^2} = 1$$

siendo: $n_g > n_m > n_p$

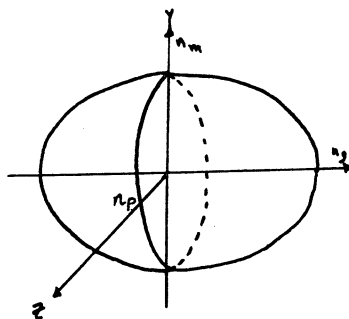


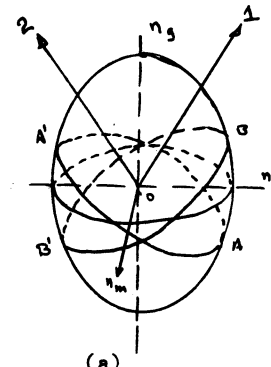
Fig. VI-3

Puesto que posee tres ejes de simetría binaria, tres planos perpendiculares a ellos y un centro de simetría, el elipsoide tiene en su caso general, una simetría ortorrómbica.

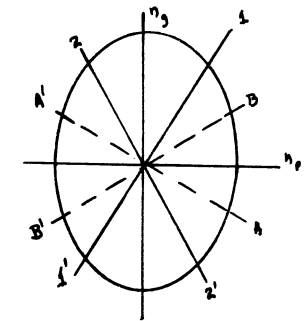
4. Secciones circulares del elipsoide.- Supóngase una sección del elipsoide que contenga a OY (de índice n_m) y que gire alrededor de este eje (Fig. VI-4a). Como $n_g > n_m > n_p$ y como se puede pasar de una manera progresiva de n_g a n_p , existirá una posición de la sección para la cual $OA = n_m$ y $OB = n_p$ que será, evidentemente un círculo. De acuerdo con la simetría del elipsoide habrá dos secciones circulares. Las normales a cada sección circular se denominan ejes ópticos. (Fig. VI-4b).

Es evidente que en una sección circular no existe ninguna dirección privilegiada. Para esa posición, el cristal se comporta como un cuerpo isotrópico que posee un índice n_m .

Finalmente el elipsoide puede degenerar en un elipsoide de revolución y éste, a su vez, en una esfera.



(a) O1 y O2 = ejes ópticos
AA' y BB' = secciones cíclicas



(b) Sección $n_g - n_p$ del elipsoide
AA' y BB' = trazas de las secciones cíclicas.
11' y 22' = Ejes ópticos

Fig. VI-4

5. Aplicaciones del elipsoide a los cristales.- Puesto que los diferentes sistemas cristalinos dependen de los elementos de simetría que poseen y puesto que de la naturaleza de esos elementos depende el carácter de los fenómenos ópticos, los elementos de simetría del cristal serán necesariamente los mismos que los del elipsoide de los índices. La recíproca no es cierta: el elipsoide y, en consecuencia, los fenómenos ópticos que determina, pueden presentar un grado de simetría más elevado que el del cristal.

1o.) Caso General: Cristales de los sistemas ortorrómbico, monoclinico y triclinico.

Estos cristales poseen como máximo, elementos de simetría binarios.

Si se corta al elipsoide por un plano diametral cualquiera, los dos vibraciones n_1 y n_2 de la elipse resultante serán extraordinarias y sus valores estarán comprendidos entre:

$$n_p \leq n_1 \leq n_m \leq n_2 \leq n_g$$

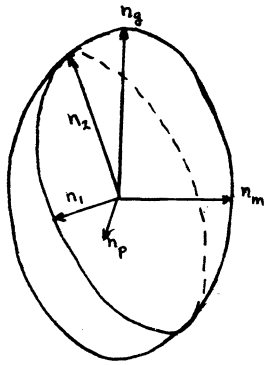
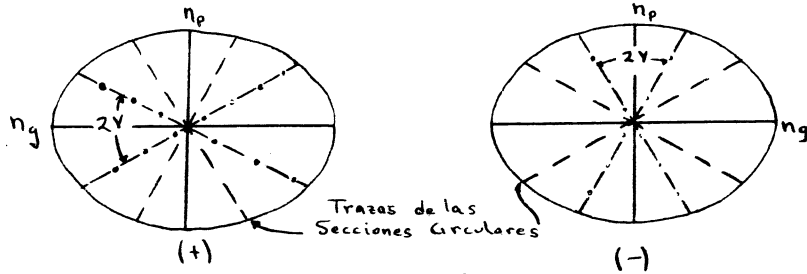


Fig. VI-5

Por convención, se denomina vibración ordinaria aquélla que se encuentra entre el diedro agudo de las dos secciones circulares. Como en este caso existen dos ejes ópticos, este tipo de cristales se denomina **biáxico**.

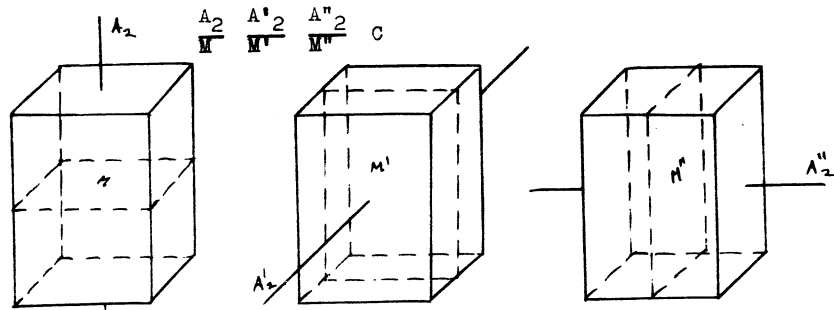
Los cristales biáxicos son positivos cuando n_p es la bisectriz aguda de las secciones circulares. Son negativos cuando ese papel lo desempeña n_g . Naturalmente que un cristal biáxico es **g** positivo cuando la bisectriz aguda del ángulo entre los ejes ópticos ($2V$) en n_g y negativo cuando lo es n_p (Fig. VI-6).



Trazos de las Secciones Circulares

Fig. VI-6

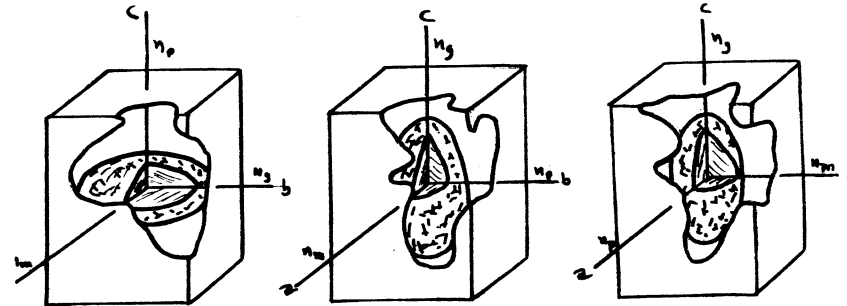
En el sistema ortorrómbico, cuyos elementos de simetría son:



Prisma de referencia; Prisma recto de base rectangular.

Fig. VI-7

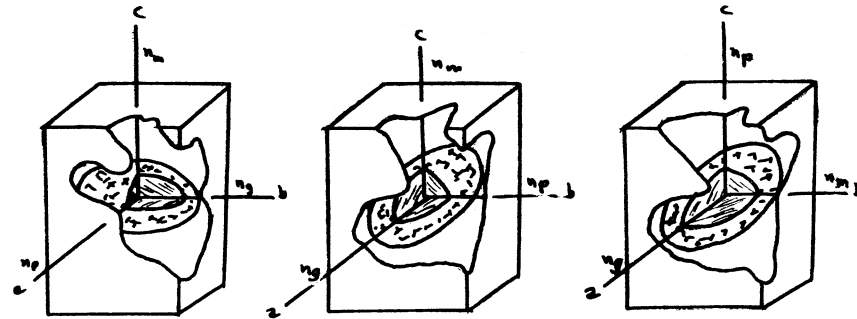
los tres ejes principales del elipsoide coinciden con los ejes binarios del cristal; los tres planos de simetría del elipsoide se confunden con los del cristal. Sin tener en cuenta la distinción entre biáxico positivo y biáxico negativo, el elipsoide de los índices puede ocupar seis posiciones diferentes. Los ejes ópticos podrán encontrarse en los tres planos de simetría del cristal (Fig. VI-8).



Lawsonita
Cordierita
Aragonita

Enstatita
Hiperstena
Estaurolita

Antofilita
Topacio
Sillimanita



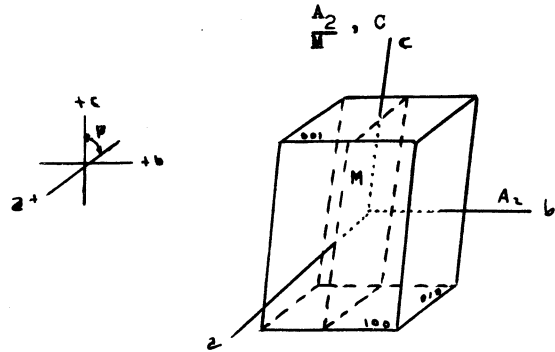
no hay ejemplo

Olivino

Andalucita
Dumortierita

Disposición del elipsoide de los índices en el sistema ortorrómbico.
Fig. VI-8

En el sistema monoclinico, los cristales poseen un solo eje binario, un plano que le es perpendicular y un centro de simetría, es decir:

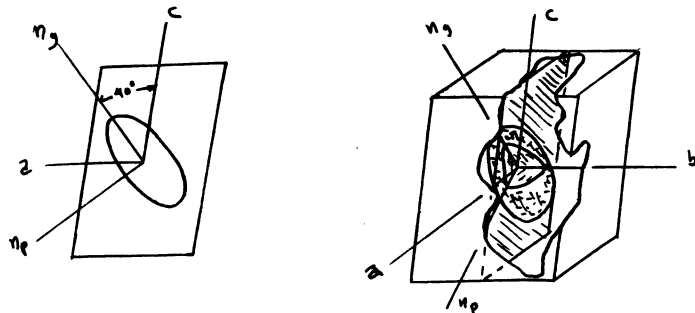


Prisma oblicuo de base rectangular
Fig. VI-9

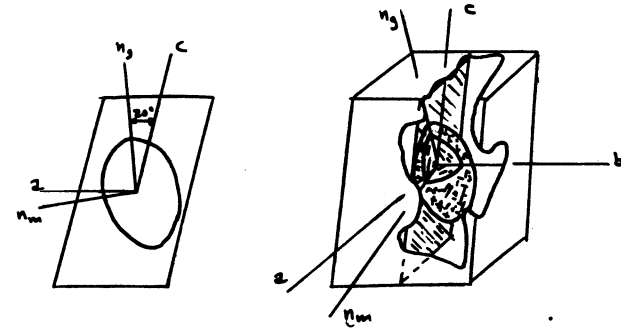
Uno de los índices principales del elipsoide coincidirá con el -- eje de simetría del cristal. El elipsoide podrá girar alrededor de ese eje y ocupar una posición cualquiera, la cual es fija para un mineral -- dado.

La posición del elipsoide estará determinada por tres datos:

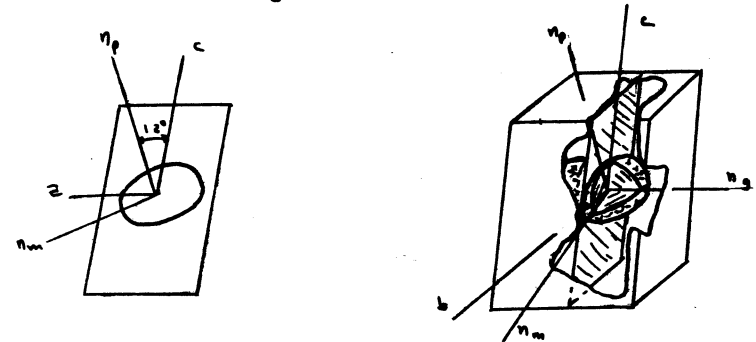
- La naturaleza del eje del elipsoide confundido con el eje de simetría "b" del cristal.
- La naturaleza del eje del elipsoide que forma un ángulo agudo con el eje cristalográfico "c", en el plano de simetría del cristal, y
- El valor de ese ángulo. (Figs. VI-10a,b,c)



- n_m confundido con el eje b.
- n_p forma un ángulo agudo con "c".
- Dicho ángulo vale 40° para la augita
Fig. VI-10a.



- n_p coincide con el eje b; el plano de los ejes ópticos contiene a "b".
- n_p forma un ángulo agudo con c.
- Dicho ángulo vale 20° (clinoenstatita)
Fig. VI-10b.



- n_p coincide con el eje b; el plano de los ejes ópticos contiene a b.
- n_p forma un ángulo agudo con c.
- Dicho ángulo vale de 6 a 40° (Alfvedsonita)
Fig. VI-10c.

En el sistema triclinico, el único elemento de simetría que puede existir es el centro. En consecuencia, el elipsoide de los índices ocupará una posición cualquiera. Sólo su centro puede coincidir con el -- centro de simetría.

2o.) Cristales de los sistemas tetragonal y hexagonal.

Estos cristales presentan un eje de simetría superior a dos y, -- por tanto, el elipsoide debe ser de revolución alrededor de ese eje -- principal. Además, solo la sección diametral perpendicular al eje de -- revolución es un círculo; todas las demás son elipses. Por tal razón, -- dicho eje es el único eje óptico, sola dirección de unirrefringencia, y los cristales se llamarán uniáxicos.

En estas condiciones existirán dos índices principales: uno que corresponde al eje óptico, que es el "índice extraordinario n_e " y el otro al radio del círculo ecuatorial, llamado "índice ordinario n_o ".

Si $n_e > n_o$, el cristal es uniaxial positivo (Fig. VI-11a)
 Si $n_e < n_o$, el cristal es uniaxial negativo (Fig. VI-11b)

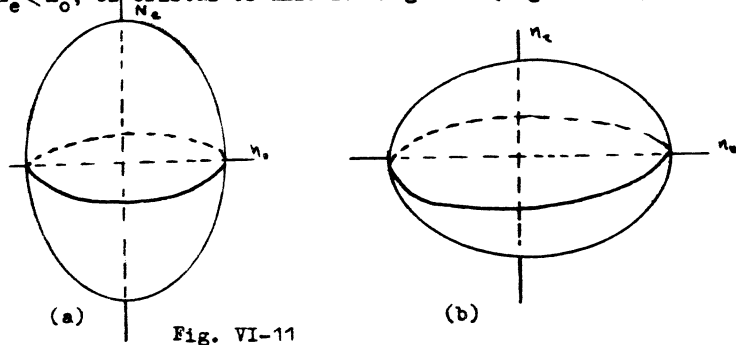


Fig. VI-11

Un plano diametral cualquiera cortará al elipsoide según una elipse, en la cual uno de sus ejes será siempre igual a n_o .

Considérense diversas orientaciones de planos que cortan al elipsoide de los índices de un cristal uniaxial positivo y considérese que se emplea luz paralela.

En una sección perpendicular al eje óptico, el rayo luminoso será paralelo al eje óptico. Este rayo no sufrirá desviación alguna y el mineral se comportará como un cuerpo isotrópico de índice n_o (Fig. VI-12).

(A) Orientación de la sección (B) Sección del elipsoide

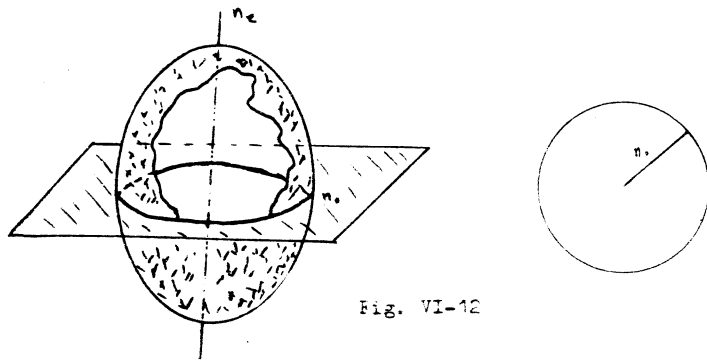


Fig. VI-12

En una sección paralela al eje óptico, el rayo luminoso da lugar a dos rayos refractados, cuyas direcciones de vibración se materializan por los ejes de la elipse, sección del elipsoide de los índices por el plano de la onda que pasa por el centro. Los ejes de la elipse indican los valores del índice correspondiente a cada vibración (Fig. VI-13).

(a) Orientación de la sección (b) Sección del elipsoide

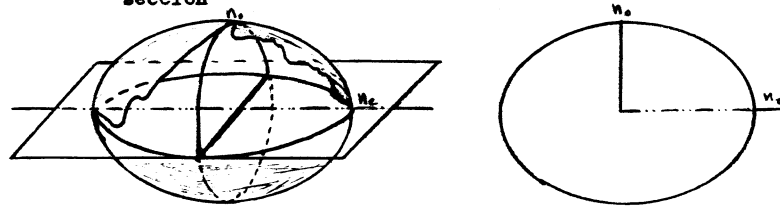


Fig. VI-13

Para una sección cualquiera el rayo luminoso da lugar a dos rayos refractados cuyas direcciones de vibración y el valor de los índices correspondientes se materializan por los ejes de la elipse de intersección con el plano de la onda llevado al centro. Uno de esos índices valdrá n_o , el otro $n_e' < n_o$. (Fig. VI-14).

(a) Orientación de la sección (b) Sección cualquiera

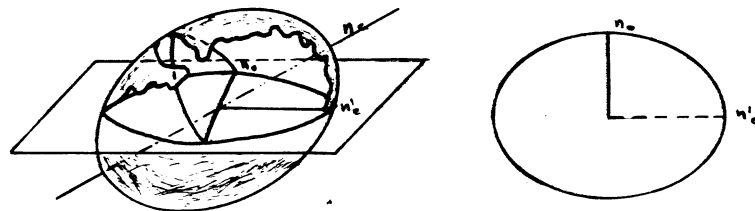


Fig. VI-14

La figura VI-15 muestra la disposición del elipsoide de los índices en cristales con simetría tetragonal y hexagonal.

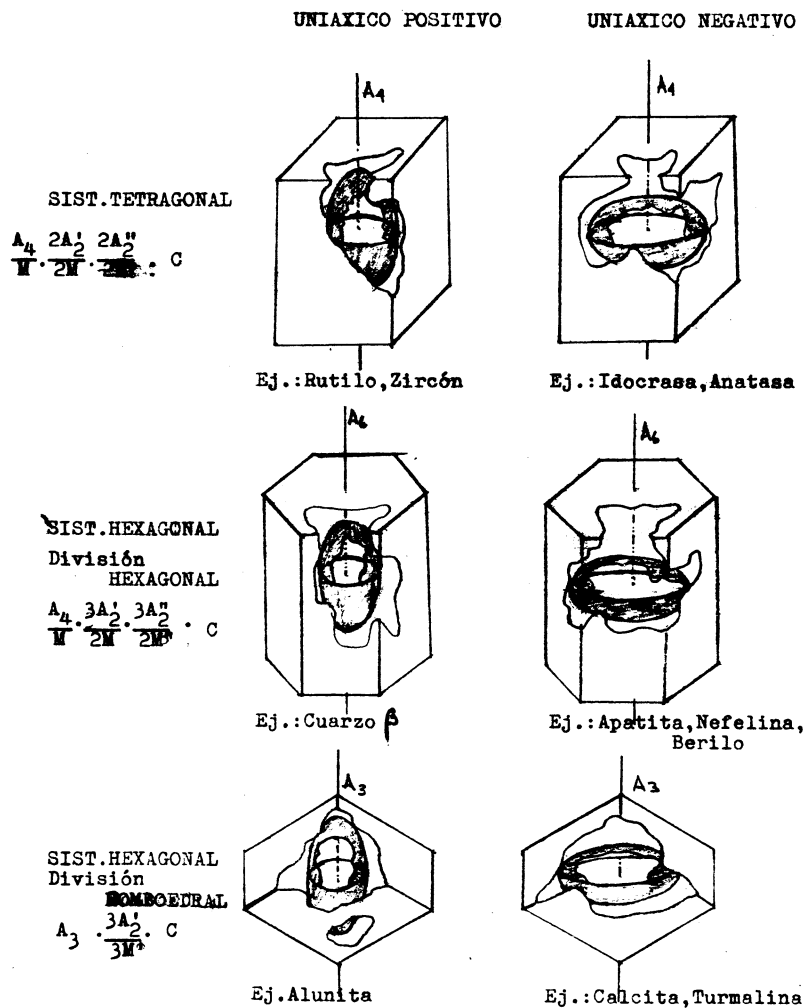
30.) Cristales del sistema isométrico.

Los elementos de simetría de los cristales que pertenecen a este sistema vienen dados por los símbolos:

$$\frac{3A_4}{3M} \cdot 4A_3 \cdot \frac{6A_2}{6M} \cdot C$$

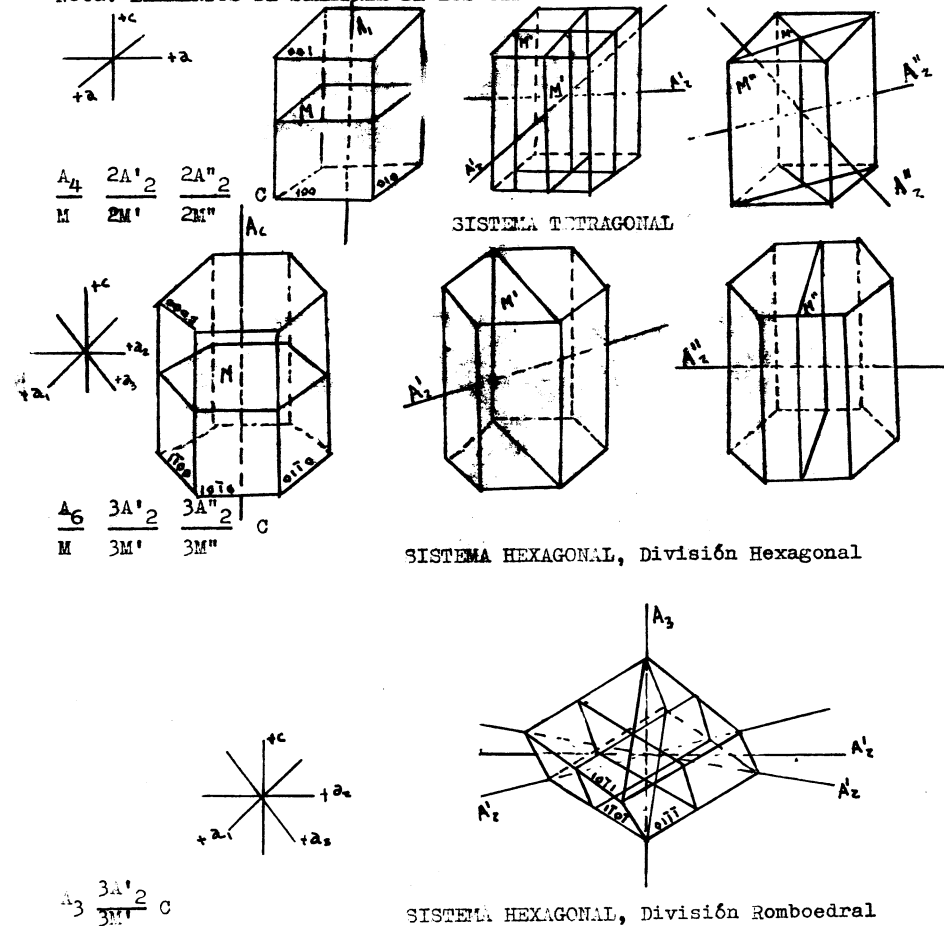
Fig.VI-15

DISPOSICION DEL ELIPSOIDE DE LOS INDICES



La existencia de tres ejes cuaternarios iguales, sin necesidad de hacer intervenir siquiera a los cuatro ejes ternarios y a los múltiples ejes binarios del sistema, es suficiente para demostrar que el elipsoide de los índices se reduce a una esfera. En consecuencia, los cristales del sistema isométrico se comportan, desde el punto de vista óptico, como los cuerpos isotrópicos.

