

CRISTALOFÍSICA

TEMA 13.0

PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES TRANSPARENTES

Estudio sistemático con el microscopio polarizante de transmisión

ÍNDICE

Disposición ortoscópica del microscopio

13.1 Observaciones con luz polarizada plana.

16.2 Observaciones con luz polarizada y
analizada

Disposición conoscópica del microscopio

13.3 Figuras de interferencia

13.4 Dispersión

Celia Marcos Pascual

13.1 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES

Estudio sistemático con el microscopio polarizante de transmisión

Disposición ortoscópica del microscopio

Observaciones con luz polarizada plana

Requerimientos

- Objetivos de bajo aumento (2,5x) o de aumento medio (10x)
- Las lentes condensadoras superiores deben estar bajadas
- El diafragma iris abierto

Color

El color es la respuesta del ojo al rango visible (aproximadamente desde 350 nm hasta 700 nm) del espectro electromagnético.

Cuando la luz visible interacciona con un cristal o mineral puede ser transmitida, reflejada, refractada, dispersada o absorbida. Si ninguna componente (longitud de onda) de la luz sufre absorción por el cristal o mineral, éste la transmite y como consecuencia el cristal o mineral es incoloro. Cuando determinadas componentes de la luz blanca son absorbidas por el cristal o mineral, éste es coloreado y su color resulta de la combinación de las longitudes de onda de la luz blanca que no han sido absorbidas.

Una de las causas principales del color de los minerales es la *absorción selectiva*. Dicha absorción implica una transición electrónica de un electrón desde el estado fundamental al estado excitado (de energía más elevada). Cuando la energía necesaria para que el electrón transite, la absorbida, se encuentre dentro del rango de la luz visible, es eliminada de la luz incidente y como consecuencia la que observa el ojo humano es la combinación de las longitudes de onda transmitidas por el cristal o mineral.

Las transiciones electrónicas que más condicionan el color son las que afectan a los elementos de la primera serie de transición, también algunas tierras raras: neodimio y praseodimio de lantánidos y uranio de actínidos. Estos elementos se denominan cromóforos.

En la Tabla 13.1 se muestran los cromóforos causa de color en algunos minerales.

MINERAL	COLOR	CROMÓFORO
Granate almandino	rojo	Fe^{2+}
Esmeralda (berilo)	verde	Cr^{3+} y/o V^{3+} en coordinación octaédrica
Crisoberilo	amarillo	Fe^{3+} en coordinación octaédrica
Circón	varios	U^{4+}
Apatito	verde, amarillo	tierras raras (neodimio, praseodimio)
Corindón (rubí)	rojo	Cr^{3+} en coordinación octaédrica
Corindón (zafiro)	azul	Fe^{2+} y Ti^{4+} en coordinación octaédrica
Sinhalita	parda	Fe^{2+}
Olivino	verde	Fe^{2+} en coordinación octaédrica
Espinela sintética	azul	Co^{2+}

Tabla 13.1.- Cromóforos causa de color en algunos minerales.

La absorción puede producirse por transiciones de campo cristalino, de transferencia de carga o presencia de centros de color.

Hay que tener en cuenta que el color de un cristal o mineral con el microscopio se suele observar con luz polarizada, pudiendo variar ligeramente respecto a su observación con luz natural (luz no polarizada).

Ejemplos: Fluorita y calcita son incoloros, clorita es verde y augita es parda (Figura 13.1).

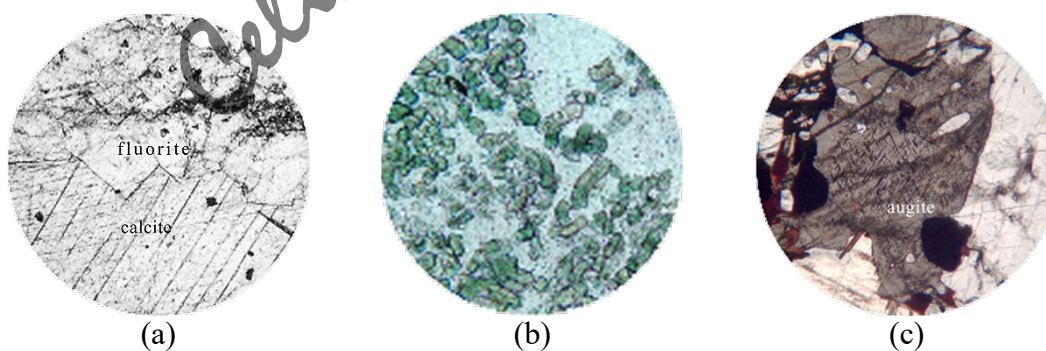


Figura 13.1.- Color en fluorita y calcita (a), clorita (b) y augita (c)