Nota: ELEMENTOS DE SIMETRIA DE LOS DIFERENTES SISTEMAS CRISTALINOS.



CAPITULO VII

POLARIZACION CROMATICA EN LUZ PARALELA

1. Introducción.- Si se coloca entre dos nicoles una lámina cristalina y anisotrópica de caras paralelas, ni muy gruesa ni muy delgada, por ejemplo una laminilla de yeso obtenida por crucero, y se hace pasar un haz de luz blanca que incida normalmente a ella, se observarán unos colores, a menudo muy vivos, denominados "colores de interferencia".

El fenómeno que produce esas coloraciones es la polarización cromática, descubierta por François Arago (1786-1853) en 1811, cuando observaba el cielo en un tiempo despejado a través de un cristal de espato de Islandia. Habiendo colocado enfrente de éste una lámina de mica, -- vió que las dos imágenes producidas por el espato se teñían de colores muy vivos y diferentes, los cuales variaban al cambiar la inclinación de la lámina respecto de los rayos que la atravesaban. Como además -- había observado que los rayos del sol en un tiempo despejado se encuentran más o menos polarizados, según la posición del sol, y como en un tiempo nebuloso no se observaba ninguna coloración, atribuyó ese fenómeno a la polarización de la luz incidente.

Independientemente de la orientación del cristal con respecto a los nicoles y del ángulo formado entre éstos, la lámina da lugar a dos tintes complementarios el uno del otro.*

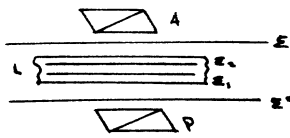
Unos de estos tintes se obtiene con el máximo de pureza cuando -- los nicoles están cruzados; en ese caso, si se gira la lámina alrededor de su normal, se extinguirá cuatro veces en una rotación de 360°, siendo las extinciones perpendiculares entre sí. La luz transmitida es -- máxima a 45° de las direcciones de extinción.

El otro tinte, complementario del precedente, se obtiene con la -- mayor pureza cuando los nicoles son paralelos. En este caso si se gira la lámina 360° se obtienen cuatro posiciones para las cuales la luz -- transmitida es blanca. Estas posiciones corresponden a las posiciones de extinción entre nicoles cruzados.

Para un cristal dado, el color observado depende del espesor y de la orientación de la lámina obtenida, respecto de los elementos de simetría del cristal.

2. Teoría del Fenómeno.-

1o) Caso de la luz monocromática.- Sea una onda plana Σ_c monocromática, de longitud de onda " λ ", que proviene de un polarizador "P" y cuyo plano de vibración es, por tanto, paralelo al de éste. (Fig.VII-1).



Sea, asimismo, una lámina "L" transparente, de caras paralelas, sección de un cristal anisotrópico, que recibe a la onda, la cual se descompone en el interior de la lámina en dos ondas Σ_1 y Σ_2 paralelas a sus caras. Estas ondas están polarizadas a ángulo recto y se propagan con

* Color complementario: Color que asociado a otro color dado reconstituye el blanco. Así el rojo es el color complementario del verde, el violeta del amarillo, etc.

dos velocidades diferentes. La sección del elipsoide de los índices para esta onda Σ_c da las dos direcciones de vibración de la lámina y los dos índices de refracción n_1 y n_2 .

Si se designa por "e" el espesor de la lámina y por v_1 y v_2 las dos velocidades de propagación, los tiempos t_1 y t_2 que requieren las dos vibraciones para atravesar el cristal valen, respectivamente:

$$t_1 = \frac{e}{v_1} \quad \text{y} \quad t_2 = \frac{e}{v_2}$$

A la salida de la lámina, estas vibraciones presentan una diferencia de trayectoria:

$$\delta = e (t_1 - t_2) = e \left(\frac{e}{v_1} - \frac{e}{v_2} \right) = e (n_1 - n_2)$$

es decir, una diferencia de fase:

$$\beta = \omega (t_1 - t_2) = \omega \frac{\delta}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$$

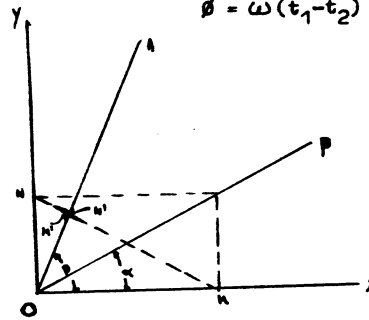


Fig. VII-2

Proyéctese sobre la cara de entrada de la lámina, que se tomará como plano de la figura VII-2, las direcciones de vibración OP del polarizador, OA del -- analizador, OX y OY las de la elipse de sección caracterizada por n_1 y n_2 .

Sean " α " el ángulo de OX con OP y -- " β " el formado por OX y OA. La vibración incidente, de dirección OP y de -- ecuación.

$$y = a \cos \omega t$$

puede descomponerse en dos vibraciones según OX y OY, de ecuaciones respectivas:

$$y_1 = OM = a \cos \alpha \cos \omega t$$

$$y_2 = ON = a \sin \alpha \cos \omega t$$

A la salida de la lámina las dos vibraciones presentan una diferencia de fase β y sus ecuaciones serán:

$$y_1' = a \cos \alpha \cos \omega t$$

$$y_2' = a \sin \alpha \cos (\omega t - \beta)$$

La resultante de esas dos vibraciones rectangulares es elíptica. Las vibraciones transmitidas por la lámina estarán en condición de interferir si son paralelas.

Ahora bien, el analizador no podrá recibir de cada una de ellas -- más que la componente paralela a su sección principal, de ecuaciones respectivas:

$$y''_1 = OM' = a \cos \alpha \cos \beta \cos \omega t$$

$$y''_2 = ON' = a \sin \alpha \sin \beta \cos (\omega t - \vartheta)$$

La vibración resultante será:

$$Y = y''_1 + y''_2$$

la cual se puede escribir bajo la forma

$$Y = B \cos \omega t + C \sin \omega t$$

haciendo:

$$B = a \cos \alpha \cos \beta + a \sin \alpha \sin \beta \cos \vartheta$$

$$C = a \sin \alpha \sin \beta \sin \vartheta$$

La amplitud resultante será tal, que:

$$A^2 = B^2 + C^2$$

es decir: $A^2 = a^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \beta + 2a^2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \cos \vartheta + a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \cos^2 \vartheta + a^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta \sin^2 \vartheta$
 $= a^2 [\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta (\cos^2 \vartheta + \sin^2 \vartheta) + 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \cos \vartheta] \dots \dots (1)$

Sabiendo que:

$$\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta = \cos^2 (\beta - \alpha)$$

Se puede sumar y restar a la ecuación (1) el término:

$2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta$; entonces:

$$A^2 = a^2 [\cos^2 (\beta - \alpha) + 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \cos \vartheta - 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta]$$

$$A^2 = a^2 [\cos^2 (\beta - \alpha) - 2 \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta (1 - \cos \vartheta)]$$

$$= a^2 [\cos^2 (\beta - \alpha) - 4 \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta \sin^2 \vartheta / 2]$$

$$= a^2 [\cos^2 (\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \vartheta / 2]$$

Si se designa por: $I_0 = a^2$

la intensidad de la vibración transmitida por el polarizador, y por

$$I = A^2$$

la intensidad a la salida del analizador, se obtiene:

$$I = A^2 = I_0 [\cos^2 (\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \vartheta / 2] \dots (2)$$

o bien:

$$I = A^2 = I_0 [\cos^2 (\beta + \alpha) + \sin 2\alpha \sin 2\beta \cos^2 \vartheta / 2]$$

En estas condiciones es fácil calcular la influencia que pueden tener los ángulos " α ", " β ", y " ϑ " sobre la intensidad transmitida -- por el analizador.

(a) Si los nicoles están cruzados ($\beta - \alpha = 90^\circ$; $\beta = 90^\circ + \alpha$) la intensidad valdrá:

$$I = I_0 [\cos^2 90^\circ - (2 \sin \alpha \cos \alpha \sin \beta \cos \beta \sin^2 \vartheta / 2)]$$

$$= -I_0 [2 \sin \alpha \cos \alpha \cdot 2 \sin (90^\circ + \alpha) \cos (90^\circ + \alpha) \sin^2 \vartheta / 2]$$

$$= -I_0 [2 \sin \alpha \cos \alpha \cdot 2 \cos \alpha (-\sin \alpha) \sin^2 \vartheta / 2]$$

$$= I_0 (4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \sin^2 \vartheta / 2)$$

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \vartheta / 2 \dots \dots \dots (3)$$

Para $\sin^2 2\alpha = 1$, es decir $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, \dots, (2k+1)\pi/4$

$$I = I_0 \sin^2 \vartheta / 2$$

la intensidad es máxima, de donde:

"LA LUZ TRANSMITIDA POR LA LAMINA ES MAXIMA CUANDO SUS DIRECCIONES DE VIBRACION SE ENCUENTRAN A 45° DE LOS PLANOS DE SIMETRIA DE LOS NICOLES".

Para $\sin^2 2\alpha = 0$, $\alpha = 0, 90^\circ, \dots, k\pi/2$

$$I = 0$$

de donde:

"LAS EXTINCCIONES SE PRODUCEN CUANDO LAS DIRECCIONES DE VIBRACION DE LA LAMINA SON PARALELAS A LOS PLANOS DE SIMETRIA DE LOS NICOLES".

Puesto que ϑ es función de δ , ($\vartheta = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$), para una posición dada de la lámina (" α " fija), se tiene:

$$\text{Si } \delta = k\lambda, \quad \vartheta = 0, 2\pi, \dots, 2k\pi.$$

de (3):

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 k\pi = 0$$

LA INTENSIDAD I SE ANULA POR INTERFERENCIA, SEA CUAL FUERE LA POSICION DE LA LAMINA.

$$\text{Si } \delta = (2k + 1)\lambda/2 \quad \vartheta = \pi, 3\pi, \dots, (2k + 1)\pi$$

la intensidad I es máxima y vale

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha$$

Ella será transmitida integralmente si $\alpha = 45^\circ$.

En consecuencia, "cuando los nicoles están cruzados, la luz transmitida por la lámina es máxima si sus direcciones de vibración se encuentran a 45° de los planos de simetría de los nicoles y será nula -- cuando las direcciones de vibración son paralelas a éstos".

Para una posición dada de la lámina (α fija), la intensidad se anula por interferencia para $\delta = K\lambda$ y será máxima para $\delta = (2K+1)\lambda/2$. - La luz será transmitida integralmente si $\alpha = 45^\circ$.

(b) Si los nícoles son paralelos: $\beta = \alpha$.

De (2), la intensidad transmitida por el analizador valdrá:

$$I = I_0(1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \delta/2) \dots \dots \dots (4)$$

Para $\sin 2\alpha = 0$, es decir $\alpha = 0, \pi/2, \dots, k\pi/2$ $I = I_0$
 y la intensidad de la vibración transmitida por el analizador es igual a la de la vibración incidente, sea cual fuere el valor de δ .

Para $\sin 2\alpha = 1$, es decir $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, \dots, (2K+1)\pi/4$

$$I = I_0 \cos^2 \delta/2$$

o sea que la intensidad es complementaria de la dada por los nícoles cruzados, para el mismo caso.

Similarmente:

Para $\delta = K\lambda$ $I = I_0$
 Para $\delta = (2K+1)\lambda/2$ $I = I_0 \cos^2 2\alpha$

SE VE QUE LOS DOS FENOMENOS, ENTRE NÍCOLES CRUZADOS Y PARALELOS, SON CONSTANTEMENTE COMPLEMENTARIOS Y LA SUMA DE LAS INTENSIDADES TRANSMITIDAS EN LOS DOS CASOS ES SIEMPRE IGUAL A I_0 .

20.) Caso de la luz blanca.-

El color resultante a la salida del analizador es la suma de la superposición de todas las radiaciones, es decir:

$$I = \cos^2(\beta - \alpha) \int I_0 d\lambda - \sin 2\alpha \sin 2\beta \int I_0 \sin^2 \delta/\lambda d\lambda$$

Entre nícoles cruzados y con la lámina a 45° se obtiene un color

$$I_1 = \int I_0 \sin^2 \delta/\lambda d\lambda$$

En la misma posición de la lámina pero entre nícoles paralelos, - el color es el complementario

$$I_2 = \int I_0 \cos^2 \delta/\lambda d\lambda$$

ya que la suma de ambos colores: $I_1 + I_2 = \int I_0 d\lambda$

reconstituye la luz blanca, la cual por definición se representa por:

$$\int I_0 d\lambda$$

(a) Si los nícoles están cruzados:

En este caso la intensidad transmitida vale:

$$I = \sin^2 2\alpha \int I_0 \sin^2 \delta/\lambda d\lambda$$

el término $\sin^2 2\alpha$ no modifica el color, únicamente aumenta o debilita la intensidad.

Es posible, en estas condiciones, establecer la gama de tintes de polarización correspondientes a los diversos valores del retardo " δ " dado por la lámina. La figura VII-3 muestra la forma de la función

$$y = \sin^2 \frac{\delta}{\lambda}$$

en función de " δ " para diversos valores de la longitud de onda, desde el rojo hasta el violeta.

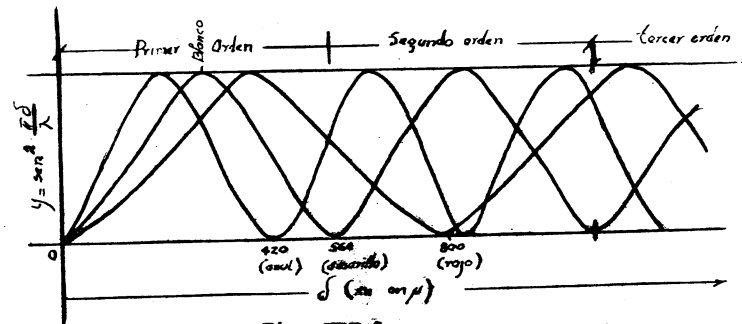


Fig. VII-3

Para $\delta = 0$, el color de la lámina es lógicamente negro. Para retardos muy débiles (espesor o birrefringencia muy débiles)* las diversas radiaciones del espectro crecen aproximadamente en la misma proporción, con un predominio sin embargo, de las radiaciones de longitud de onda más cortas (violeta, azul) sobre las de la otra extremidad del espectro; el resultado es un matiz gris azul violáceo (gris-lavanda) que se vuelve más claro a medida que crece el retardo. Cuando el retardo alcanza el valor 0.280μ , mitad de la longitud de onda del amarillo medio, región intermedia del espectro ($y = 1$), todas las radiaciones están aproximadamente en su máximo, obteniéndose una onda amarilla muy vecina del blanco, a la que se ha denominado blanco de primer orden, la cual es la luz más brillante del espectro.

A partir de ese punto, empiezan a predominar las radiaciones de mayor longitud de onda, mientras que el violeta disminuye rápidamente hasta $y = 0$, o sea, cuando $\delta = \lambda = 0.390 \mu$. Es decir, en ese punto las radiaciones violetas se hallan extinguidas y el resultado es un color anaranjado, el cual pasa progresivamente al rojo.

Para $\delta = 0.560 \mu = \lambda_2$, el amarillo está extinguido y la luz transmitida se compone sobre todo de las extremidades del espectro; por tal razón se obtiene un color púrpura al que se denomina tinte sensible de primer orden, ya que una ligerísima variación del retardo lo hace pasar, sea al rojo (para $\delta < 0.560$), sea al azul (para $\delta > 0.560$). El conjunto de colores comprendidos entre $0 \leq \delta \leq 0.560$ se llama de "primer orden".

(*) $\delta = e(n_1 - n_2)$

Se encuentran los tintes sensibles cada vez que hay extinción de las radiaciones amarillas, es decir para $\delta = K\lambda$. Estos tintes separan los diferentes órdenes y los colores que se obtienen son los mismos - que los de la escala de Newton de centro negro.

A medida que los retardos aumentan, los colores se vuelven cada vez menos vivos, ya que se produce una extinción simultánea de las diferentes radiaciones del espectro. Se pueden identificar aún los colores de tercer orden, más difícilmente los de cuarto orden, observándose sólo tonos rosas y verdes, hasta que a partir del décimo orden, el ojo no percibe ningún color: se obtiene en esas condiciones, el blanco de orden superior.

(b) Si los nícoles son paralelos.- Se observará el fenómeno complementario. La escala de colores es la misma que la de Newton de centro blanco, ya estudiada en el capítulo de interferencias.

3. La cuña de cuarzo.- La cuña de cuarzo es una sección de este mineral cortada a lo largo de su eje óptico (eje cristalográfico "c") y tallada en bisel (Fig. VII-4). Está orientada, por lo general, de manera que sus dimensiones larga y corta sean paralelas, respectivamente, a las trazas de los planos de vibración de las componentes rápida (α , de índice n_p) y lenta (γ , de índice n_g).

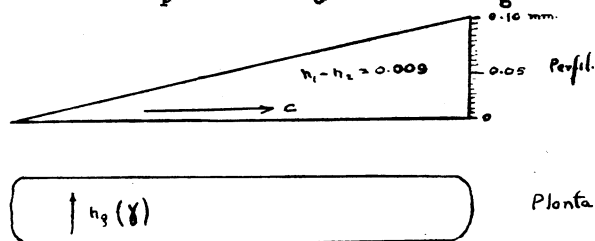


Fig. VII-4

Si se coloca la cuña entre nícoles cruzados a 45° de los planos de simetría de éstos, se observarán los colores de interferencia con su máximo de intensidad. Cada porción de la cuña será función de la ecuación

$$\delta = e(n_1 - n_2)$$

Puesto que $(n_1 - n_2)$ es constante y vale 0.009 cuando el eje óptico es paralelo a "c", el retardo " δ " variará con el espesor "e". Los colores observados, serán, naturalmente, los de la escala de Newton de centro negro.

En el caso de luz monocromática amarilla y entre nícoles cruzados se observarán bandas claras con su máximo de intensidad cuando el retardo sea de $(2k+1)\lambda/2$ y bandas negras para $\delta = k\lambda$.

ABSORCION Y PLEOCROISMO

1. Absorción.- El color que presenta un determinado mineral es una evidencia de su poder de absorción. Se entiende por "absorción" de la luz su transformación en otro tipo de energía, principalmente calorífica. La proporción de luz absorbida dependerá de la naturaleza y espesor del mineral.

Se dice que un mineral es incoloro cuando su absorción es despreciable. Un mineral presentará en cambio una coloración dada, cuando hayan sido absorbidas todas las radiaciones luminosas, a excepción de aquéllas cuya unión produce esa coloración (absorción selectiva). A medida que la absorción sea más poderosa el color del mineral será más y más oscuro hasta que se vuelve opaco.

La absorción se puede producir por transmisión o reflexión de la luz. Así un cristal de fluorita aparecerá de color violeta por luz transmitida, porque al atravesar ésta el cristal, absorberá todas las radiaciones, a excepción de aquéllas cuya unión producen el violeta. De manera análoga, un cristal de piritita aparecerá de color amarillo do rado, porque absorbe parte de las ondas luminosas en su superficie, reflejando solo aquéllas que producen dicho color.

2. Policroísmo.- Un mineral amorfo o que pertenezca al sistema isométrico y que no haya sufrido deformaciones, presentará una coloración constante, sea cual fuere su orientación respecto a los rayos luminosos incidentes, ya que sus propiedades ópticas no varían con la dirección de propagación.

En cambio, un cristal birrefringente puede presentar coloraciones diferentes si se le examina según orientaciones diferentes; se dice entonces que el cristal presenta policroísmo. En efecto, cada rayo incidente se descompone en su interior en dos rayos que transportan dos vibraciones polarizadas a ángulo recto con velocidades distintas, cuyas propiedades son diferentes y su absorción varía por lo general. Si se examina al cristal en otra dirección se tendrán otras dos nuevas vibraciones; siendo su absorción distinta, el cristal presentará una coloración diferente.

Un ejemplo de este fenómeno lo constituye la cordierita, pues al examinarla sucesivamente según sus tres planos de simetría, aparecerá con colores violeta oscuro, azul claro y verde claro.

En resumen, el policroísmo se debe a la absorción diferente de las distintas vibraciones luminosas.

3. Pleocroísmo.- Una lámina delgada de un cristal birrefringente y coloreado que recibe un haz de luz proveniente de un polarizador, presenta una variación en la intensidad y naturaleza de su tinte, al girarlo en su propio plano. Se dice entonces que la lámina es pleocroica.

II. El pleocroísmo es, por tanto, función de la orientación de la lámina con respecto al polarizador.

REFRACCION OBLICUA DE UNA ONDA PLANA

1. Superficie de los índices.— Se ha visto cómo a partir del elipsoide de los índices se pueden deducir las dos direcciones de vibración y los dos índices correspondientes de una onda plana, cuya normal incide perpendicularmente a una lámina cristalina anisotrópica. Como en los medios anisotrópicos los rayos luminosos no son perpendiculares a las ondas planas, se razonará a partir de las normales a dichas ondas, las cuales sí siguen las leyes de Descartes.

Si una onda plana incide de una manera oblicua en el cristal, es imposible construir las ondas refractadas a partir del elipsoide de los índices, lo mismo que calcular el retardo que experimentan dichas ondas al atravesar la lámina cristalina.

Para vencer esta dificultad, se llevan a partir de un punto O del medio cristalino (Fig. IX-1), sobre la normal a la onda plana Σ , dos longitudes ON' y ON'' iguales a los índices de refracción de las dos vibraciones transportadas por Σ , es decir iguales a los semiejes de la elipse de intersección entre el elipsoide de los índices y la onda. (Fig. IX-1). Al variar la orientación de Σ , los puntos N' y N'' engendran una superficie de dos capas que tiene los mismos elementos de simetría del elipsoide de los índices del cual deriva; dicha superficie se denomina superficie de los índices.

Por consiguiente, la superficie de los índices puede construirse a partir del elipsoide de los índices; se verá, ahora, su intersección con los tres planos de simetría de éste.

Si la onda plana Σ pasa por uno de los ejes de simetría, OZ por ejemplo (Fig. IX-2) uno de los semiejes OM' de la elipse E_1 de intersección es igual a R_p del elipsoide Q; el otro es el radio vector OM'' de la elipse E_2 formada por la intersección de Q con el plano XOY. Este plano contiene a la normal ON a la onda, en el cual aquélla será perpendicular a OM'' .

Si se gira alrededor de OZ, el punto N' describe una circunferencia de radio n_p , el punto N'' una elipse que se deduce de E_2 por una rotación de 90° alrededor de OZ, es decir donde los semiejes OX y OY tienen por longitudes respectivamente n_n y n_g . La circunferencia C_1

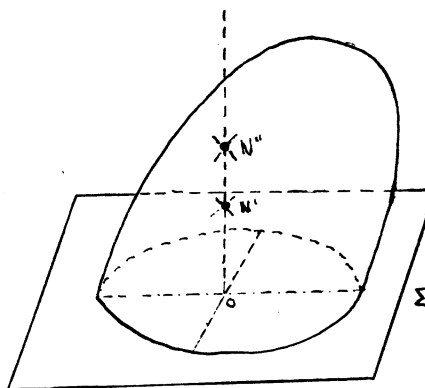


Fig. IX-1

y la elipse E_1 son las intersecciones de la superficie de los índices y el plano XOY.

10. Pleocroísmo en los cristales uniaxiales.— Un cristal uniaxial cortado normalmente al eje óptico es atravesado sólo por las vibraciones ordinarias y se comportará de la misma forma que un cuerpo isotrópico, pues la coloración permanece invariable al girar el cristal respecto del polarizador. En efecto, para espesores iguales, el índice de absorción de la onda ordinaria es constante, así como el color correspondiente.

Una lámina del mismo cristal cortada paralelamente al eje óptico presentará un color que resulta de las mezclas de las vibraciones ordinaria y extraordinaria. Para una cierta orientación de la lámina que permita sólo la transmisión de la primera, se observará el mismo color que el de la lámina perpendicular al eje óptico. Si se gira la lámina 90° en su propio plano a partir de la posición inicial, se tendrá una coloración debida únicamente a las vibraciones extraordinarias. Estos son los dos colores principales debidos a la absorción; la lámina es dicroica.

Si un cristal uniaxial absorbe con mayor intensidad una determinada vibración, se acostumbra expresar el fenómeno mediante una fórmula de absorción. Así en el caso de la turmalina la fórmula será: $o > e$ lo que indica que este mineral absorbe más la vibración ordinaria que la extraordinaria.

Por otro lado, la cantidad de luz no absorbida se indicará empleando la fórmula de pleocroísmo. Así, para la elbaíta, turmalina litinífera, la fórmula será:

e = incolora
 o = rosa, verde pálido o azul pálido.

lo que significa que la parte absorbida de la vibración extraordinaria es insignificante, mientras que para la vibración ordinaria la parte no absorbida presenta esas coloraciones.

20. Pleocroísmo en los cristales biaxiales.— Los cristales biaxiales coloreados son tricóicos porque exhiben tres diferentes coloraciones y tres grados de absorción, de acuerdo con los tres ejes principales de vibración. La fórmula de absorción se expresa en función de esos ejes. Por ejemplo, en el caso de la hornblenda común dicha fórmula será:

$$n_p < n_m < n_g$$

lo que indica que la luz que vibra paralelamente al eje n_g sufre la mayor absorción.

La fórmula de pleocroísmo para los cristales de este tipo es una expresión del color observado cuando la luz vibra paralelamente a cada uno de los ejes principales de vibración. Así para la hornblenda verde será:

n_g : verde oscuro

n_m : verde franco

n_p : verde amarillento claro.

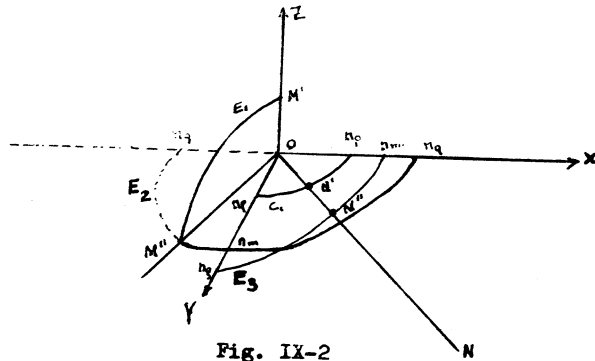


Fig. IX-2

Mediante un razonamiento parecido pueden determinarse las intersecciones de la superficie con los planos XOZ y YOZ. Se observa que en el plano perpendicular al índice medio, es decir XOZ, la elipse y el círculo se cortan en un punto I (Figs. IX 3-y 4). La superficie de los índices presenta por tanto, cuatro puntos dobles como I. Los radios OI y OI' simétricos con respecto a OZ son los ejes ópticos secundarios, los cuales coinciden aproximadamente con los ejes ópticos primarios del elipsoide de los índices. OI y OI' son normales a una onda plana cuyos dos índices son iguales (sección circular). Por tanto, la intersección de la superficie de los índices con uno de los planos de simetría óptica está formada por una circunferencia, cuyo radio es igual al índice principal correspondiente al eje normal al plano considerado, y por una elipse, cuyos semiejes son respectivamente iguales al índice principal que corresponde al otro semieje. A este resultado se puede llegar matemáticamente.

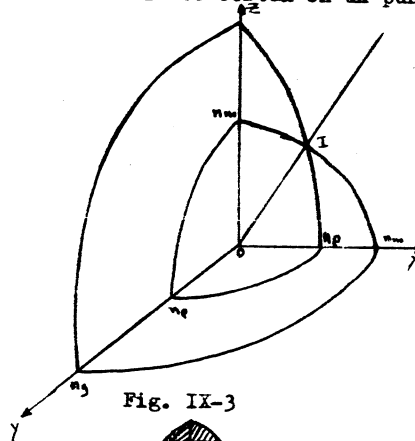


Fig. IX-3

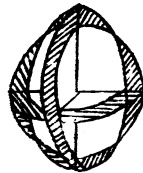
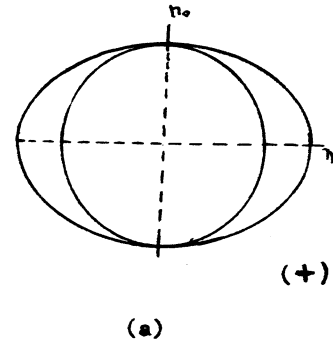


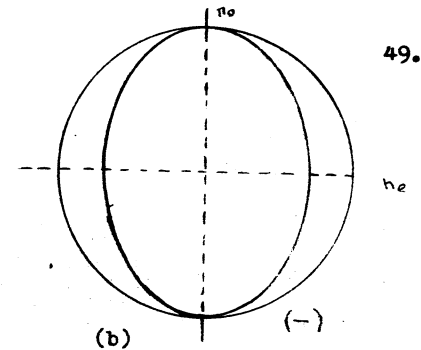
Fig. IX-4

ción del eje óptico, cuyos semiejes son n_0 sobre este eje y n_e sobre el eje perpendicular.

En un cristal uniaxial positivo, el elipsoide es exterior a la esfera; para uno negativo, el elipsoide es interior (Figs. IX-5a y b, respectivamente).



(a)



(b)

Fig. IX-5

2. Construcción de Huygens por medio de la superficie de los índices.

A partir de la superficie de los índices es posible construir las normales a las ondas refractadas en un cristal. Para ello se emplea la construcción de Huygens para dicha superficie (Fig. IX-6).

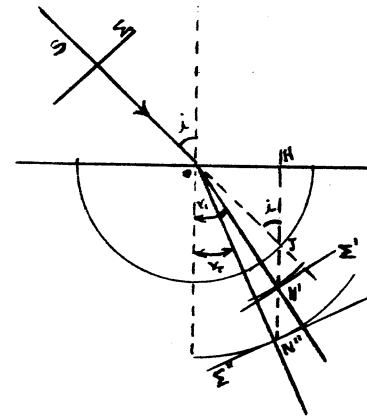


Fig. IX-6

Sea SO la normal a la onda Σ que pasa de un medio isotrópico de índice " n " (o de índice 1 si es el aire) a un medio anisotrópico más denso. La recta SO corta en el punto J a la esfera de radio n . La perpendicular JH llevada de ese punto a la superficie de separación de los dos medios corta en N' y N'' las dos porciones Σ' y Σ'' de la superficie de los índices construida haciendo centro en O. Las rectas ON' y ON'' representan las normales a las ondas refractadas, las cuales en los medios anisotrópicos siguen las leyes de la refracción de Descartes, a diferencia de los rayos luminosos.

En efecto, de la figura IX-6:

$$OH = OJ \text{ sen } i = ON' \text{ sen } r_1$$

es decir:

$$n \text{ sen } i = n_1 \text{ sen } r_1$$

análogamente:

$$OH = OJ \text{ sen } i = ON'' \text{ sen } r_2$$

o sea:

$$n \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r_2$$

3. Retardo introducido por una lámina de caras paralelas y anisotrópica sobre los rayos oblicuos.

Sea una onda plana Σ normal a AO (Fig. IX-7) que incide sobre una lámina cristalina anisotrópica de caras paralelas. Supóngase que Σ se propaga en un medio isotrópico de índice "n"; cuando penetra en la lámina - en lugar a dos ondas refractadas Σ_1 y Σ_2 , normales a OH' y OH'' obtenidas a partir de la construcción de Huygens empleando la superficie de los índices; las dos ondas emergentes Σ_1' y Σ_2' se propagan en el medio isotrópico paralelamente a la onda incidente y presentan un retardo óptico:

$$\delta = n \cdot BC = n \cdot BD \cdot \text{sen } i \dots\dots (1)$$

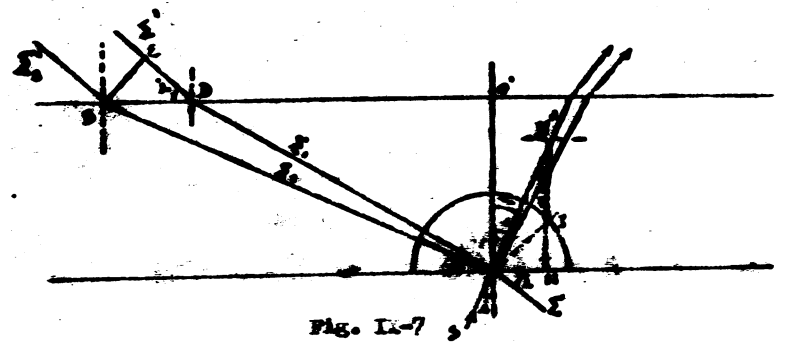


Fig. IX-7

Los triángulos $OO'B$ y $OH'H''$ son semejantes; por consiguiente:

$$\frac{OH}{OO'} = \frac{OH''}{OB} \quad \text{y} \quad \frac{OH''}{OB} = \frac{H'H''}{BD}$$

o sea:

$$\frac{OH}{OO'} = \frac{H'H''}{BD} \dots\dots (2)$$

de la figura IX-7 se obtiene:

$$OH = OJ \cdot \text{sen } i = n \cdot \text{sen } i \dots\dots (3)$$

y como OO' es igual al espesor "e" de la lámina, al sustituir (2) y (3) en (1) se concluye que:

$$\delta = e \cdot H'H'' \dots\dots (4)$$

ES DECIR, PARA TODO RAYO INCIDENTE, LA DIFERENCIA DE TRAYECTORIA DE FRECUENCIA POR LA LÁMINA ES IGUAL AL PRODUCTO DEL ESPESOR DE ESTA POR LA DISTANCIA DE LOS PUNTOS H' Y H'' DE LA SUPERFICIE DE LOS ÍNDICES, SITUADOS SOBRE LA NORMAL A LAS ONDAS REFRACTADAS.

La ecuación (4) puede aún expresarse de otra manera. En efecto,

de la figura IX-7 se tiene:

$$\begin{aligned} H'H'' &= H'H' - H'H'' \\ &= n_2 \cos r_2 - n_1 \cos r_1 \end{aligned}$$

de donde:

$$\delta = e (n_2 \cos r_2 - n_1 \cos r_1) \dots\dots (5)$$

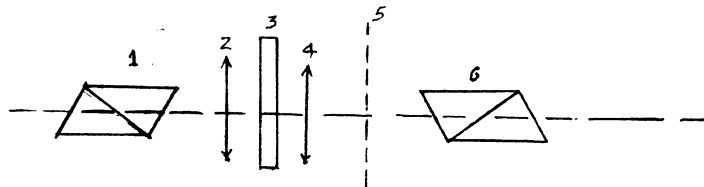
CAPITULO X

POLARIZACION CROMÁTICA EN LUZ CONVERGENTE

1. Introducción.— El estudio entre nicoles cruzados de una lámina cristalina anisotrópica y de caras paralelas permita la determinación de un cierto número de sus propiedades ópticas, pero únicamente en una sola dirección: aquella que es normal a la lámina.

Con el fin de obtener esas mismas propiedades para todas las otras direcciones se hace penetrar a los rayos luminosos en la lámina bajo incidencias diferentes, es decir se emplea luz convergente.

De esta manera se coloca la lámina entre nicoles cruzados y se interpone a la salida del polarizador un sistema de lentillas de sistema focal pequeño llamado condensador, el cual transforma la luz paralela proveniente de aquél en luz convergente. Se coloca además entre la lámina y el analizador un objetivo de gran aumento llamado colector que se llevará lo más cerca posible de la lámina (Fig. X-1).



- | | | |
|----------------|------------------------------|-------------------|
| 1. Polarizador | 2. Condensador | 3. Lámina delgada |
| 4. Colector | 5. Plano focal del colector. | 6. Analizador. |

Fig. X-1

2. Observación de la lámina anisotrópica entre nicoles cruzados y luz convergente.

Sea una lámina cristalina anisotrópica que recibe un haz de luz convergente polarizada rectilíneamente (Fig. X-2). Considérese un rayo incidente SI del haz, perpendicular a la onda plana Σ , que se refracta según dos ondas planas normales a IN' e IN'' , las que al dejar la lámina constituyen la onda plana Σ' , paralela a Σ , que transporta dos vibraciones rectilíneas y rectangulares, las cuales presentan entre ellas un retardo

$$\delta = e (n_2 \cos r_2 - n_1 \cos r_1)$$

Todos los rayos paralelos que constituyen a Σ' convergen en un mismo punto M del plano focal del colector, punto que se obtiene — llevando a partir del centro óptico "C" del colector, la paralela — CM a los rayos incidentes.

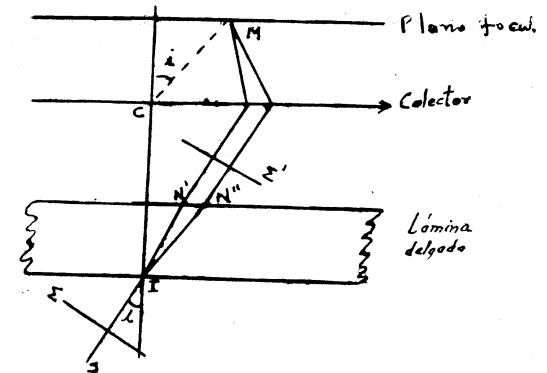


Fig. X-2

Si se coloca un analizador cuyo plano de polarización sea perpendicular al del polarizador y si se emplea luz monocromática, para cada $\delta = K\lambda$ el punto M estará extinguido.

Si se utiliza en cambio luz blanca, para cada haz paralelo de rayos incidentes corresponderá, en el plano focal del colector, un punto M con un retardo dado, es decir con un color dado. El lugar de los puntos en los que δ posee el mismo valor es, por tanto, una curva denominada "curva isocromática" la que es función, además del ángulo de incidencia, de la forma y posición de la superficie de los índices en el cristal.

Como, por otro lado, las dos vibraciones transportadas por la onda Σ' están polarizadas en ángulo recto, la intensidad luminosa en un punto M de una curva isocromática no será constante, sino que dependerá de la posición de esas dos vibraciones con respecto a los planos de simetría de los nicoles. De esta manera, cuando aquéllas son paralelas a éstos, la intensidad será nula, mientras que será máxima cuando las dos vibraciones están a 45° de los planos de simetría de los nicoles. Los puntos oscuros de las diferentes curvas isocromáticas constituyen las "isogiras" o "líneas neutras", las cuales dependerán también de la superficie de los índices del cristal considerado.

Por consiguiente, la forma de las curvas isocromáticas y de las isogiras será diferente en los cristales uniaxiales y biaxiales y dependerá, además, de la manera en que se haya realizado el corte de la lámina.

3. Cristales Uniaxiales.—

1o.) Lámina perpendicular al eje óptico.— Puesto que el eje óptico es un eje de simetría, el fenómeno será de revolución alrededor de él. En el centro del plano focal c' (Fig. X-3) convergen los rayos que atraviesan normalmente la lámina; como la birrefringencia de la lámina para esos rayos es nula (las dos posiciones de la superficie de los índices son tangentes), el retardo será nulo, y por tanto c' será oscuro.

Los rayos que atraviesan la lámina con el mismo ángulo respecto al eje óptico OC forman un cono alrededor de él (Fig. X-4). Se tendrá, por consiguiente una serie de conos de mismo vértice O , cortados por la parte superior de la lámina según círculos concéntricos: Las curvas isocromáticas observadas en el plano focal del colector serán círculos concéntricos de centro O .

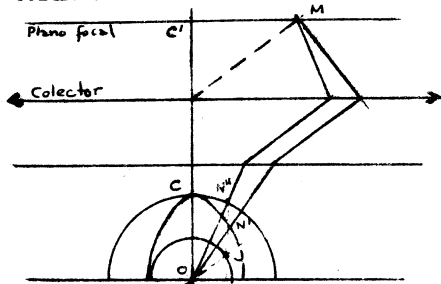


Fig. X-3

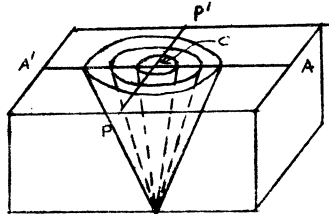


Fig. X-4

Si se utiliza una luz monocromática de longitud de onda λ , a cada $\delta = K\lambda$ corresponderá un círculo oscuro; si se emplea luz blanca, se observará a partir del centro oscuro la sucesión de colores de Newton.

Por ser el retardo función de dos variables ($\delta = eN^2N''$) crecerá rápidamente en el caso de secciones anisotrópicas gruesas o muy birrefringentes, razón por la cual las curvas isocromáticas serán muy próximas entre sí, llegándose con la misma rapidez al blanco de orden superior. En cambio, si la sección es muy delgada o poco birrefringente, no se observarán más que las curvas correspondientes a los primeros órdenes de la escala de Newton, limitándose muchas veces al gris de primer orden.

Por otro lado, a cada punto M del plano focal corresponden dos vibraciones polarizadas a ángulo recto; puesto que la vibración extraordinaria vibra según la proyección del eje óptico en el plano de onda, es decir $o'm'$, si se asimila el plano de onda con el plano focal, después de atravesar el colector, se ve inmediatamente que la proyección del eje óptico tiene una dirección radial HM (Fig. X-5).

En todo punto del campo la vibración extraordinaria se propaga según una dirección radial (Fig. X-6). La vibración ordinaria, que le es perpendicular, tendrá una dirección tangencial a las curvas isocromáticas.

Si las dos vibraciones son paralelas a las trazas de los planos de simetría de los nicoles, el punto M estará sobre las isogiras; éstas se hallarán constituidas por una cruz negra, cuyo centro será c' y cuyas ramas serán paralelas a las trazas de los planos de simetría de los nicoles.

Puesto que el fenómeno es de revolución alrededor del eje óptico y puesto que éste es perpendicular a la lámina, no se debe observar ningún cambio al girar la preparación alrededor de aquél. Por tanto, LAS ISOGIRAS PERMANECERÁN SIEMPRE CONFUNDIDAS CON LOS PLANOS DE SIMETRÍA DE LOS NICOLES.

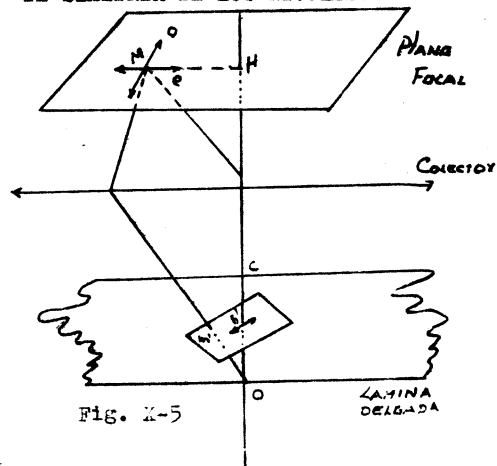
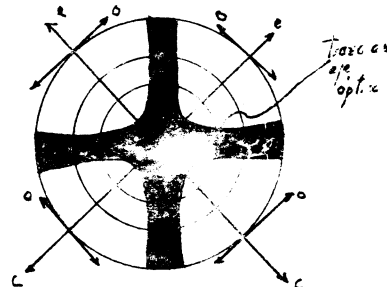


Fig. X-5



Direcciones de vibración en una figura de interferencia uniáxica. (Fig. X-6)

20.) Lámina oblicua al eje óptico.-

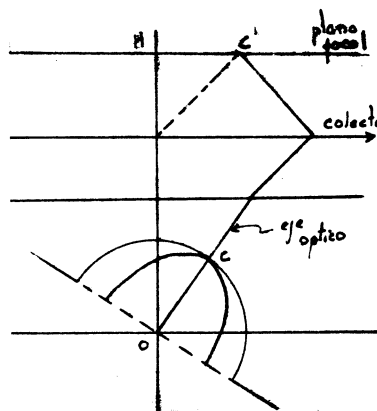


Fig. X-7

Los fenómenos son idénticos al caso anterior pero descentrados, como lo muestra la figura X-7. Los rayos luminosos que en el cristal corresponden a la onda plana normal al eje óptico convergen en el punto c' del plano focal del colector, el cual será oscuro.

Las curvas isocromáticas, cuyo centro es c' , no son exactamente círculos, ya que la intersección de un cono con un plano oblicuo a su eje es una elipse. Sin embargo, como estas curvas sólo se observan en láminas poco inclinadas con respecto al eje óptico, se puede decir que las elipses son muy poco diferentes de los círculos. La isogira es también una cruz con centro en c' .

Al girar la lámina alrededor de su normal, las curvas isocromáticas no sufren deformación. Las dos ramas de la cruz se desplazan paralelamente a ellas mismas y el polo c' del eje óptico describirá un círculo de radio Hc' (Fig. X-8).