Pleocroísmo

Es el cambio de color al girar el cristal.

Es una propiedad que sólo la pueden presentar los cristales anisótrpos y coloreados, pero no tienen porqué presentarla todos.

Se debe a una desigual absorción de la luz (absorción selectiva) por los cristales coloreados en diferentes orientaciones, por lo que si es grande puede observarse a simple vista, aunque se aprecia mejor con un polarizador

Ejemplo: La cordierita es un silicato que cristaliza en el sistema rómbico y presenta tres colores extremos (amarillo violáceo, violeta más claro y violeta azulado oscuro) que pueden observarse en la Figura 13.2 a simple vista o con un polarizador.

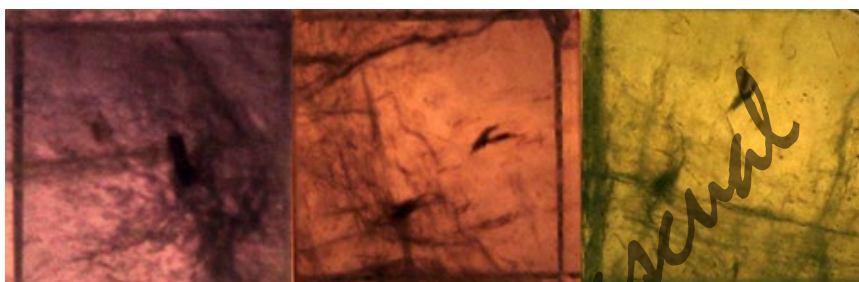


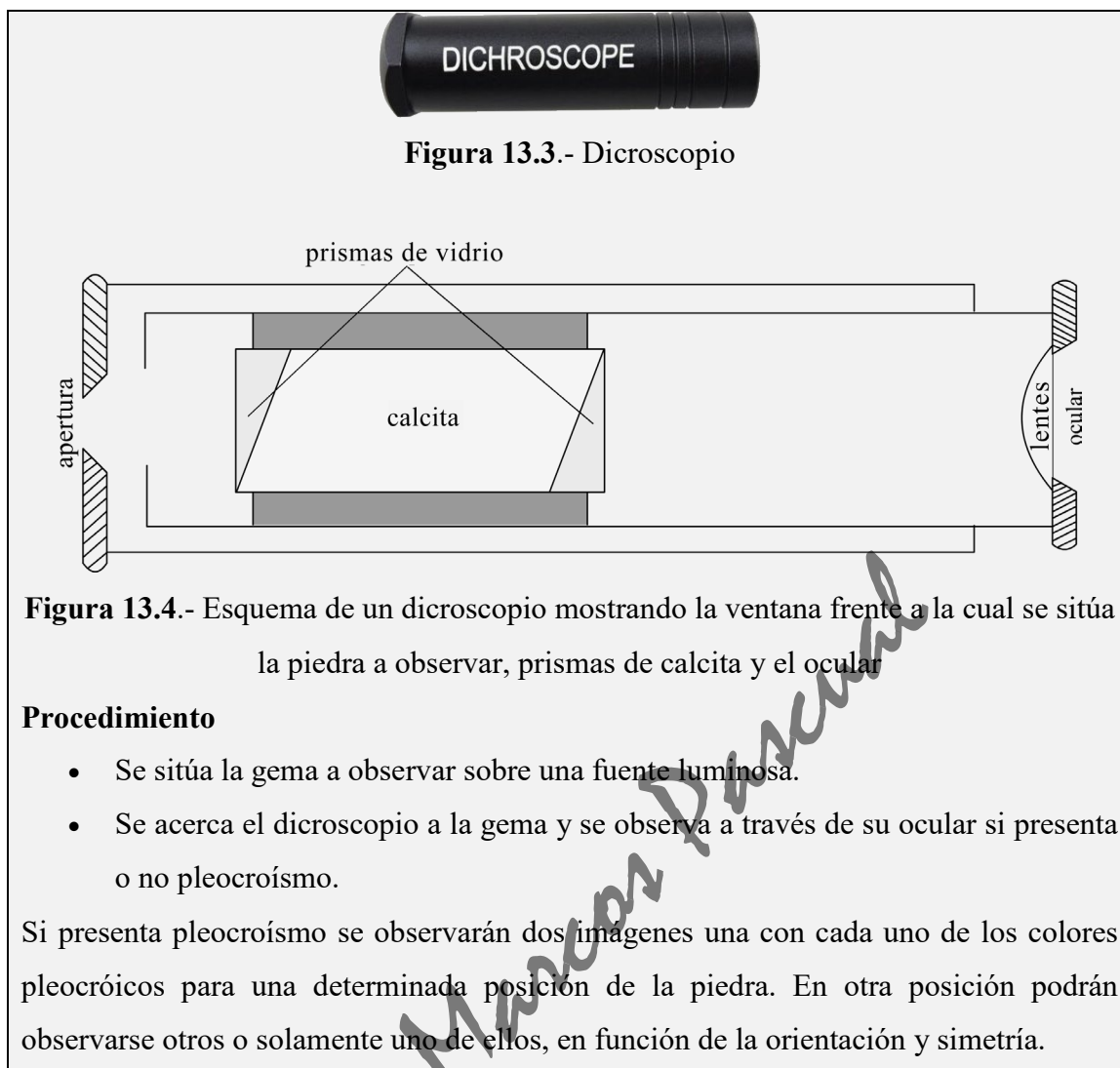
Figura 13.2.- Los tres colores extremos que pueden observarse en la cordierita según la orientación

También pueden observarse simultáneamente dos de los colores con un dicroscopio o artilugio compuesto de dos polarizadores, cada uno con su dirección de vibración perpendicular a la del otro.