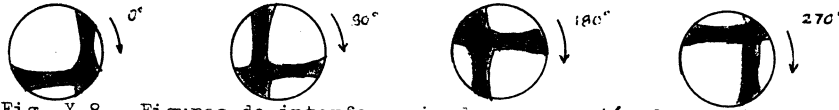


Fig. X-8.- Figuras de interferencia de una sección de un mineral uniaxial oblicua al eje óptico, en la que éste se encuentra en el campo del colector. Posiciones observadas al girar la platina 360° en el sentido de las manecillas del reloj.

Si el eje óptico está muy inclinado con respecto a la normal a la lámina, el polo c' se encontrará fuera del campo del colector y las curvas isocromáticas no aparecerán por lo general, ya que los puntos situados en el campo poseen retardos elevados, produciendo el blanco de orden superior. Si se gira la lámina con respecto a su normal en el sentido de las manecillas del reloj, se verá sucesivamente una rama negra vertical recorrer el campo de derecha a izquierda, después una rama negra horizontal de abajo hacia arriba, más tarde la rama vertical de izquierda a derecha y finalmente la rama horizontal de arriba hacia abajo (Fig. X-9).

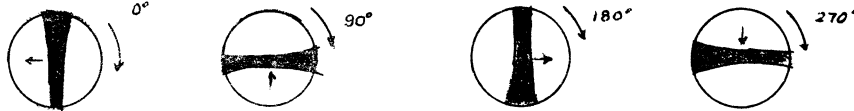


Fig. X-9.- Figuras de interferencia de una sección de un mineral uniaxial oblicua al eje óptico, en la cual éste se halla fuera del campo del colector. Posiciones observadas al girar la platina 360° en el sentido de las manecillas del reloj.

30. Lámina paralela al eje óptico.-

Sea una lámina de un mineral uniaxial tallada paralelamente al eje óptico CY (Fig. X-10). A una onda plana Σ que forma un ángulo de incidencia "i" muy pequeño, le corresponde en el plano focal del colector un punto "H" muy cercano del centro "H". Las dos vibraciones asociadas a Σ son, en primera aproximación, paralelas a las proyecciones de las dos vibraciones transportadas por la onda Σ' en el plano de la lámina, ya que Σ' se encuentra también muy poco inclinada; la proyección de la vibración extraordinaria será paralela al eje óptico CY y la de la vibración ordinaria se encontrará siguiendo la dirección perpendicular CX .

Al girar la lámina en su plano cuando el eje óptico sea paralelo a uno de los planos de simetría de los nicoles se obtendrá una extinción casi completa; de hecho se observa una cruz negra gruesa con brazos muy difusos (Fig. X-11). A partir de esta posición la

más ligera rotación de la lámina da lugar a una hipérbola que se desplaza rápidamente (figura Flash) y cuyos vértices se encuentran en los cuadrantes que contienen al eje óptico.

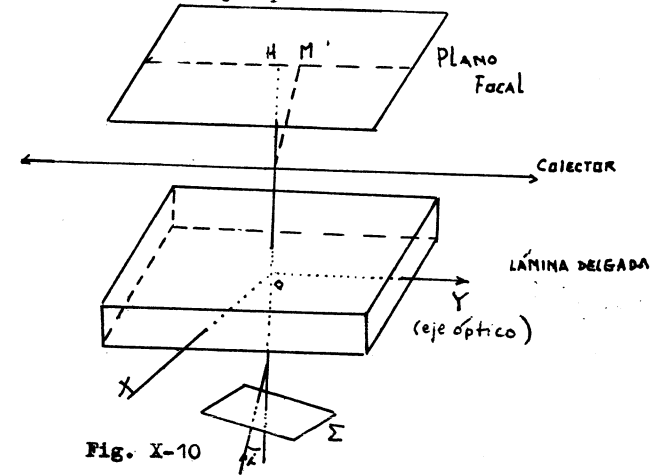


Fig. X-10

Las curvas isocromáticas son visibles sólo en luz monocromática, ya que los retardos introducidos por la luz blanca son muy grandes y producen el blanco de orden superior (Fig. X-12). Se demuestra mediante el cálculo, que las curvas isocromáticas constituyen dos familias de hipérbolas casi equiláteras, el eje de una de las cuales es el eje óptico, y que los retardos disminuyen en la dirección de éste.

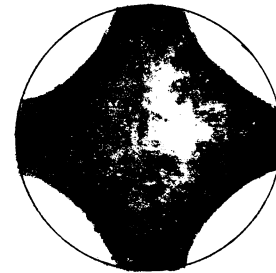


Fig. X-11
Figura Flash de una sección de cuarzo paralela al eje óptico, en posición de extinción, empleando luz blanca.

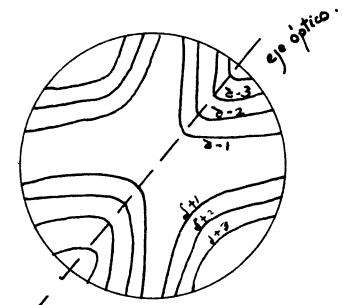


Fig. X-12
Curvas isocromáticas de una sección de calcita paralela al eje óptico, a 45° de los planos de vibración de los nicoles, empleando luz monocromática.

1.- Cristales Biáxicos.-

10.) Lámina perpendicular a la bisectriz aguda.-

Sea una lámina tallada perpendicularmente a la bisectriz aguda OZ de los ejes ópticos OS₁ y OS₂ (Fig. X-13). El índice medio coincide en estas condiciones con n₂ y los otros dos índices principales con OX y OZ.

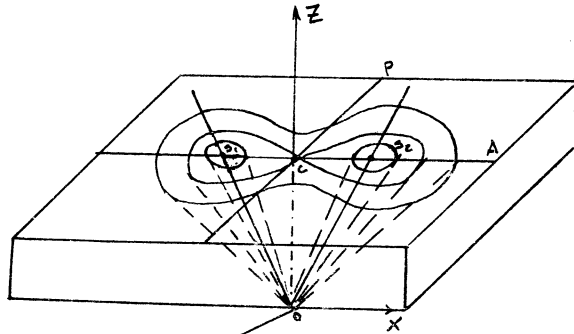


Fig. X-13

En S₁ y S₂ la birrefringencia es nula, y por tanto el retardo también. A partir de estos puntos los retardos aumentan en todas direcciones. Las curvas de igual retardo tienen en las cercanías de S₁ y S₂ la forma aproximada de elipses; la curva que pasa por el centro C tiene la forma de un ocho y las siguientes rodean a ésta; en lenguaje matemático estas curvas son lemniscatas.

Si se emplea luz monocromática se tendrán una serie de lemniscatas oscuras para cada Kλ, a partir de S₁ y S₂. En cambio, si se utiliza luz blanca, aparecerán los colores de la escala de Newton.

Entre más grande sea la birrefringencia o el espesor de la lámina, menor será la distancia que separe las diferentes curvas. Aquella que pasa por el centro C y cuyo retardo es e(n_z - n_x) o bien e(n_z - n_y), según que el cristal sea positivo o negativo respectivamente, puede poseer un color de muy alto o muy bajo orden; en este último caso no será posible observar las lemniscatas en el campo del microscopio.

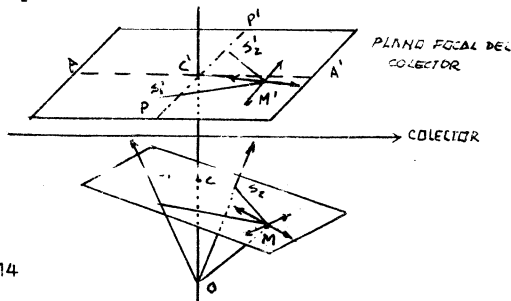


Fig. X-14

Considerando que las proyecciones de los ejes ópticos sobre un plano de onda normal a OM sean MS₁ y MS₂ (Fig. X-14), las dos direcciones de vibración del punto M serán las bisectrices de dichas proyecciones. Para que M pertenezca a una línea neutra es necesario, además, que las dos direcciones de vibración sean paralelas, respectivamente, a las secciones principales de los nicoles PP₁ y AA₁.

Si se hace pasar por C, a la mitad de la distancia de los polos S₁ y S₂ de los ejes ópticos (Fig. X-15), las paralelas a las dos vibraciones principales de los nicoles CP y CA, tomadas como ejes cartesianos, y si (x₁, y₁) designan las coordenadas del punto S₁, las del punto S₂ serán (-x₁, -y₁). Las pendientes de las rectas MS₁ y MS₂, con la misma inclinación respecto de CA, serán iguales y de signos contrarios.

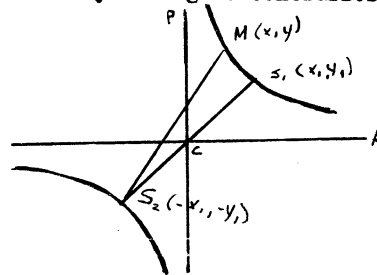


Fig. X-15

Si las coordenadas de M son (x, y), las ecuaciones de las rectas MS₁ y MS₂ serán, respectivamente:

$$y - y_1 = m(x - x_1) \dots\dots (1)$$

$$y + y_1 = m(x + x_1) \dots\dots (2)$$

Eliminando la pendiente de (1) y (2) se obtiene la ecuación del lugar:

$$xy = x_1 y_1 \dots\dots\dots (3)$$

que es una hipérbola equilátera que pasa por los polos S₁ y S₂ de los ejes ópticos y cuyas asíntotas son las paralelas a las secciones principales de los nicoles llevadas por el polo C de la bisectriz aguda.

Se observa que las ramas de la hipérbola se encuentran siempre en los cuadrantes ocupados por los polos de los ejes ópticos, lo que permite determinar la dirección de la traza del plano de los ejes ópticos (Fig. X-16a).

Cuando el plano de los ejes ópticos es paralelo a una de las secciones principales de los nicoles, x₁ = 0 o y₁ = 0

$$y \text{ y } xy = 0, \text{ de donde:}$$

$$x = 0 \text{ y } y = 0$$

y la hipérbola se transforma en una cruz negra (Fig. X-16b)

Si el ángulo de los ejes ópticos es muy grande, los polos S₁ y S₂ saldrán del campo. En este caso será posible determinar su posición observando las lemniscatas, partiendo de la cruz negra y girando un ángulo determinado (Fig. X-17).

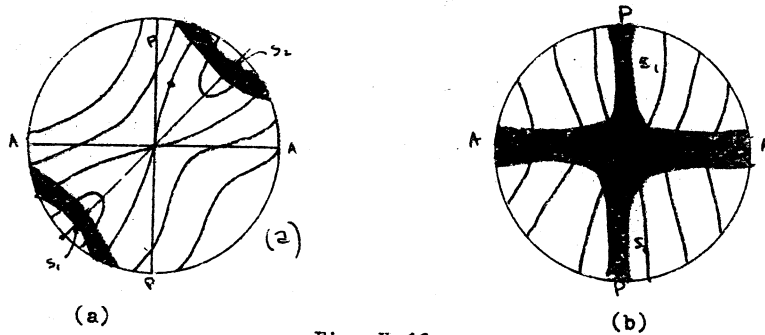


Fig. X-16

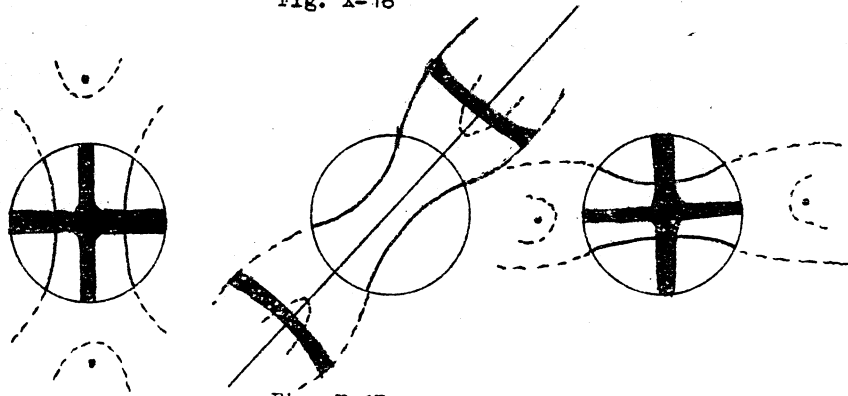


Fig. X-17

Quando las lemniscatas no son visibles se puede precisar aún la posición S_1 y S_2 según el desplazamiento de las ramas de hipérbola. Así, si después de la formación de la cruz negra se gira la lámina en el sentido de las manecillas del reloj (Fig. X-18) y si las ramas de la hipérbola se desplazan en los cuadrantes 1 y 3, los polos de los ejes ópticos se encontrarán sobre la recta $S_1 S_2$.

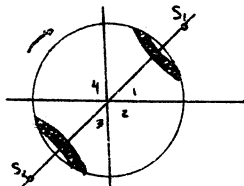


Fig. X-18

2o.) Lámina perpendicular a un eje óptico.-

Si la lámina de la figura X-13 se talla perpendicularmente a una de las rectas CS_1 u OS_2 , las curvas isocromáticas serán aproximadamente circulares y sólo se observará una de las ramas de la hipérbola, cuya curvatura dependerá de la magnitud del ángulo de los ejes ópticos y de la orientación con respecto a los nicoles; cuando el plano de los ejes ópticos es paralelo a uno de los nicoles, la rama de hipérbola le es paralela.

La figura X-19 muestra las variaciones de la rama de hipérbola durante una rotación de 90° de un mineral biáxico cuya sección es perpendicular a uno de los ejes ópticos.

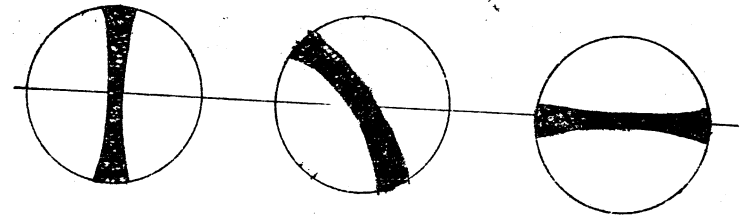


Fig. X-19

C) Lámina perpendicular a la bisectriz obtusa.-

Las curvas isocromáticas son análogas a las de una lámina perpendicular a la bisectriz aguda, pero las lemniscatas son raramente visibles. Las isogiras saldrán siempre del campo durante la rotación, de manera similar a las de la figura X-17. Por tanto, una lámina perpendicular a la bisectriz obtusa podrá confundirse con una perpendicular a la bisectriz aguda de un mineral biáxico que posee un ángulo axial muy grande.

D) Lámina paralela al plano de los ejes ópticos.-

En este caso el fenómeno es prácticamente similar al producido por una lámina uniáxica paralela al eje óptico y será, por tanto, difícil poder hacer la distinción entre ambas.

5.- Posibilidades de confusión de las figuras de interferencia.

En general siempre es posible hacer la distinción entre una lámina de un mineral uniáxico y otra de un mineral biáxico, por la forma de las isogiras.

Así, un mineral uniáxico cortado normalmente al eje óptico muestra siempre una cruz negra que permanece en el campo. En cambio, un mineral biáxico tallado perpendicularmente a la bisectriz aguda, presenta una cruz negra que se descompone en dos ramas de hipérbola.

Una lámina uniáxica oblicua respecto al eje óptico muestra una rama de la cruz que permanece más o menos paralela a uno de los planos de vibración de los nicoles; una lámina biáxica normal o poco oblicua a un eje óptico presentará también una rama, pero que atravesará curvándose el campo del microscopio.

Cuando el ángulo entre los ejes ópticos es muy pequeño puede haber indecisión en el caso de láminas biáxicas tallada perpendicularmente a la bisectriz aguda. En efecto, en la figura X-20 se observa que estando las trazas de los ejes ópticos S_1 y S_2 muy próximas de la traza de la bisectriz aguda C , la curvatura de las dos ramas de hipérbola es muy poco pronunciada, aproximándose rápidamente a las rectas CP y CA ; en este caso, hay que observar la figura con mucha atención para evitar la confusión con una lámina uniáxica.

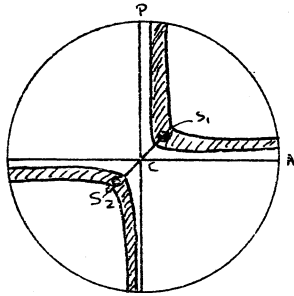
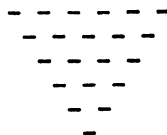


Fig. X-20

SEGUNDA PARTE
OBSERVACIONES
DE
SECCIONES
DELGADAS
DE
MINERALES
AL
MICROSCOPIO POLARIZANTE





CAPITULO XI

EL MICROSCOPIO POLARIZANTE

1. **Introducción.**- El microscopio polarizante es un aparato que ha permitido realizar progresos considerables en los campos de la mineralogía, petrografía, química y biología. En el primero de ellos se emplea para identificar minerales, en el segundo para determinar la composición mineralógica de las rocas y realizar estudios de petrogénesis, en el tercero para analizar cantidades muy pequeñas de sustancias y en el cuarto para estudiar las sustancias birrefringentes.

2. **Descripción General.**- El microscopio polarizante consta de todos los elementos de un microscopio ordinario, ya que se ha construido según el mismo principio, y además de los elementos suplementarios siguientes:

1o.) Un polarizador constituido sea por un nícol, sea por un polaroide (caso de los microscopios más modernos) montado sobre un anillo que le permite girar alrededor de sí mismo.

2o.) Un condensador, sistema convergente solidario del polarizador, que puede ser intercalado o no en el trayecto de los rayos luminosos provenientes del polarizador, cuando sea necesario.

3o.) Un diafragma que limita a voluntad la intensidad luminosa.

El conjunto formado por estos tres elementos puede subir o bajar por medio de un tornillo helicoidal.

4o.) La platina es graduada y puede girar alrededor del eje del microscopio, lo cual permite girar en su plano a la lámina cristalina a estudiar.

5o.) Un analizador, constituido igualmente por el mismo material que el polarizador, y situado en el tubo portaocular entre el objetivo y el ocular. El analizador puede interponerse o no en el trayecto de los rayos luminosos, dependiendo del estudio que se quiera realizar.

6o.) Una lente de Bertrand, también desplazable, que constituye un microscopio auxiliar asociado al objetivo y que sirve para observar agrandadas las figuras de interferencia.

La figura XI-1 es un esquema de los elementos principales que constituyen el microscopio polarizante.

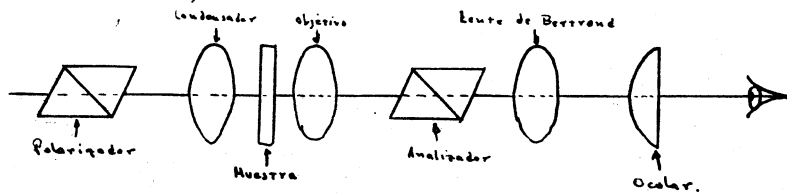


Fig. XI-1

3. Descripción de los elementos constitutivos principales del microscopio polarizante.-

1o.) El espejo presenta, por lo general una cara plana y otra cóncava y está montado sobre una articulación, de tal manera que puede girar en cualquier dirección del espacio. Su función es enviar al aparato los rayos que provienen de una fuente luminosa dada, que puede ser el sol o una lámpara incandescente; si la fuente es el sol (fuente al infinito) es preferible usar la cara plana; en el caso de una lámpara, es más conveniente usar la cara cóncava. Asimismo, la cara plana es adecuada para los trabajos de poca potencia y la cóncava para los de alta potencia. Ciertos modelos de microscopios presentan del espejo, colocando en su lugar directamente la lámpara.

2o.) El polarizador, cuya finalidad es eliminar las vibraciones o dinarias, dejando únicamente las extraordinarias; su plano de vibración es por construcción norte-sur, es decir, es paralelo al plano de simetría del microscopio. En algunos modelos el polarizador está colocado en un tubo de latón, cerrado en sus dos extremos por dos láminas de vidrio de caras paralelas, y puede girar 360° alrededor de su eje, pero en general se le mantiene fijo. Encima del polarizador se encuentra una lente convergente fija de foco grande, que se emplea como objetivo de poco aumento.

3o.) El condensador, sistema convergente de foco pequeño, se emplea con objetivos de gran aumento y puede ser retirado del eje del microscopio por medio de una palanca.

4o.) La platina posee en su parte exterior una graduación en grados y minutos que se desplaza en el curso de una rotación enfrente de una señal fija. Generalmente sobre la platina existen dos resortes de fijación de la lámina en estudio o bien un conjunto que desplaza la lámina según dos direcciones perpendiculares.

5o.) Los objetivos consisten en lentes convergentes de muy pequeña distancia focal cuya función es producir una imagen agrandada, en el plano focal del ocular, del objeto a examinar. Los objetivos son de diferentes aumentos; éstos se calculan dividiendo la longitud del tubo del microscopio entre la distancia focal del objetivo. Los máximos aumentos se obtienen empleando objetivos de inmersión, así llamados porque es necesario utilizar aceite de cedro entre ellos y la preparación.

6o.) La pinza portaobjetivos está situada en la parte inferior del tubo del microscopio; en algunos es solidaria de la platina y gira con ella; en otros microscopios esta pinza ha sido reemplazada por un revólver que contiene diferentes objetivos, lo que permite un desplazamiento más rápido de éstos.

7o.) El tubo del microscopio puede sufrir desplazamientos verticales gracias a un tornillo de cremallera. Sin embargo, en algunos microscopios el tubo es fijo y es la platina la que se desplaza.

8o.) El analizador se encuentra en el tubo del microscopio y puede retirarse del trayecto de los rayos luminosos girándolo alrededor de una charnela o bien jalándolo simplemente. En la inmensa mayoría de los microscopios el plano de vibración del analizador es normal al del polarizador, es decir, este-oeste. Sin embargo, en algunos de ellos puede --

girar en su plano.

9o.) La lente de Bertrand, situada también en el tubo del microscopio, puede encontrarse encima o debajo del analizador y tiene por objeto agrandar la figura de interferencia, transportando la imagen de ésta al plano focal del ocular.

10o.) El ocular se coloca en la parte superior del tubo del microscopio y está montado en un anillo de latón. En su interior se encuentra dispuesta una retícula constituida por dos hilos perpendiculares entre sí. Un ajuste previo de la retícula materializa la orientación de las direcciones de vibración del polarizador y del analizador "cruzados" en el plano de observación.

Cada microscopio viene acompañado de varios oculares con aumentos diferentes. El aumento dado por el microscopio es aproximadamente el producto del aumento del objetivo por el correspondiente del ocular.

4. Láminas auxiliares o compensadores.-

Acompañan al microscopio un cierto número de láminas auxiliares birrefringentes, que se introducen en una ranura del tubo del microscopio, situada a 45° de los planos de simetría de los nicoles, con el fin de que la luz emergente tenga una intensidad máxima. Sus aplicaciones serán estudiadas en el capítulo XIII.

Las láminas auxiliares más importantes son la mica $\frac{1}{4}\lambda$ (Glimmer), la lámina de tinte sensible (Gips o cuarzo) y la cuña de cuarzo.

a) La lámina de mica $\frac{1}{4}$ de onda introduce un retardo

$$\delta = \frac{\lambda_a}{4} = \frac{0.589}{4} \mu$$

en donde λ_a es la longitud de onda de la raya amarilla D del espectro. En luz blanca y entre nicoles cruzados produce un tinte gris claro de primer orden.

b) La lámina tinte sensible es una lámina de cuarzo o de yeso tallada paralelamente al eje óptico. Esta lámina introduce un retardo

$$\delta = \lambda_a = 0.589 \mu$$

En luz blanca y entre nicoles cruzados da el violeta sensible de primer orden.

c) La cuña de cuarzo es una lámina de cuarzo paralela al eje óptico y tallada en bisel; el retardo

$$\delta = e(n_1 - n_2)$$

crece con el espesor. En luz blanca y entre nicoles cruzados produce la escala de colores de Newton de centro negro.

Todas estas láminas auxiliares están colocadas entre dos láminas de vidrio, pegadas con bálsamo de Canadá y montadas en una armadura metálica. En la armadura, una flecha indica la dirección Ng, es decir de la vibración lenta.

5. Ajustes del microscopio.-

Para el buen funcionamiento del microscopio es necesario realizar, de una vez por todas, los siguientes ajustes:

1o.) Iluminación.- En el caso de que el microscopio no tenga iluminación directa desde una lámpara, sino que sea necesario utilizar el espejo, se deja el polarizador en su lugar a su máxima altura y se retiran los otros sistemas ópticos (condensador, objetivo, analizador y ocular). Se observa a través del microscopio y se orienta el espejo hasta obtener la iluminación máxima.

Se pueden obtener los mismos resultados sin retirar el objetivo y el ocular e introduciendo el condensador.

2o.) Ajuste de nicoles.- Para que los nicoles estén perfectamente cruzados se gira el polarizador hasta la máxima oscuridad. Se trabaja únicamente con el polarizador y el analizador y se retiran de preferencia los otros elementos ópticos.

3o.) Centrado de la retícula.- Si se observa un punto cualquiera de la preparación a estudiar, se dice que el objetivo está centrado cuando al girar la platina dicho punto describe un círculo, con centro en la intersección de los hilos de la retícula.

Si no sucede así, se coloca el punto en la intersección de los hilos de la retícula, se observa su desplazamiento al girar la platina 90° (coincidencia con uno de los hilos), se le lleva a la mitad de esa distancia por medio de dos tornillos que se encuentran en el collar del objetivo (en otros modelos se accionan dos cremalleras), se giran otros 90° y se vuelve a corregir la mitad.

Se lleva de nuevo el punto al centro y se repite la operación hasta lograr el centrado perfecto.

4o.) Ajustes de los hilos de la retícula.- Para lograr que los hilos de la retícula sean paralelos respectivamente a los dos planos de vibración de los nicoles se puede utilizar un cristal de exfoliación de anhídrita (CaSO_4), o bien un cristal de natrolita (mesotipo), zeclita fibrosa alargada según uno de los ejes cristalográficos; los dos pertenecen al sistema ortorrómbico, extinguiéndose el primero paralelamente a la traza de sus cruceros y el segundo paralelamente a su dirección de elongación.

Estas direcciones privilegiadas (crucero y elongación) coinciden con uno de los ejes del elipsoide de los índices. Por tanto, una de las direcciones de vibración OX u OY del cristal coincide exactamente con esas direcciones privilegiadas. Por otro lado, cuando un cristal se encuentra en posición de extinción, las direcciones OX y OY coinciden con las direcciones OP y OA de los nicoles.

En consecuencia, se opera de la manera siguiente:

- Entre nicoles cruzados se busca la extinción del cristal.
- Se fija la platina y se retira el analizador.
- Se gira el ocular hasta hacer coincidir uno de los hilos con la dirección privilegiada del cristal.

50.) Determinación del plano de vibración del polarizador.- Por lo general, el plano de vibración del polarizador en la mayoría de los microscopios coincide con su dirección N-S. Para verificarlo se puede emplear, sea una sección alargada de turmalina, sea una sección de biotita que presente crucero. La biotita tiene su máxima absorción cuando el crucero es paralelo a la traza de vibración del polarizador, la turmalina cuando su eje ternario (generalmente la dirección de elongación de la sección) le es perpendicular. Por supuesto, para hacer esta determinación no se emplea el analizador.

6. Precauciones en el manejo del microscopio.-

La mayoría de las precauciones que se deben tener al emplear un instrumento delicado son las que se deben seguir en el manejo del microscopio polarizante. Se mencionarán las siguientes:

10.) Manipular el microscopio con cuidado, sin forzar ninguna de sus partes, procurando asimismo tenerlo en las mejores condiciones de limpieza; para el efecto utilícese algodón, papel especial o un cepillo de pelo de camello.

20.) Para enfocar, una vez colocado el objetivo, se acciona el tubo del microscopio (o bien la platina, según el modelo) hasta que se encuentre casi en contacto con la preparación, observando por un lado del microscopio y no a través de él, ya que si no se procede así se corre el riesgo de romper la preparación a estudiar, sobre todo si se trata de los objetivos de mayor aumento. En estas condiciones, se observa a través del ocular, alejando suavemente la preparación del objetivo, hasta que el enfoque sea correcto.

30.) Se recomienda, asimismo, tener ambos ojos abiertos cuando se observa a través del microscopio e igualmente utilizar cada uno de una manera consecutiva.

40.) Procurar tener una posición erecta, más no rígida, con el fin de trabajar con la mayor comodidad posible.

7. Estudio de los minerales transparentes en el microscopio polarizante.-

Las observaciones a efectuar en una sección delgada de un mineral transparente comportan, por lo general, los tres pasos siguientes:

- a) Observaciones con el polarizador solo y luz paralela.
- b) Observaciones con luz paralela y nícoles cruzados.
- c) Observaciones con nícoles cruzados y luz convergente.

Cada una de estas observaciones pone en relieve un cierto número de propiedades características del mineral.

La sección delgada debe reunir las siguientes cualidades:

- a) Tener sus caras lo más paralelas posibles.
- b) Poseer un espesor uniforme de alrededor de 0.03 mm. Este espesor, adoptado por convención, permite una transparencia casi perfecta para todos los minerales que no permanecen opacos para cualquier espesor. Los minerales opacos se estudian en el microscopio mineralográfico,

que utiliza luz reflejada.

En la práctica, cada vez que una lámina delgada contenga secciones de cuarzo, se podrá comprobar el espesor deseado, si al cruzar los nícoles el mineral presenta tintes blancos, grises o a lo sumo, el amarillo pálido de primer orden.



CAPITULO XII

1. **Introducción.**- La mayoría de las observaciones que se efectúan empleando sólo el polarizador pueden realizarse sin él, es decir, utilizando luz natural. Sin embargo, como la luz polarizada no modifica de ningún modo dichas observaciones y es necesaria en ciertos casos, como en la determinación del pleocroísmo, no tiene ningún objeto retirar el polarizador. En este tipo de observaciones no se trabaja con el analizador.

El aspecto que presenta la preparación en estas condiciones es el que se observaría empleando un microscopio ordinario, con la diferencia de que la iluminación es menor, ya que la mitad de la luz incidente ha sido absorbida por las paredes del polarizador, si éste es un nícol, o absorbida por el polarizador mismo, si se trata de un polaroide.

2. **Propiedades Observadas.**- Las propiedades de los minerales observables en estas condiciones son:

- color y pleocroísmo
- forma de la sección mineral
- crucero
- fractura
- inclusiones
- refringencia y relieve

Es posible, además, medir la longitud de las secciones de los minerales, si bien ésta se puede realizar con nicoles cruzados.

3. **Color y Pleocroísmo.**- La intensidad de la luz que penetra en un mineral puede disminuir al atravesarlo, según sea la absorción de éste.- Si la absorción es débil, el mineral es transparente e incoloro; si para ciertas radiaciones del espectro la absorción es mayor que para otras, el mineral es coloreado. En fin, cuando la absorción es total, el mineral es opaco.

El color que presenta una sección delgada de un mineral no es necesariamente el mismo que el del ejemplar macroscópico. Gran parte de los que en la naturaleza son coloreados pierden su color bajo el espesor de 0.03 mm., empleado. Otros en cambio lo conservan parcial o totalmente.- Sólo estos últimos serán designados "minerales coloreados".

Si al examinar una sección delgada empleando el polarizador solo, la intensidad y la naturaleza del color no cambian cuando gira la platina 360°, es decir, son independientes de la orientación de la sección con respecto al plano de vibración del polarizador, se tratará de una sustancia isotrópica (amorfa o perteneciente al sistema isométrico) o bien de un mineral anisotrópico cortado perpendicularmente al eje o ejes ópticos. Para resolver la ambigüedad será necesario efectuar observaciones con luz convergente y nicoles cruzados.

Si en cambio el color y la intensidad de la sección delgada varían según sea su orientación respecto del plano de vibración del polarizador, se dirá que la sustancia es pleocroica. Una sustancia de esta naturaleza es necesariamente anisotrópica.

El estudio del pleocroísmo se realiza observando los cambios de coloración de un cristal respecto de los hilos de la retícula. Si además, en una lámina delgada se encuentran diferentes secciones de un mismo mineral, será posible determinar aproximadamente la fórmula de pleocroísmo. Se opera como sigue:

1o.) Se calcula entre nicoles cruzados la posición de los ejes principales del elipsoide de los índices. Una sección de máxima birrefringencia contendrá los ejes n_x y n_y de un cristal uniaxial y n_x y n_y de uno biaxial. Una sección de birrefringencia nula contendrá n_z del cristal uniaxial y n_z del biaxial. La posición respectiva de cada uno de los índices se determina usando una lámina auxiliar, como se indicará en el capítulo próximo.

2o.) Se coloca cada una de estas direcciones sucesivamente en coincidencia con la traza del plano de vibración del polarizador.

3o.) Se retira el analizador y se observa el color obtenido.

4.- **Forma.**- La forma que presenta una sección de un mineral proporciona, a veces una información de su historia geológica. Por ejemplo, en el caso de las rocas sedimentarias el redondeamiento de los minerales constitutivos puede ser función del transporte y de la menor o mayor resistencia a la abrasión; un conjunto de cristales orientados en una cierta dirección pueden indicar que han sido sometidos a tensiones y, si se trata de rocas efusivas, la dirección del flujo.

En cristalografía se acostumbra definir cada sistema cristalino por un poliedro fundamental que posee los elementos de simetría del sistema y que representa la forma más simple de éste. Este poliedro fundamental es un paralelepípedo para todos los sistemas, a excepción del hexagonal, para el cual es un prisma hexagonal.

Así, en el caso del sistema ortorrómbico el poliedro fundamental es el prisma recto con base rectangular. Los ejes cristalográficos son perpendiculares a sus caras y "a" es por convención más pequeño que "b".

En la figura XII-1 se explican las notaciones de las diferentes caras del prisma. Por ejemplo, la cara (100) se denomina así porque corta al eje "a" a la unidad y es paralela respectivamente a "b" y "c". La cara opuesta será $(\bar{1}00)$ porque corta a "a" en el sentido contrario. La figura XII-2 muestra las notaciones para algunas secciones del prisma.

Las caras cristalinas observadas en láminas delgadas no son siempre aquéllas que corresponden al poliedro fundamental; en general se tratan de truncaduras que, para algunos minerales como la apatita (Fig. XII-3) y el zircón (Fig. XII-4) son determinativas.

Quando un mineral individual tiende a desarrollar una forma peculiar con cierta frecuencia, se dice que presenta un determinado hábito; también puede darse el caso de que un conjunto de minerales de la misma clase presente cierto arreglo o estructura, lo que constituye un agregado.

Aquellos cristales que poseen caras bien desarrolladas o no están limitados por las trazas de sus propias caras se denominan eucristales; -- los cristales con contornos irregulares determinados por las trazas de las caras de sus vecinos e ilocrométricos. Por último, los cristales formados de manera parcial son subeucristales.

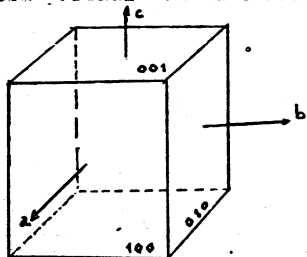


Fig. XII-1

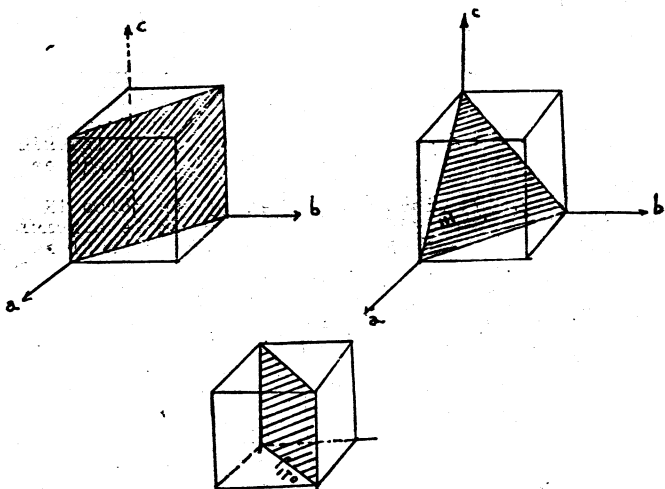


Fig. XII-2

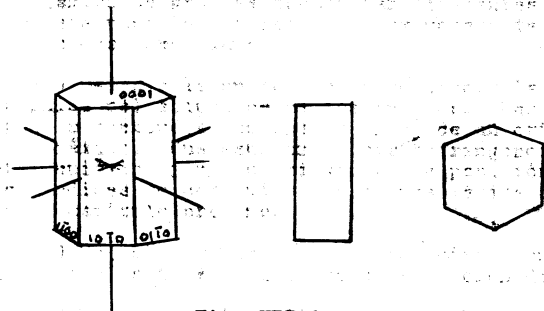


Fig. XII-3

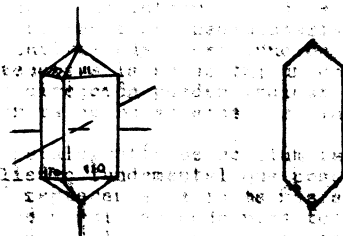


Fig. XII-4

5. **Crucero o Exfoliación.** -- El crucero o exfoliación es la tendencia que presenta un cristal a romperse en ciertas direcciones definidas, dando lugar a la formación de superficies más o menos lisas (planos de crucero). Tales direcciones adopta por posibles caras cristalinicas, -- puesto que están determinadas por el ordenamiento interno de los átomos y -- obedecen a las leyes de simetría del cristal en cuestión.

Las trazas de los planos de crucero que puede presentar un mineral en sección delgada son muy importantes para su identificación, ya que cuando existen se las observa fácilmente, mientras que las formas exteriores bien desarrolladas son por lo general raras.

Para una correcta determinación de las trazas del plano o planos de crucero de una sección delgada, debe tenerse en cuenta las variaciones de aquéllas según los diferentes cortes y debe examinarse, por tanto, el mayor número de secciones en distintas posiciones, antes de formarse un juicio.

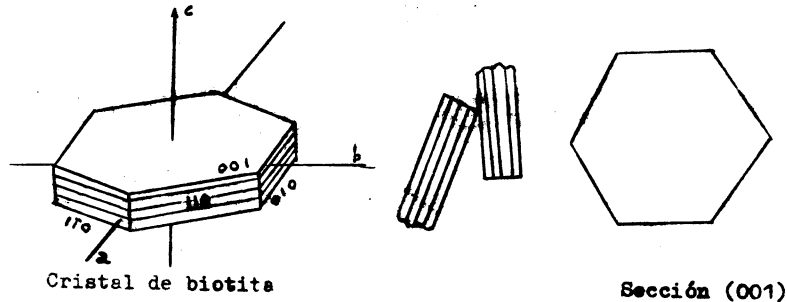
El crucero se puede describir de varias maneras:

a) La más científica es la que describe la dirección cristalográfica del crucero de un determinado mineral. Así, si se dice que las micas presentan un crucero (001) significará que éste es paralelo a dicha cara. A menudo se emplean términos como crucero basal, cúbico, romboédrico, etc.

b) Por otra parte dicha descripción puede expresarse de acuerdo con la facilidad con que se obtiene el crucero y la tersura de las superficies resultantes. De este modo un crucero es "perfecto" o "eminente" si se obtiene con gran facilidad y da lugar a superficies tersas, como en el caso de las micas y la calcita. Los términos "distinto", "imperfecto" e "interrumpido" expresan grados inferiores de crucero.

Asimismo, un cristal puede describirse según sea el número de planos de crucero que posea. Los más frecuentes son los planos en una, dos y tres direcciones, pero pueden encontrarse cuatro y aún seis.

A.- Crucero en una dirección.- Lo presentan, entre otros, las micas -perfecto (001)- y el topacio -perfecto (001)-. Las secciones perpendiculares u oblicuas a (001) mostrarán, por tanto, las trazas de los planos de crucero paralelos entre sí, mientras que las secciones paralelas a dicha cara no presentarán ninguno (Fig. XII-5).



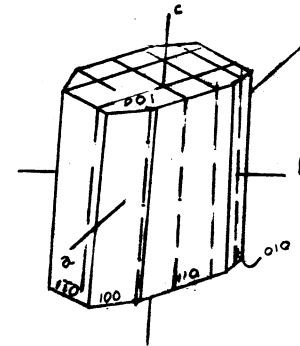
Cristal de biotita

Sección (001)

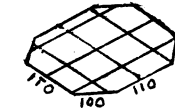
Secciones en zona con el eje "c"

Fig. XII-5

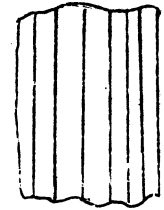
B.- Crucero en dos direcciones.- El ejemplo más típico lo representan las anfíbolos y las piroxenas, de tal modo que muchas veces basta esta sola propiedad para distinguir unas de otras. En las primeras el crucero, perfecto paralelo a las caras (110), forma entre sí ángulos de 56° y 124°, mientras que el de las piroxenas, también paralelo a (110), se intersecta en ángulos de 93 y 87 grados, aproximadamente. En consecuencia, las secciones (001), paralelas a dichas caras, mostrarán las dos direcciones de las trazas de los planos de crucero, mientras que en las secciones perpendiculares a (001) aparecerán únicamente líneas paralelas en una sola dirección (Figs. XII-6 y 7). En general, cuando se hacen secciones de crucero en secciones poco inclinadas con respecto a (001).



Cristal de hornblenda

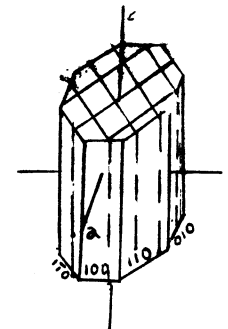


Sección (001)

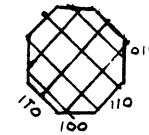


Sección en zona con el eje "c"

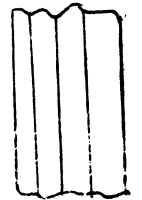
Fig. XII-6



Cristal de augita



Sección (001)



Sección en zona con el eje "c"

Fig. XII-7

La diferencia en forma de las secciones basales (001) de la hornblenda y la augita se debe a la diferencia entre los parámetros "a" y "b".

En la hornblenda:
En la augita:

a = 9.8 y b = 17.9
a = 9.71 y b = 8.89

C. Crucero en tres direcciones.- Los tipos más frecuentes de cruceros en tres direcciones son los cruceros cúbico, rectangular y romboedral. Los dos primeros son paralelos a las caras del cubo o del prisma rectangular, según sea el sistema cristalino; en secciones delgadas dan lugar a formas triangulares, cuadradas o rectangulares y las trazas de los planos de crucero forman cubos o rectángulos. Así, la anhidrita muestra tres cruceros rectangulares en las direcciones (100), (010) y (001), según se observa en la figura XII-8.

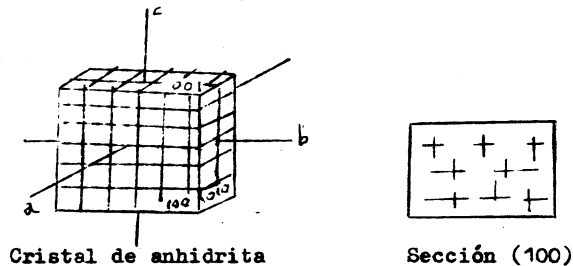


Fig. XII-8

El crucero romboedral es paralelo a las caras del romboedro y lo presentan los carbonatos romboédricos (calcita, dolomita, magnesita, siderita, rodocrosita y ankerita). En sección delgada, las trazas de los planos de crucero son líneas entrelazadas en forma de rombos (Fig. XII-9).

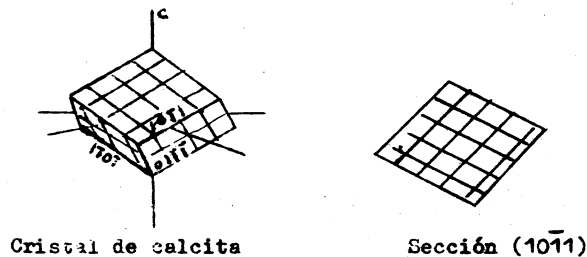


Fig. XII-9

D. Crucero en cuatro direcciones.- El ejemplo más común es la fluorita cuyo crucero es paralelo a las caras del octaedro. En sección delgada tenderá a desarrollar formas triangulares o rombicadas (Fig. XII-10).

E. Crucero en seis direcciones.- Lo presentan algunos cristales de decaedrales como la bienda o esfalerita. Este crucero es paralelo a las caras del dodecaedro y en sección delgada se observa una red intrínca.

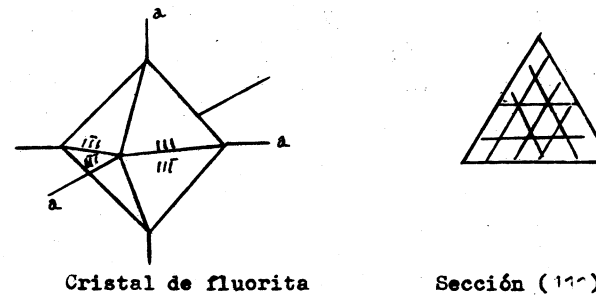


Fig. XII-10

6. Fractura.- La fractura es la propiedad que presentan los cristales de romperse en direcciones diferentes de las del crucero y la propiedad que poseen los minerales no cristalizados de romperse en cualquier dirección. Cuando un cristal posea crucero perfecto es más difícil que se fracture que otro que no lo tenga.

Los tipos principales de fractura son la concoidal, como la de la obsidiana, y la irregular que presentan la mayoría de los minerales.

7. Medida de Angulos Planos.- Si se trata de medir el ángulo formado por dos direcciones dadas de una sección delgada de un mineral (trazas de los planos de crucero, por ejemplo), se hace coincidir sucesivamente cada una de dichas direcciones con uno de los hilos de la retícula, girando la platina. El ángulo buscado es igual a la diferencia de lecturas en el círculo graduado de la platina.

8. Refringencia y Relieve.- La refringencia de una sustancia es la facilidad que posee ésta para refractar la luz y su índice de refracción es la medida de dicha propiedad.

En el campo del microscopio los contornos de ciertos minerales destacan con gran nitidez, mientras que los de otros minerales son difícilmente visibles. Esta visibilidad del contorno de un mineral se denomina "relieve" y depende de la diferencia entre los índices de refracción del mineral y otro mineral próximo diferente, o bien, entre los del mineral y el medio en que está montado. Cuando los índices de ambos se aproximan, el relieve disminuye. En el caso de las secciones delgadas de roca, el medio en que están montadas, por lo general, es el bálsamo de Canadá, cuyo índice de refracción "n" es igual a 1.537. Entonces, los minerales que poseen índices de refracción bajos, como la fluorita (n = 1.434) e índices de refracción altos, como la almandina (de alrededor de 1.82), sumergidos en ese medio presentarán un alto relieve y las desigualdades de su superficie, producidas necesariamente al pulirse, se ponen en evidencia tomando un aspecto rugoso característico. En campo de luz polarizada, los minerales con índices de refracción diferentes a los del bálsamo, poseerán un relieve muy débil, difícilmente visible.

Los minerales anisotrópicos que presentan una gran divergencia entre los dos extremos de sus índices de refracción muestran una variación en el relieve y en la intensidad de la línea de Becke al girarse -

la platina del microscopio. La calcita y los otros carbonatos romboédricos ilustran perfectamente este fenómeno; cuando n_o es paralelo al plano de vibración del polarizador el relieve es débil, inferior al del bálamo (en el caso de la calcita $n_o = 1.486$); en una posición perpendicular a la precedente (n_o paralelo al plano de vibración del polarizador) el relieve es alto, superior al del bálamo (para la calcita $n_o = 1.658$).

Teóricamente todos los minerales anisotrópicos deben presentar dichas variaciones, pero en la mayor parte de ellos el fenómeno no es visible en la práctica.

9. Determinación de la refringencia al microscopio.-

10.) Método de Becke.- El método de Becke se basa en el fenómeno de reflexión total que se produce en la superficie de separación entre dos minerales de índices de refracción diferentes, lo que da lugar a una concentración de luz del lado de aquél cuyo índice de refracción es más elevado.

Se pueden considerar dos casos:

a) Si el contacto entre los dos minerales es vertical se utiliza luz convergente. La verticalidad se comprueba porque la traza del contacto es fina y no se desplaza al variar el enfoque en luz paralela; no sucede así cuando la traza es oblicua (Fig. XII-11).

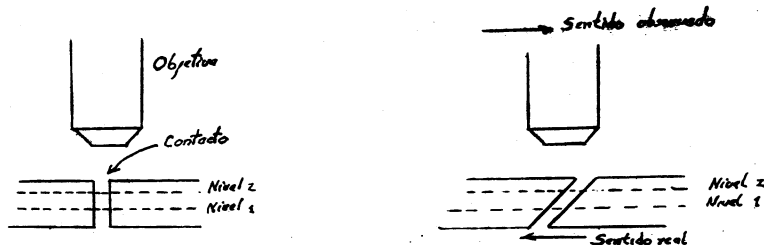


Fig. XII-11

Supóngase dos minerales de diferentes índices de refracción N y n (siendo N mayor que n) que están en contacto vertical a lo largo de la línea AB (Fig. XII-12). Si se emplea el condensador, parte de la luz que atraviesa al mineral de índice " n ", se refleja al incidir en AB y parte se refracta al entrar en N (Rayos 1 y 2). Los rayos 3 y 4 que pasan a través del mineral de índice N y que inciden en AB con un ángulo mayor que el crítico para ese mineral sufren la reflexión total. El efecto que se observa es una concentración de luz encima del contacto, en el medio de mayor índice de refracción.

Esta diferencia de iluminación es imperceptible cuando el mineral por determinar está enfocado exactamente. Sin embargo, al alejar ligeramente el objetivo de la preparación (plano P') se observa un halo de luz que se desplaza hacia el mineral que posee el mayor índice de refracción. Dicho halo se denomina "línea de Becke", la cual se observa mejor cuando se emplean objetivos de gran aumento y se oscurece el cam-

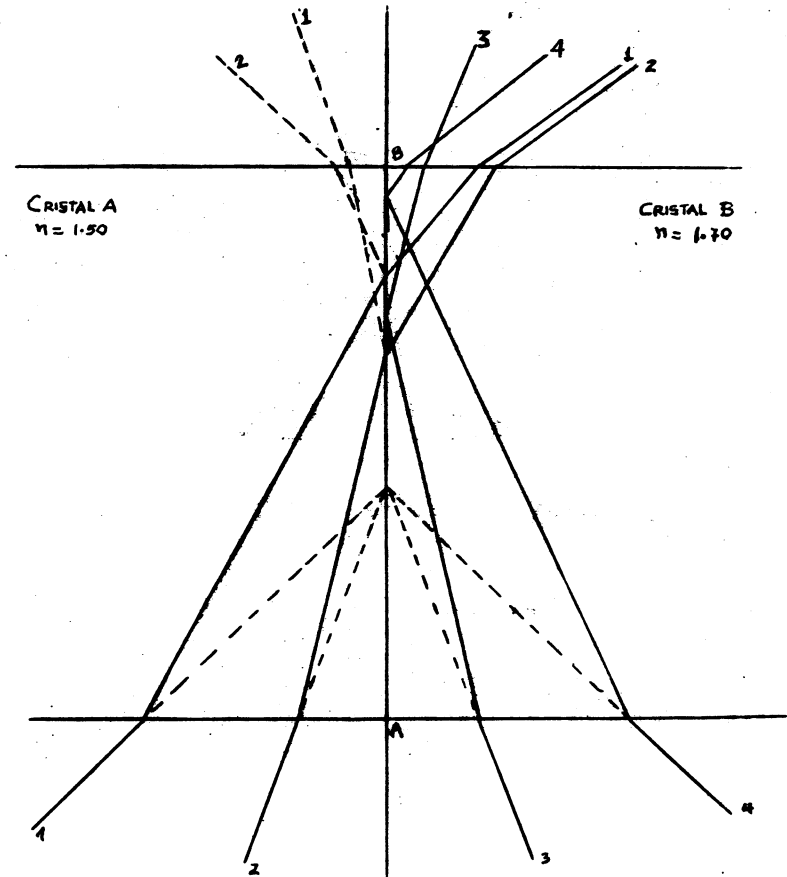


Fig. XII-12.

po, por medio del diafragma del aparato de iluminación (Fig. XII-13a).- Si en cambio se reduce la distancia entre el objetivo y la preparación, se observará el efecto contrario, esto es, la línea de Becke se desplazará hacia el mineral de menor índice de refracción (Fig. XII-13b).

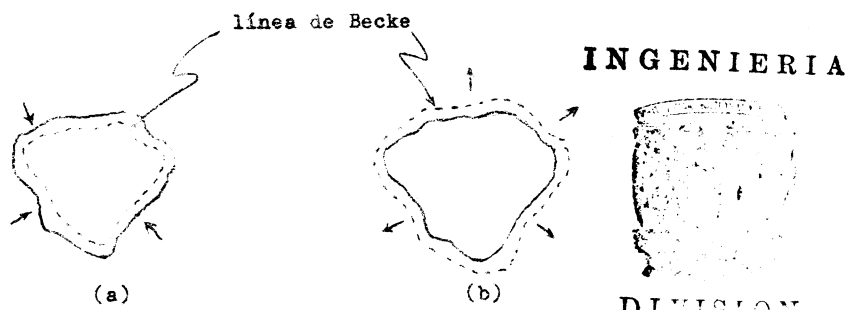
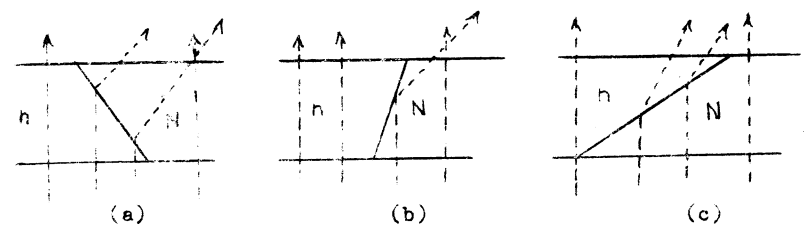


Fig. XII-13

b) Si los contactos entre los dos minerales son cualesquiera, se utiliza luz paralela. Cuando el mineral de índice superior N recubre parcialmente al de índice inferior n, la luz se desviará hacia el mineral más refringente, según se muestra en la figura XII-14a. Cuando es el mineral n el que recubre a N el efecto es el mismo, ya sea que la inclinación del contacto sea o no superior al ángulo crítico (Figs. XII-14b y c, respectivamente).

Se opera de la misma manera que en el caso de los contactos verticales pero sin emplear el condensador.



En resumen, la línea de Becke puede observarse sea empleando luz convergente, sea luz paralela. La regla que se observa es la siguiente:

LA LINEA DE BECKE SE DESPLAZA HACIA EL MINERAL MAS REFRINGENTE CUANDO SE DESERUYE EL ENFOQUE ELEVANDO EL OBJETIVO (AUMENTO DE LA DISTANCIA ENTRE EL OBJETIVO Y LA PREPARACION). EL FENOMENO INVERSO SE PRODUCE AL BAJAR EL OBJETIVO.

INGENIERIA
DIVISION
PROFESIONAL
BIBLIOTECA

Si se opera sin quitar el polarizador, como es costumbre hacerlo, el índice observado de un mineral anisotrópico es aquél que pertenece a la onda que vibra en el plano de sección principal del polarizador. Por tanto, si se gira la platina se cambia la orientación del mineral con respecto a ese plano y en consecuencia el valor del índice. Este fenómeno puede observarse en el microscopio en el caso de un mineral que posee un índice mayor y otro menor que el bálsamo de Canadá, como la oligoclasa (entre 1.533 y 1.551, aproximadamente). Al girar la platina se constata una inversión de la línea de Becke (Figs. XII-15a y b).

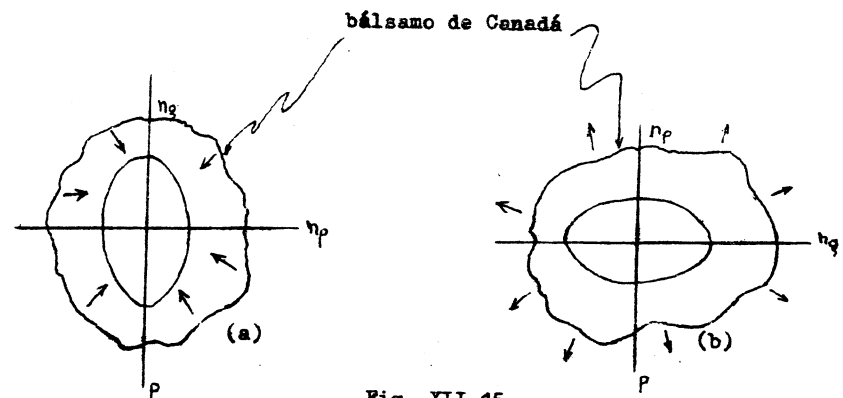


Fig. XII-15

El mismo fenómeno puede observarse en el caso de dos minerales de índices muy cercanos e inclusive cuando uno de los índices extremos de uno de ellos está comprendido entre los dos índices extremos del otro, por ejemplo el cuarzo ($n_o = 1.544$ y $n_e = 1.553$) y la oligoclasa. Aunógamente en los cristales de cuarzo orientados de diferentes maneras se puede llegar a observar líneas de Becke entre todas las secciones.

En la Fig. XII-12 se observa que una parte de la intensidad luminosa de los rayos luminosos se refleja en el cristal A (Rayos 1 y 2). En consecuencia, en algunas ocasiones al desenfocar se pueden observar dos líneas de Becke moviéndose en sentidos contrarios, sobre todo cuando es considerable la diferencia de índices entre dos minerales en contacto. La verdadera línea de Becke será la más luminosa.

20.) Método de inmersión.- El método de inmersión está fundado en el hecho de que el contorno de un cuerpo incoloro en el seno de un líquido, también incoloro, es visible cuando existe una cierta diferencia entre los dos índices de refracción de ambos.

La técnica general consiste en disponer de una serie de líquidos incoloros, transparentes y estables, cuyos índices de refracción se hayan determinado recientemente, en los cuales se introduce sucesivamente el fragmento del mineral a determinar hasta que su contorno desaparezca casi totalmente, que será cuando el mineral posea aproximadamente el mismo que el líquido en cuestión. Se recomienda, además, para ahorrar tiempo, utilizar, simultáneamente, el método de Becke.

Los líquidos deben ser miscibles en todas proporciones unos con otros y asimismo poseer baja dispersión, baja volatilidad y viscosidad moderada. Además deben ser inertes, es decir que no reaccionen con la sustancia a examinar y que tampoco la disuelvan.

Según KERR (1959) se ha encontrado que unos pocos líquidos bien escogidos son preferibles a una colección amplia de compuestos complicados. Estos líquidos se anotan en la tabla XIII-1 y cubren los minerales cuyos índices varían entre 1.385 y 1.840. Una colección de líquidos fabricados a base de yoduro de metileno, fósforo y azufre cubren aquellos entre 1.78 y 2.06. Arriba de 2.06 se emplean sólidos de baja temperatura de fusión.

TABLA XIII-1

LÍQUIDOS	Para minerales comprendidos entre los índices siguientes:
Propionato de Etilo	1.385
Mesitileno	1.430
Isovalerato de isoamilo	1.428
Keroseno	1.466
Keroseno	1.466
Monocloronaftaleno (Aceite Halowax)	1.630
Aceite Halowax	1.630
Yoduro de metileno	1.740
Solución de yoduro de metileno y azufre	1.780
Mescla de yoduro de metileno y fenildiyodoarsina	1.780
	1.840

Se recomienda que los líquidos estén bien tapados para impedir la evaporación, en frascos oscuros para evitar alteraciones y además verificar a menudo sus índices, puesto que éstos disminuyen al aumentar la temperatura. Esta verificación se realiza por medio de refractómetros.

10. Determinación de la refringencia empleando refractómetros.— Los refractómetros son aparatos que se emplean para calcular los índices de refracción de líquidos y sólidos. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de reflexión total. Así, un rayo luminoso proveniente de un medio de índice n , al incidir en otro medio de índice n' menor, sufre la reflexión total a partir de un ángulo de incidencia límite (ángulo crítico) definido por

$$\sin r_c = \frac{n'}{n}$$

Puesto que el ángulo crítico para dos sustancias en contacto es función de sus respectivos índices de refracción, conociendo uno de éstos y calculando aquél por medio del refractómetro será posible obtener el otro índice.

El refractómetro más usado es el de Abbe. Consiste en un hemisferio de vidrio de índice de refracción alto cercano a 1.85. El líquido

o sólido por identificar se coloca encima de él. Para que el método produzca buenos resultados es necesario que el índice "n" de la sustancia desconocida sea menor que el del hemisferio.

Cuando se trata de un mineral que produce que una de sus caras sea plana y pulida. Se coloca una gota de líquido de índice de refracción, generalmente yoduro de metileno, entre la superficie plana del mineral y la del hemisferio, con el objeto de eliminar la capa de aire que podría separarlos; como el líquido se encuentra entre las dos sustancias en forma de una película delgada con superficies paralelas, cualquiera que sea el efecto óptico que sufre la luz al entrar, se compensará con el que sufre al salir. Así, la presencia de la película puede ser ignorada.

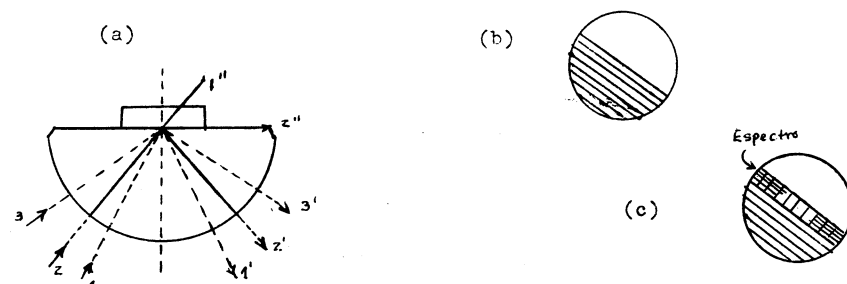


Fig. XII-16

La figura XII-16a representa una sección de tal hemisferio, con una lámina de mineral isotrópico. Si se hace incidir en el mineral un haz de luz monocromática que atraviesa al hemisferio, una parte de los rayos incidentes (por ejemplo, 1) sufre reflexión parcial (rayo 1') y refracción parcial (rayo 2"). El rayo 2" incide con el ángulo crítico; una parte emerge rozando la superficie del hemisferio (rayo 2") pero la mayor parte se refleja (rayo 2'). Todos los rayos, como 3, que inciden bajo un ángulo mayor que el crítico, sufren la reflexión total.

Si se lleva el eje óptico de un telescopio a la posición 2' se observará una línea que divide el campo de visión; un lado se encontrará más iluminado que el otro, gracias a la reflexión total (Fig. XII-16b).

En la figura XII-16c se muestra el mismo efecto si se utiliza luz blanca.

Por último, si se emplea el mismo dispositivo en cuerpos anisotrópicos se tendrá sucesivamente reflexión total para cada una de las ondas refractadas. Al utilizar el telescopio y luz monocromática se observan dos líneas que dividen al campo (Fig. XII-17a). En cambio, si se emplea luz blanca se observarán dos espectros que dividen al campo (Fig. XII-17b). Cuando la anisotropía no es considerable, los dos espectros se pueden sobreponer.

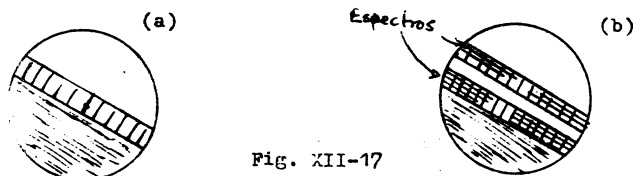


Fig. XII-17

11. Determinación de los índices de refracción de los cristales anisotrópicos en el microscopio.— Si se desea calcular con una cierta aproximación los índices de refracción correspondientes a las direcciones principales de vibración de un mineral anisotrópico, se procederá de la manera siguiente:

Se colocan varios fragmentos del mineral en un líquido cuyo índice se aproxime a los de aquél y se observan bajo nicoles cruzados.

a) Si el mineral es uniaxial, aquella sección que sea perpendicular al eje óptico contiene a n_o . Tal sección permanece extinguida durante una rotación completa de la platina; por tanto, bastará localizar dicha sección para calcular el índice n_o empleando los procedimientos anteriormente indicados.

Una vez que n_o ha sido determinado, se cruzan de nuevo los nicoles y se busca aquel fragmento que presente los colores de interferencia máximos; debe tomarse en cuenta la variación de los colores de interferencia con el espesor del fragmento; la sección buscada es paralela al eje óptico. Cuando se gira la platina, dicha sección se extingue cada vez que n_o y n_e coinciden con los planos de vibración de los nicoles (hilos de la retícula). Se coloca, por consiguiente, al fragmento en extinción, se retira el analizador y se calcula uno de los índices; bastará girar 90° la platina para calcular el otro. Como ya se conoce el valor de n_o , se sabrá fácilmente cual índice es n_e .

Este método no puede emplearse en cristales de birrefringencia muy baja.

b) Si el mineral es biaxial el procedimiento es parecido: una sección perpendicular a uno de los ejes ópticos contiene a n_p y aparece extinguida entre nicoles cruzados. En cambio, una sección paralela al plano de los ejes ópticos contiene a n_p y n_g y presenta sus máximos colores de interferencia.

12. Inclusiones.— Una última característica a observar son las pequeñas inclusiones de un mineral en otro, las que pueden, bajo ciertas condiciones, dar una idea de génesis. Las más notables son las inclusiones de zircón en la biotita que ha menudo están rodeadas de halos pleocroicos, ya que la medida de la opacidad del halo, empleando un microscopio, es la base de un método radiocronológico para determinar la edad de una roca.

13. Medida de longitudes.— Para medir la longitud de un fragmento de mineral se emplea el ocular micrométrico. Este tiene una escala grabada en vidrio o una red cuadrícula.

Se observan cuantas divisiones del ocular corresponden a la longitud "L" a medir y si son "X" se tiene:

$$L = CX$$

en donde "C" es una constante denominada "valor micrométrico", que representa la verdadera longitud de un objeto que ocupa una división de la escala y que depende de cada objetivo y de la longitud del tubo.

La determinación de "C" se realiza mediante el micrómetro objetivo, escala grabada o fotografiada en vidrio y dividida en décimas o centésimas de milímetro, que se coloca encima de la platina.

Si a Y divisiones del ocular micrométrico corresponden Z divisiones del micrómetro objetivo, en el caso de que la escala esté dividida en décimos de milímetro la constante se calculará por medio de la fórmula siguiente:

$$C = \frac{Z}{Y} 0.1$$

Si la escala está dividida en centésimas de milímetro entonces se emplea la fórmula:

$$c = \frac{Z}{Y} 0.01$$

Estas mediciones se efectúan varias veces y se obtiene la medida — promedio.

CAPITULO XIII

OBSERVACIONES EN LUZ PARALELA Y NICOLES CRUZADOS

1. Introducción.- Se ha visto ya que cuando los planos de simetría de dos nicoles son perpendiculares entre sí, es decir cuando los nicoles están cruzados, toda la luz que atraviesa el polarizador será detenida - por completo por el analizador o sea que ~~se observará~~ una "extinción total".

Si se interpone en estas condiciones una lámina transparente de caras paralelas de un cristal anisotrópico entre los nicoles, la luz será restablecida para casi todas las secciones del cristal, a excepción de - aquéllas cortadas perpendicularmente a un eje óptico.

Conviene recordar lo siguiente:

1o. Si se emplea luz monocromática:

- La vibración que proviene del polarizador vibra en el plano de simetría OP de éste.
- Cuando esta vibración penetra en la lámina anisotrópica considerada, se descompone en dos vibraciones OX y OY, según -- los ejes de la elipse de intersección entre el elipsoide de los índices y el plano de la lámina, cuyas longitudes son -- iguales respectivamente a los dos índices n_g' y n_p' , recíprocos de la velocidad de propagación.
- Al salir de la lámina estas dos vibraciones presentan una diferencia de trayectoria: $\delta = e (n_g' - n_p')$

en donde "e" es el espesor de la lámina y la diferencia $(n_g' - n_p')$ es la birrefringencia.

- El analizador permite la entrada únicamente a las vibraciones que están en su plano de simetría OA.

La intensidad transmitida dependerá, por tanto, de la diferencia de trayectoria y del ángulo "x" de rotación de la platina. Cada vez que uno de los ejes n_g' o n_p' se confunda -- con el plano de vibración del polarizador o del analizador, -- la intensidad será nula. En efecto, el polarizador anulará una componente y el analizador la otra. En consecuencia, -- para una rotación completa de la platina se observarán cuatros extinciones; en cambio, para un ángulo de 45° respecto -- de una dirección de extinción, la intensidad será máxima. -- Para todos los otros valores de "x" la intensidad será intermedia.

riores y además:

Cuando el retardo es equivalente de "x", la radiación de longitud de onda "x" se encontrará ausente en luz polarizada y analizada y se observará el color complementario.

Si el retardo es nulo, todas las radiaciones se encuentran extinguidas y se observará el negro.

Si $\delta = 0.200 \mu = \frac{\lambda}{2}$, el violeta será transmitido con más intensidad que las otras radiaciones y el color observado será un tono de gris.

Si $\delta = 0.280 \mu = \frac{\lambda}{2}$, el amarillo se encuentra en su máximo y el -- tinte resultante es el blanco de primer orden.

Si $\delta = 0.400 \mu = \frac{\lambda}{2}$, el rojo será transmitido con más intensidad -- que las otras radiaciones y el color resultante es un anaranjado -- claro.

Para $\delta = 0.560 \mu = \lambda$, el amarillo se ha suprimido, observándose el primer tinte sensible, límite de los colores de primer y segundo orden.

2. Isotropía y anisotropía.- Se ha establecido ya que los colores de interferencia son una consecuencia, en último término, de la doble refracción, ya que ésta es una condición indispensable para producir el -- fenómeno de polarización cromática. Por tal motivo los minerales isotrópicos no afectarán en nada la extinción de los nicoles, es decir que permanecerán oscuros sin experimentar cambio alguno al girar la platina.

En la práctica el número de minerales isotrópicos es muy limitado; -- su determinación se realiza sobre todo a partir de los índices de refracción y de su forma habitual. Los más comunes son el ópalo, la fluorita, la leucita, la sodalita, la analcema, el granate y la espinela. Los mineraloides más comunes en las rocas son el vidrio volcánico y la colofana y son, por supuesto, isotrópicos.

En cambio, casi todas las secciones de los minerales anisotrópicos producen doble refracción y, por tanto, presentarán colores de interferencia. Se exceptúan las secciones normales al eje óptico en los cristales uniaxiales, que se comportan como secciones isotrópicas. Teóricamente, las secciones perpendiculares a un eje óptico en los cristales biaxiales deberían comportarse de la misma manera. Sin embargo, la extinción no es completa debido al fenómeno de dispersión.

3. Colores de interferencia anormales.- Ocasionalmente ciertos minerales producen colores de interferencia que no son los normales para ellos. Este fenómeno se conoce como interferencia anómala y la pueden -- presentar tanto los minerales isotrópicos como los anisotrópicos.

1o.) Cuando un mineral, que se supone es isotrópico, presenta colores de interferencia, generalmente de bajo orden, esa anomalía se debe -- en la mayoría de los casos, a que dicho mineral ha sido sujeto a deformaciones. A menudo el granate, especialmente la grosularita, presenta bandas que exhiben colores de interferencia. Al estudiar su estructura en Rayos X se observa que, a pesar de todo, continúa siendo isométrico.

2o.) Si un cristal presenta coloración cuando ha sido observado empleando únicamente el polarizador, al colocarlo entre nicoles cruzados -- el color resultante se deberá a un efecto combinado del color de interferencia y el color debido a la absorción.

3o.) La birrefringencia de cualquier mineral anisotrópico no es -- exactamente la misma para todas las partes del espectro, es decir, a ca-

da longitud de onda corresponde un elipsoide de los índices para ese mineral. En la gran mayoría de ellos, este fenómeno no es lo suficientemente importante para ser observado; pero en un pequeño número las diferencias en la birrefringencia producen colores de interferencia anómalos. Así, si un mineral tiene birrefringencia nula para un color y birrefringencia apreciable para los otros, aquél faltará en todos los colores de interferencia obtenidos, sea cual fuere el espesor del mineral. Por ejemplo la melilita es casi isotrópica para la luz amarilla y dará lugar en luz blanca a un color azul anormal denominado "azul Berlín".

En el caso de los minerales biáxicos los colores de interferencia anormales pueden deberse, además, a que las posiciones de extinción no son exactamente las mismas para todos los colores, o por el hecho de que el cristal es uniaxial para algún color en especial y biáxico para los otros. La pennina es un mineral biáxico que presenta el azul Berlín.

4. Determinación de las direcciones de vibración lenta n_p' y rápida n_g' de una sección cristalina.-

1o.) Método.-

Si se tiene una sección birrefringente cualquiera de un mineral y se desea conocer cuáles son sus direcciones de vibración n_p' y n_g' , se sabe que cuando la sección se encuentra en extinción y si los hilos de la retícula están bien ajustados, n_p' y n_g' coincidirán con ellos.

Si se desea además, hacer la distinción entre las dos vibraciones, a partir de la posición de extinción se gira la platina 45° en el sentido de las manecillas del reloj, es decir en una de las posiciones de intensidad máxima; en esas condiciones la vibración n' que coincidía con el hilo N-S de la retícula, presenta una dirección noreste; si se intercala en tal posición un compensador en la hendidura del tubo del microscopio que existe expreso, se introducirá una diferencia de trayectoria suplementaria de los rayos luminosos entre la lámina delgada y el analizador. El N_g de la lámina auxiliar está orientado a 45° hacia el NE, es decir, que en esas condiciones el N_g de esa lámina es paralelo al n' a determinar.

Si $n' = n_p'$, la diferencia de trayectoria aumenta, ya que coincide con N_g . Por tanto, el color de interferencia inicial observado "sube" en la escala de colores de Newton. Por el contrario, si $n' = n_g'$, la diferencia de trayectoria disminuye y el color de interferencia "baja" en la escala de Newton.

2o.) Empleo de los diversos compensadores.-

a) Mica $\frac{1}{4}$ de onda.- Este compensador interpuesto en el trayecto de los rayos luminosos hace sufrir a las vibraciones un retardo igual a la cuarta parte de la longitud de onda de la región media del espectro. Se

comprenden entre el blanco de primer orden y el final del segundo orden. Para birrefringencias más altas o más bajas, el resultado es dudoso.

b) Tinte sensible (cuarzo o yeso rojo de 1er. orden).- Se emplea del mismo modo que la mica $\frac{1}{4}$ de onda y se usa para colores de interferencia poco elevados, hasta el rojo de 1er. orden como máximo.

Si el color de interferencia sube en la escala de Newton el n_g' del mineral coincide con el N_g del compensador.

Si el N_g del compensador coincide con el n_p' del mineral, los retardos δ de la sección del mineral y Δ del compensador se restan. Si $\Delta < \delta$ el color resultante es el que corresponde a un retardo ($\delta - \Delta$); si $\Delta > \delta$, dicho color corresponderá a un retardo ($\Delta - \delta$).

c) Cuña de cuarzo.- Se emplea en todos los casos, principalmente en aquellos minerales que presentan tintes de interferencia superiores al 2o. orden. Si los colores de interferencia suben en la escala cromática a medida que se introduce la cuña de cuarzo, el n' del mineral coincide con el N_g del compensador; si por el contrario, el color de interferencia baja de orden hasta llegar a un punto en que, equilibrando el retardo de la cuña al ocasionado por el mineral, se llega a la compensación apareciendo este último extinguido, el n_p' del mineral coincide con el N_g del compensador.

5. Carta de colores de interferencia.- A partir de la escala de colores de Newton de centro negro, A. Michel Levy y A. Lacroix idearon un nomograma de colores de interferencia, en función de las tres variables que componen la fórmula

$$\delta = e (n_g - n_p)$$

Por medio de tal nomograma (Kerr, 1959, págs. 162 y 163), si se conocen dos de dichas variables, se calcula inmediatamente la tercera.

Por otro lado, puesto que por convención las láminas delgadas de roca se tallan a un espesor constante de alrededor de 0.03 mm., una sola variable intervendrá en el cálculo de la diferencia de trayectoria y, en razón de dicha convención, la escala de colores de Newton será también una escala de birrefringencias.

El eje de las abscisas de la carta de colores de interferencia representa las diferencias de trayectoria " δ " en función de las diferentes longitudes de onda, en μ . El eje de las ordenadas, los diferentes espesores " e " de la lámina, en mm. Las líneas rectas inclinadas que parten del origen hacia la parte superior de la carta representan el valor de la birrefringencia ($n_g - n_p$), valor que es constante a lo largo de cada una de ellas y que está marcado en dicha parte superior. Si la carta no está coloreada, como es a menudo el caso, el hombre de cada color estará señalado también.

a) Estimación del espesor de la sección delgada.- Si existe en la lámina delgada un mineral cuya birrefringencia sea conocida y en secciones orientadas diversamente, se escoge aquella que presenta los colores de interferencia máximos.

Esta sección contendrá, con bastante aproximación, los ejes n_p y n_g del elipsoide de los índices, ya que será paralela o casi paralela al plano óptico, si el mineral es uniaxial, o al plano de los ejes ópticos, si el mineral es biáxico y, en esas condiciones, su birrefringencia será igual o más cercana a la birrefringencia absoluta.

Se coloca la sección en la posición de máxima intensidad. La intersección I de la recta AA' (color observado) con OB (birrefringencia con

cida), de el espesor buscado, el cual se lee directamente en el eje de las ordenadas (Fig. XIII-1).

El mineral mas empleado para esta determinación es el cuarzo, a causa de su abundancia y de su estabilidad. Si se observa una sección que muestre un amarillo pálido como máximo color de interferencia, se estima en el nomograma que tiene un valor cercano de $270 \text{ m}\mu$. Se sabe además, que la birrefringencia del cuarzo es de 0.009. Por tanto, el espesor de la lámina será de $30,000 \text{ m}\mu$, es decir 0.03 mm .

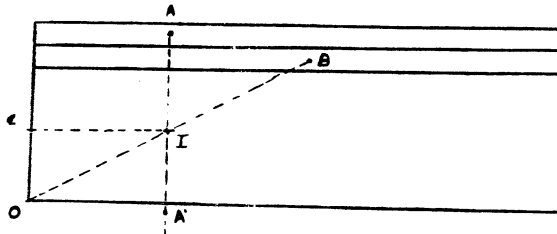


Fig. XIII-1

b) Estimación del color de interferencia del mineral.- Una vez escogida la sección que presenta la intensidad máxima y una vez colocada a 45 grados de la posición de extinción, se compara el color observado con el correspondiente del nomograma de colores. Si por falta de práctica, no es posible determinar con certeza el orden a que pertenece dicho color, se lleva la dirección n' paralelamente a la dirección NE y se introduce suavemente la cuña de cuarzo en la hendidura del microscopio. Durante esta operación los colores descienden en la escala de Newton, desde el tinte propio del mineral hasta el negro y se cuentan todas las veces que se observe un tinte sensible.

c) Estimación de la birrefringencia.- Finalmente, la birrefringencia de un mineral puede calcularse de una manera similar, conociendo el espesor de la lámina y determinado el color de interferencia. Así, en la figura XIII-1, calculado I, la recta OI dará directamente la birrefringencia en B.

Si se tienen varias secciones de un mismo mineral puede obtenerse con gran aproximación el valor de su birrefringencia absoluta. Para esto se escoge la sección que presenta la mayor birrefringencia y que deberá contener a los dos índices extremos n_x y n_y y se la observa bajo luz convergente; si se trata de un mineral biáxico, en este caso la figura de interferencia deberá ser paralela al plano de los ejes ópticos; si fuera un mineral uniaxial, la figura de interferencia será paralela o casi paralela al eje óptico.

6. Medida del ángulo de extinción.-

El ángulo de extinción de una sección de un cristal anisotrópico es aquél formado entre uno de los ejes de la elipse de intersección de esa sección con el elipsoide de los índices y la traza de un plano cristalo-

gráfico, que puede ser el crucero, una cara o el plano de macla (twinning plan.).

El procedimiento general consiste en efectuar la sustracción entre las lecturas dadas por la platina, cuando el mineral está en su posición de máxima extinción y cuando la dirección cristalográfica es paralela al hilo N-S de la retícula.

El eje de la elipse que se escoge es aquél que forma un ángulo inferior o igual a 45 grados con respecto a la dirección cristalográfica. El ángulo de extinción así definido será positivo cuando se cuenta, a partir de la línea de referencia, en el sentido de las manecillas del reloj y negativo en el sentido contrario.

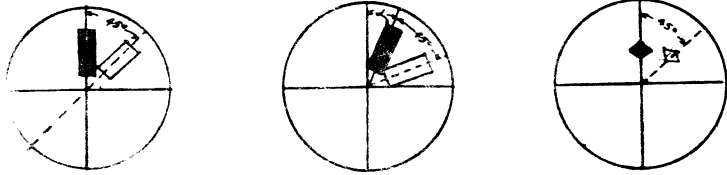
La apreciación de la posición de máxima extinción no es siempre fácil, ya que no se trata de un cambio brusco de claridad a oscuridad, sino de un tránsito gradual de una oscuridad menor a otra mayor. En caso de duda se puede emplear la lámina tinte sensible, procurando que el mineral ocupe sólo una parte del campo, pues así es más fácil establecer la comparación entre el color debido a la lámina y el del mineral. Cuando todo el campo permanezca uniformemente coloreado (se observará por supuesto, el tinte violeta sensible de la lámina) se estará en la posición de máxima extinción. Este procedimiento tiene menor sensibilidad cuando el mineral presenta fuerte absorción y no es aplicable si la dispersión de los ejes ópticos es fuerte.

Otra dificultad para medir correctamente el ángulo de extinción consiste en escoger bien la traza del plano cristalográfico de referencia. Si se trata del crucero, se tendrá la precaución de escoger sólo aquel que sea claro y constante en la mayoría de las secciones. En lo que respecta a las caras o a los planos de macla, es necesario poseer un buen conocimiento cristalográfico del mineral observado, lo cual sólo es posible en determinados casos.

Si la sección cristalina presenta máxima extinción entre nicoles cruzados, cuando la dirección cristalográfica dada es paralela a una de las direcciones de vibración de los nicoles, se dice que posee "extinción recta" o "extinción paralela". En este caso, obviamente, el ángulo de extinción es de cero grados (Fig. XIII-2a).

Cuando la dirección cristalográfica no coincide con las direcciones de vibración de los nicoles cruzados, sino que forma un cierto ángulo con ellas, se dice que la sección posee extinción "oblicua" o "inclinada" (Fig. XIII-2b).

En fin, algunos minerales que presentan secciones rómbicas se extinguen cuando el plano de vibración de los nicoles es paralelo a las diagonales de los rombos. Esta extinción se denomina "simétrica" y la pueden presentar algunos minerales que tengan secciones cuadrangulares (Fig. XIII-2c).



(a) EXTINCIÓN RECTA (b) EXTINCIÓN OBLICUA (c) EXTINCIÓN SIMÉTRICA
 α' = ángulo de extinción

Extinción máxima
 Colores de interferencia.
 Fig. XIII-2

7. Relación entre los sistemas cristalinos y el ángulo de extinción.-

Puesto que las direcciones cristalográficas consideradas obedecen a las leyes de simetría, siempre será posible encontrar la relación que existe entre los diferentes sistemas cristalinos y el ángulo de extinción.

- a) Presentan extinción recta:
10. Las secciones paralelas al eje óptico en los cristales uniáxicos.
 20. Las secciones paralelas a un eje binario en los cristales ortorrómbicos.
 30. Las secciones paralelas a las caras (100) en los cristales monoclinicos.
- b) Presentan extinción oblicua:
10. Las secciones oblicuas al eje óptico en los cristales uniáxicos y a los ejes binarios en los cristales ortorrómbicos. Naturalmente, las secciones perpendiculares al eje óptico o al plano de los ejes ópticos estarán siempre extinguidas.
 20. Todas las secciones longitudinales, a excepción de aquellas paralelas a (100) y todas las secciones oblicuas de los cristales monoclinicos.
 30. Los cristales del sistema triclinico presentan, en general, extinción oblicua.

Una dificultad se presenta en el empleo de los ángulos de extinción para la identificación de minerales, particularmente aquéllos que cristalizan en el sistema monoclinico. Como se ha explicado, la mayoría de las secciones muestran extinción oblicua en algún grado, pero sólo el valor máximo del ángulo es el que está más cercano al característico del mineral.

La hornblenda ilustra este caso: Una sección paralela a (100) muestra extinción recta. Las secciones perpendiculares a (100) presentan extinción simétrica respecto a las trazas rónicas del cruceo. Las demás secciones oblicuas presentan extinción oblicua. El ángulo

máximo de extinción de las secciones (010) es característico de cada especie. En el caso de la hornblenda, el ángulo que forma E con el eje c en esa sección varía entre 15 y 27 grados (Fig. XIII-3)

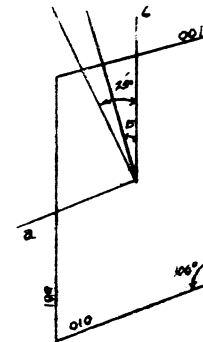


Fig. XIII-3

8. Signo de elongación.-

En ocasiones los cristales muestran un hábito prismático, o sea un alargamiento en una cierta dirección denominada de "elongación" la cual, en la mayoría de los cristales uniáxicos, es paralela al eje cristalográfico "c".

Cuando un mineral presenta un alargamiento en una dirección con respecto de la otra, dicha dirección se puede tomar como referencia para determinar su relación con las direcciones de vibración de los rayos rápido y lento.

Si la dirección de vibración del rayo lento n_l es exactamente o casi paralela a la dirección de elongación, se dice que la elongación es positiva. Si en cambio la vibración rápida n_r es la que presenta esas características, la elongación es "negativa".

La determinación del signo de elongación se efectúa, en consecuencia, buscando las direcciones de vibración n_r y n_l como ya se ha indicado.

9. Maclas (Twinning).-

Con frecuencia los cristales de una especie dada crecen en pedregales en las cuales el paralelismo de sus partes es incompleto; esto es, algunas de las partes correspondientes son paralelas y otras no. De los más cristales de la misma especie que forman un agregado que exhibe ese paralelismo parcial se denomina una macia o gemelo. Dichos cristales están unidos siguiendo una ley bien definida y no de una manera accidental.

Muy a menudo dos de esos cristales están unidos según una cara plana (plano de asociación) que tiene la misma notación para los dos gemelos y uno de ellos se encuentra desplazado con respecto al otro, en la situación que se obtendría si se girase éste un ángulo determinado alrededor de un eje denominado de "hemitropía". Esta rotación es supuesta y no implica ninguna consideración mecánica.

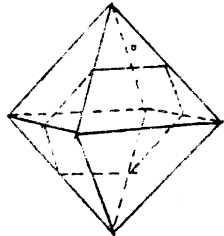
Los tipos de maclas más comunes en las rocas son:

a) Maclas por hemitropía normal, en las que se supone que uno de los individuos ha girado 180° alrededor del eje de hemitropía, el cual es normal a la cara de asociación (Fig. XIII-4a).

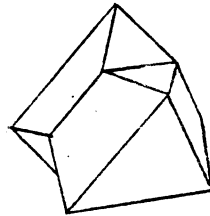
b) Maclas por hemitropía paralela, en las que se supone que uno de los cristales ha tenido un giro de 180° grados alrededor del eje de macla, el cual es paralelo a la cara de asociación (Fig. XIII-4b).

c) Maclas múltiples o complejas, formadas por la combinación de hemitropías normales y paralelas que pueden repetirse varias veces. Estas maclas, llamadas también "polisintéticas", son muy frecuentes en las plagioclasas (Fig. XIII-4c).

Cuando se observa con luz paralela y entre nicoles cruzados, una lámina delgada de un cristal maclado birrefringente, se nota que los diferentes individuos que lo componen presentan, en un momento dado, diferentes colores de interferencia y no se extinguen simultáneamente



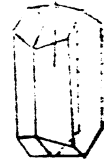
Octaedro simple de espinela. Se ve el rojo el plano de macla.



(a)

Octaedro de espinela en posición maclada. (Giro de 180° alrededor de un eje normal al plano de macla).

MACLA POR HEMITROPIA NORMAL



(b)

MACLA POR HEMITROPIA PARALELA

Fig. XIII-4

CAPITULO XIV

OBSERVACIONES CON NICOLES CRUZADOS Y LUZ CONVERGENTE.

1. Introducción. - Ya se explicó que el examen de una lámina cristalina entre nicoles cruzados, empleando luz convergente, permite observar simultáneamente los retardos de los rayos luminosos que la atraviesan bajo diferentes inclinaciones. Si la sección ha sido cortada de una manera conveniente, será siempre posible determinar si el cristal es uniaxial o biaxial.

Se coloca la lámina entre el condensador y el colector, lentillas que deben encontrarse lo más cerca posible en aquélla. Puesto que el fenómeno a observar se produce en el plano focal del colector será necesario retirar el ocular; para no realizar esta operación, se interpone la lente de Bertrand, existente en la mayoría de los microscopios polarizantes, cuya función consiste en trasladar la imagen al plano focal del ocular. La lente de Bertrand y el ocular constituyen así un microscopio anexo.

El principio que rige a las observaciones con luz convergente estando los nicoles cruzados puede resumirse como sigue:

Partiendo del centro del campo hacia la periferia, los rayos incidentes penetran en la lámina cada vez con más oblicuidad. A la salida de la lámina, la onda plana transporta dos vibraciones rectilíneas rectangulares que presentan un retardo " δ " creciente del centro hacia la periferia.

Todos los puntos correspondientes a un mismo retardo presentarán el mismo tinte. Tales puntos constituyen las curvas isocromáticas. El espaciamiento de estas es función del retardo: a mayor retardo, menor espaciamiento. El retardo, a su vez, es función del espesor y de la birrefringencia del mineral.

Cada vez que las vibraciones transportadas por la onda sean paralelas a los planos de vibración de los nicoles, se tendrá un punto oscuro. El conjunto de esos puntos constituye las isogiras o líneas oscuras.

Puesto que tanto las isogiras como las curvas isocromáticas dependen, además, de la forma y posición de la superficie de los índices en el cristal, se deduce que la forma de ambas será variable en los cristales uniaxiales y biaxiales y será asimismo función de la manera en que se haya realizado el corte de la sección delgada. Los diversos casos se discutirán en el Capítulo XV y, en consecuencia, se tratará a continuación únicamente la determinación del signo óptico de los minerales uniaxiales y biaxiales, de acuerdo con las diferentes secciones.

2. Determinación del signo óptico en los minerales uniaxiales.

a) Secciones normales al eje óptico. - Las isogiras constituyen una cruz negra cuyo centro coincide con el del campo del microscopio; las curvas isocromáticas son círculos concéntricos. Tanto la cruz como los círculos no sufren modificación alguna al girar la platina.

Para conocer el signo óptico de un mineral que presente tal figura es necesario: 1o. determinar el índice extraordinario n_e y 2o. determinar si n_e es mayor o menor que n_o .

1o. Determinación de n_e .- Se explicó ya anteriormente que n_e es siempre radial, como se muestra en la Fig. XIV-1.

2o. Determinación de la relación entre n_e y n_o .- Esto se realiza empleando un compensador colocado en la hendidura del microscopio, con su N_g a 45° de los planos de vibración de los nícos.

Si $n_e > n_o$ (cristal positivo), los retardos aumentan en el primero y tercer cuadrantes (cuadrantes positivos) y disminuyen en el segundo y cuarto cuadrantes (cuadrantes negativos). Si $n_e < n_o$ (cristal negativo), sucede lo contrario (Fig. XIV-2).

-Si no se observan curvas isocromáticas, el compensador empleado - si es sensible, la isogira toma este color, los cuatro cuadrantes se ven coloreados de tinte que derivan del tinte sensible, sea subiendo o bajando en la escala cromática; dos cuadrantes toman un color azul que pasa gradualmente al verde al alejarse del centro del campo y de las ramas de la cruz; los otros dos toman un color rojo que pasa gradualmente al naranja y al amarillo.

De lo anteriormente expuesto, se deduce la siguiente regla:

En los cuadrantes positivos y rojo en cuadrantes negativos: Cristal (+), rojo en cuadrantes positivos y azul en cuadrantes negativos: - Cristal (-) (Fig. XIV-3).

-Si se observan, en cambio, curvas isocromáticas se pueden emplear a uña de cuarzo o la lámina de mica $\frac{1}{4}$ de onda.

Con la uña de cuarzo: contracción de las curvas isocromáticas en cuadrantes positivos y dilatación consecuente en los cuadrantes negativos: Cristal (+). Dilatación en cuadrantes positivos y contracción en cuadrantes negativos: Cristal (-). (Fig. XIV-4).

Con la lámina de mica $\frac{1}{4} \lambda$: La cruz negra desaparece y es reemplazada por dos franjas negras colocadas una enfrente de la otra. Si esas franjas se encuentran en cuadrantes negativos, el cristal es positivo; si se localizan en cuadrantes positivos, el cristal es negativo. -- (Fig. XIV-5).

b. Secciones oblicuas al eje óptico.- Si el centro de la cruz negra coincide con el del campo del microscopio, pero se encuentra dentro de éste, es muy sencilla la aplicación de todas las reglas del caso anterior, como se muestra en la figura XIV-6.

Si el centro de la isogira se halla fuera del campo -- si el campo es grande, se observa atentamente la manera como se comportan las franjas al cruzar el campo, con lo que se deduce la dirección en que se encuentra el centro y el cuadrante que aparece en el campo. De lo contrario, se enseña los mismos criterios expuestos anteriormente.

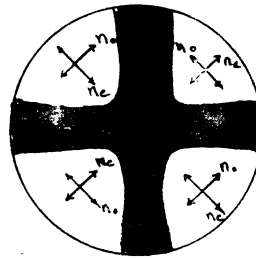


Fig. XIV-1

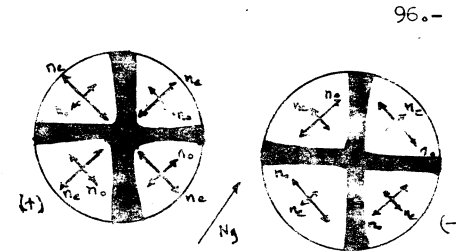


Fig. XIV-2.- La vibración de índice n_e , que es siempre radial, es paralela a la dirección N_g del compensador en el primer y tercer cuadrantes y perpendicular en el segundo y cuarto cuadrantes.

DETERMINACION DEL SIGNO OPTICO DE MINERALES UNIAIXICOS, EMPLEANDO DIVERSOS COMPENSADORES.

Lámina tinte sensible Cuña de Cuarzo Mica $\frac{1}{4} \lambda$

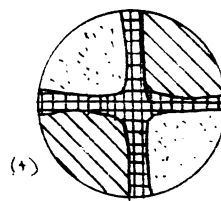


Fig. XIV-3

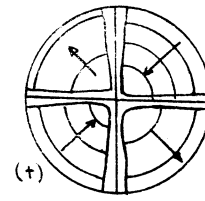


Fig. XIV-4

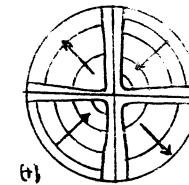
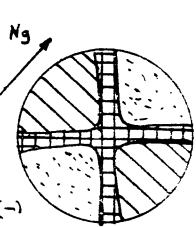
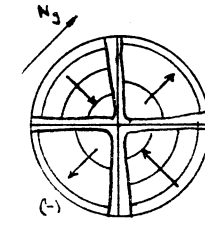


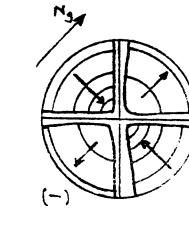
Fig. XIV-5



(-)



(-)



(-)

- Azul
- Rojo
- Tinte sensible

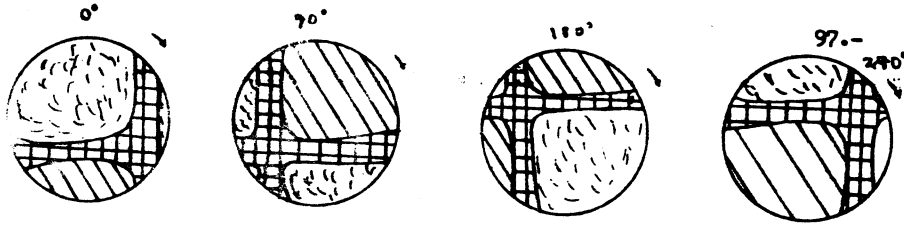





Fig. XIV-6.- Figura de interferencia descentrada de una sección de un cristal uniaxial positivo, pero cuya traza del eje óptico se encuentra dentro del campo del microscopio, al introducir el compensador tinte sensible y girar la platina 270° .

 Azul
  Rojo
  Tinte sensible

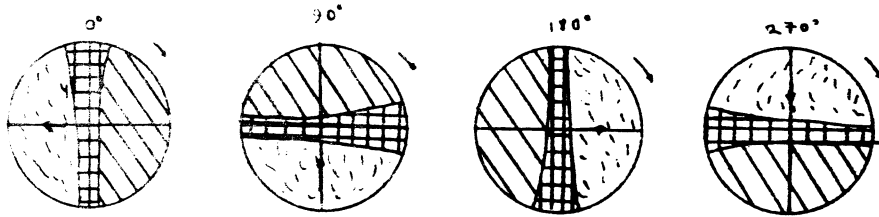


Fig. XIV-7.- Figura de interferencia de una sección de un cristal uniaxial positivo, en la que la traza del eje óptico se halla fuera del campo del microscopio, al introducir el compensador tinte sensible y girar la platina 270° .

c) Secciones paralelas al eje óptico.- La figura que se observa es una cruz difusa cuando el eje óptico es paralelo a uno de los planos de vibración de los nicóles. Al girar ligeramente la platina, la cruz se divide en dos segmentos difusos que salen rápidamente del campo. Estos segmentos dejan el campo en los cuadrantes que contienen la traza del eje óptico. Tal figura se denomina Figura Flash.

Puesto que en los cuadrantes que contienen la traza del eje óptico, los retardos disminuyen a partir del centro del campo, y puesto que la vibración extraordinaria coincide con la del eje óptico, es teóricamente sencillo determinar, mediante un compensador, si ésta es teóricamente positiva o rápida (cristal negativo). Sin embargo, en la práctica esto es bastante difícil, por lo que se recomienda evitar la determinación del signo óptico en este tipo de secciones.

3. Determinación del signo óptico en los minerales biaxiales.- Por analogía con los cristales uniaxiales, se dice que un cristal biaxial es positivo cuando su n_g es la bisectriz aguda del ángulo de los ejes ópticos y negativo cuando lo es su n_p . Para la determinación del signo se considerarán los casos siguientes:

a) Secciones normales o casi normales a la bisectriz aguda.- Las isogiras constituyen una cruz negra con brazos desiguales cuando los planos de vibración del cristal coinciden con los de los nicóles; a la más ligera rotación de la platina, la cruz se descompone en dos ramas de hipérbola que alcanzan su alejamiento máximo a 45° de los planos de vibración de los nicóles. Si el ángulo de los ejes ópticos no es muy grande, los polos S_1 y S_2 nunca dejarán el campo.

Las curvas isocromáticas son lemniscatas que admiten por centro los polos S_1 y S_2 de los ejes ópticos.

Para determinar el signo óptico de un cristal que presente tal figura, se requiere: 1o.) Conocer sus direcciones de vibración n_g o n_p y 2o.) Calcular cual de éstas es la bisectriz aguda.

En el centro del campo se encontrará la traza de la bisectriz aguda, la cual puede ser n_g o n_p . Si es n_g , entonces n_p coincidirá con la línea polar S_1S_2 y n_m le será perpendicular, tal como se vio en el Capítulo I. En el centro de las isogiras se encontrarán las trazas S_1 y S_2 de los ejes ópticos. Finalmente, en el sector cóncavo de las isogiras será n_g quien coincida con la traza del plano de los ejes ópticos y n_m le será perpendicular (Fig. XIV-8).

En consecuencia, las dos ramas de la hipérbola delimitan en el campo del microscopio dos sectores:

Un sector convexo, en donde n_p coincide con la traza del plano de los ejes ópticos, si el cristal es positivo.

Un sector cóncavo, en el cual n_g coincide con la traza del plano de los ejes ópticos, si el cristal es positivo.

Si el cristal es negativo, se observará el caso contrario es decir, n_g coincide con la traza del plano de los ejes ópticos en el sector convexo y n_p en el sector cóncavo. El índice n_m les será siempre perpen-

dicular. (Fig. XIV-9).

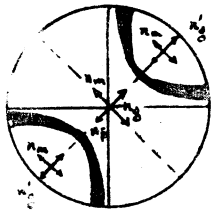


Fig. XIV-8 Cristal biáxico positivo

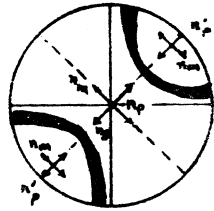


Fig. XIV-9 Cristal biáxico negativo

Por consiguiente, las reglas a seguir son las siguientes:

- Cuando no se observan curvas isocromáticas se emplea, naturalmente el compensador tinte sensible. Si el cristal es positivo; 1o. Cuando la línea polar es paralela a N_g del compensador, se producirá el rojo en el centro del campo y el azul en el interior de las ramas de la hipérbola -- (Fig. XIV-10a); 2o. Cuando la línea polar es perpendicular a N_g , se observará al azul en el centro del campo y al rojo en el interior de las ramas de la hipérbola (Fig. XIV-10c). Finalmente 3o. En el momento de formación de la cruz negra: azul en cuadrantes positivos y rojo en cuadrantes negativos (Fig. XIV-10b).

Los fenómenos exactamente contrarios se producirán, en los tres casos, si el cristal es negativo.

- Cuando se observan las curvas isocromáticas y se introduce el compensador adecuado, si el cristal es positivo se observará en cada uno de los tres casos anteriores, toda vez que se deba producir la coloración -- azul, una contracción de las curvas y cada vez en que se deba producir la coloración roja, una dilatación. (Fig. XIV-11).

b) Secciones normales o casi normales a la bisectriz obtusa. - Puesto que la bisectriz del ángulo obtuso de los ejes ópticos es n_p para los cristales positivos y n_g para los cristales negativos, los efectos producidos al introducir los compensadores para obtener el signo óptico serán inversos de aquellos obtenidos para la bisectriz aguda.

La ambigüedad puede desaparecer si, al girar la platina, los polos de los ejes ópticos permanecen en el campo del microscopio. En ese caso no hay duda de que se trata de una sección normal o casi normal a la bisectriz aguda. En cambio si, a partir de la formación de la cruz negra, las ramas de la hipérbola salen del campo rápidamente para una rotación muy ligera de la platina, la sección será normal o casi normal a la bisectriz obtusa o bien a la bisectriz aguda, si el ángulo de los ejes ópticos es muy grande.

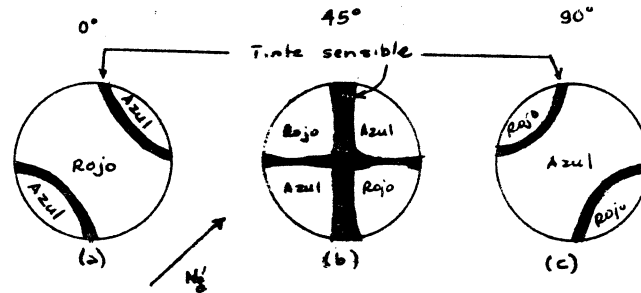


Fig. XIV-10.- Figuras de interferencia de un cristal biáxico positivo cortado perpendicularmente a la bisectriz aguda, al que se le ha superpuesto el compensador tinte sensible, y para una rotación de 90° de la platina del microscopio.

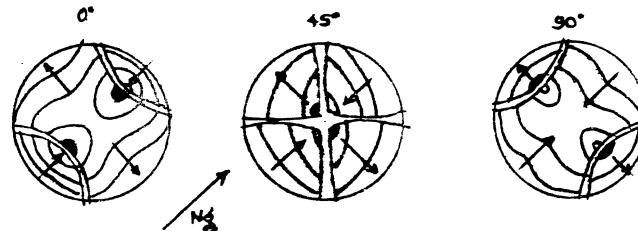


Fig. XIV-11.- Figuras de interferencia de un cristal biáxico positivo cortado perpendicularmente a la bisectriz aguda, al que se le ha superpuesto el compensador mica $1/4 \lambda$, y para una rotación de 90° de la platina del microscopio.

En este último caso, por consiguiente, no es posible determinar con seguridad de que bisectriz se trata; para la obtención del signo será necesario comparar varias secciones del mineral para así llegar a una conclusión correcta.

c) Secciones normales a un eje óptico. - En este tipo de secciones las curvas isocromáticas son aproximadamente circulares y las isogiras consisten en una sola rama de hipérbola, cuya curvatura dependerá de la orientación de la sección con respecto a los nicóles y de la magnitud del ángulo de los ejes ópticos.

Cuando la traza del plano de los ejes ópticos es paralela al plano de vibración de los nicóles, la isogira adopta la forma de una lente biconcava que no sufrirá cambio alguno al girar la platina si el $2V = 90^\circ$; en caso contrario, la figura de interferencia dará lugar a la rama de hipérbola mencionada, cuyo lado convexo indicará la dirección de la bisectriz aguda.

Si no se observan curvas isocromáticas y si el color de polarización producido por el compensador tinte sensible, sube en la escala de Newton (azul) del lado cóncavo de la curva, cuando la traza del plano de los ejes ópticos tiene una dirección N_1-S_1 (Fig. XIV-12) el mineral será positivo; en caso contrario, el mineral será negativo. Cuando la traza del plano de los ejes ópticos tiene una dirección N_2-S_2 , y si el mineral es positivo, se observará el rojo en el lado cóncavo de la curva.

En el caso de que se observen las curvas isocromáticas, al introducir la cuña de cuarzo o la placa de mica, si el cristal es positivo se obtendrán contracciones en los lugares donde se observaba el azul (Fig. XIV-13). En caso contrario el cristal será negativo.

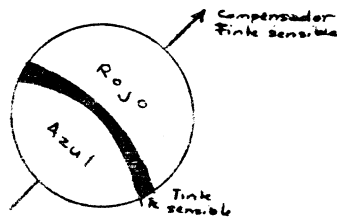


Fig. XIV-12

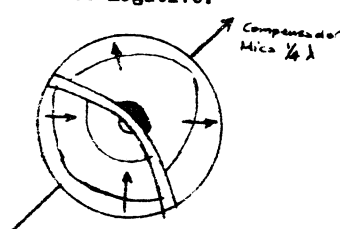


Fig. XIV-13

d) Secciones oblicuas cualesquiera. - Los fenómenos son difícilmente interpretables y toda hipótesis sobre el signo es aleatoria.

4.- Medición del ángulo agudo entre los ejes ópticos ($2V$). - La medición del $2V$ se realiza sin dificultad empleando un dispositivo especial, la platina universal de Fedoroff, que se fija sobre la platina del microscopio polarizante y permite orientar una sección delgada de un mineral en todas las direcciones posibles y, especialmente, en la perpendicular a la bisectriz aguda.

Como la descripción y utilización de este aparato sería el tema de otra obra y puesto que para la determinación de la mayoría de los minerales petrográficos comunes no es necesario conocer con precisión el valor de $2V$, se utilizarán métodos que nos darán una idea aproximada de dicha magnitud empleando únicamente el microscopio polarizante.

a) Secciones perpendiculares a la bisectriz aguda. - Puesto que en este tipo de secciones, el alejamiento máximo de las ramas de hipérbola es función del $2V$, se puede obtener una excelente estimación de éste midiendo la distancia entre ambas cuando el plano de los ejes ópticos está a 45° de los planos de vibración de los nicóles. Para esto, es necesario calibrar el campo del microscopio con minerales patrones, cuyo $2V$ sea conocido, cortados normalmente a la bisectriz aguda y utilizar siempre los mismos elementos ópticos para observar el fenómeno. Este método es válido únicamente para minerales cuyo $2V$ esté comprendido entre 0° y 40° , aproximadamente, como el de las micas, la pitecnita y el sanidino. (Fig. XIV-14).

b) Secciones perpendiculares a un eje óptico. - Puesto que la curvatura de la rama de hipérbola de este tipo de secciones es función principalmente del $2V$, Wright (1911) ha mostrado que es posible calcular éste a partir de la curvatura, si se coloca tal sección a 45° de los planos de vibración de los nicóles.

Mediante este método es necesario únicamente comparar la curvatura observada con las curvaturas patrones de la figura XIV-15 para un cristal con índice n_x cercano a 1.60.

La estimación será correcta si el mineral estudiado tiene un índice n_x semejante; pero esta estimación será aun válida si n_x es diferente. En este último caso la precisión será muy débil, por supuesto, pero se sabrá si el $2V$ es pequeño, mediano o grande.

5. Dispersión de los ejes ópticos. - La dispersión es el fenómeno que consiste en la modificación de los caracteres ópticos de un mineral, en función de la longitud de onda utilizada para su estudio. Efectivamente, para cada λ existe un elipsoide con sus índices de refracción características.

En Mineralogía Óptica es interesante estudiar la dispersión de los ejes ópticos en los cristales biáxicos pues puede ser un factor determinante en su identificación.

Cuando se observa la figura de interferencia de un cristal biáxico se ha visto que el vértice de cada rama de hipérbola representa el polo de un eje óptico; ahora bien, a cada longitud de onda corresponde un eje óptico ligeramente diferente.

El polo del eje óptico para el violeta será un punto en donde este color estará absorbido y el color resultante será el rojo. Análogamente, el polo del eje óptico para el rojo será un punto azul violáceo. De esta manera se observarán en los bordes de las ramas de la hipérbola franjas rojas o azules que indican el sentido de la dispersión. A mayor perceptibilidad de las franjas, mayor será la dispersión.

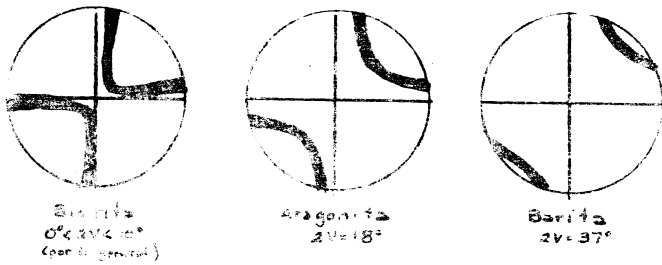


Fig. XIV-14.- Angulo 2V de algunos minerales patrones cortados normalmente a la bisectriz aguda y colocados a 45° de los planos de vibración de los nicóles.

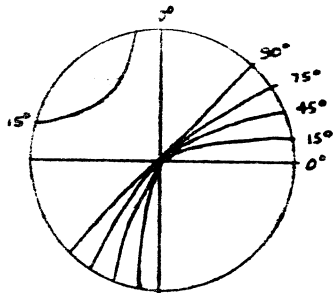


Fig. XIV-15.- Curvaturas y tróncos de las isócronas por un cristal biaxial de índice $n_m = 1.00$, cortado perpendicularmente a un eje óptico.

La dispersión de los ejes ópticos se expresa mediante una fórmula que indica cuando el 2V para el rojo es mayor o menor que para el violeta. En el primer caso, la fórmula de dispersión será $r > v$ y en el segundo $r < v$.

Existen varios tipos de dispersión, pero la más frecuente es la dispersión ortorrómbica, presentada por los minerales que cristalizan en ese sistema, así como muchos cristales monoclinicos y triclinicos que en la práctica se comportan como pseudo-ortorrómbicos.

A continuación se describirá únicamente la dispersión ortorrómbica observada en cristales incoloros o ligeramente coloreados, ya que la dispersión en los cristales con fuerte absorción es muy compleja y difícilmente determinable.

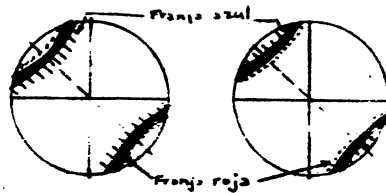
En la dispersión ortorrómbica, los índices n_g , n_m y n_p del elipsoide coinciden con los tres ejes cristalográficos, para todas las longitudes de onda; por consiguiente las bisectrices de los ejes ópticos permanecen fijas y la dispersión se produce en un plano de simetría.

Para determinar la dispersión ortorrómbica es preferible observar las dos ramas de hipérbola en el campo del microscopio, por lo que el método es válido sobre todo para un mineral con 2V pequeño; si se observa solamente una rama de hipérbola, será necesario efectuar varias mediciones para obtener resultados correctos.

Si al orientar el trazo del plano de los ejes ópticos a 45° de las trazas de los planos de vibración de los nicóles se observa una franja roja en el sector cóncavo y una franja azul en el sector convexo de las ramas de la hipérbola, entonces $r < v$ (Fig. XIV-16a). En caso contrario $r > v$ (Fig. XIV-16b).

Se pueden observar los fenómenos con mayor nitidez interponiendo en el trayecto de los rayos luminosos un vidrio rojo y luego un vidrio violeta. Si las ramas de hipérbola se encuentran más separadas para la luz roja que para la luz violeta, entonces $r > v$ (Fig. XIV-17).

En el sistema ortorrómbico, las franjas son simétricas con respecto al plano de los ejes ópticos, al plano perpendicular a éste y al centro.



(a) $r < v$ (b) $r > v$

Fig XIV-16

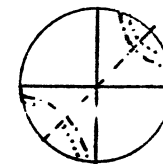


Fig XIV-17
 - - - - - Hiperbolas en luz roja
 - - - - - Hiperbolas en luz violeta
 $r > v$