La absorción puede variar en una manera similar a como lo hacen los índices de refracción.

EL DICROSCOPIO

- Instrumento que permite la observación simultánea de los colores pleocróicos de una gema.
- Consiste en un tubo metálico (Figura 13.3) con una abertura rectangular en un extremo y una lente en el otro. Un esquema del mismo puede observarse en la Figura 13.4.
- Dentro del tubo se encuentra una lámina de exfoliación de calcita de forma alargada que permite la observación de una doble imagen de la abertura rectangular a través del microscopio.



Pleocroísmo en cristales uniáxicos

Los cristales uniáxicos pueden presentar absorción selectiva en:

- una dirección, la del rayo extraordinario (ϵ) o la del rayo ordinario (ω)
- dos direcciones, la del rayo extraordinario y la del rayo ordinario (ver Figura 13.5).

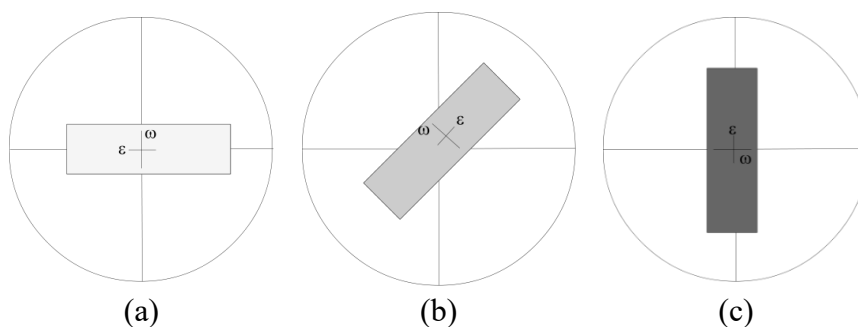


Figura 13.5.- Variación del pleocroísmo en un cristal uniáxico: (a) El color es claro porque es el color asociado al rayo ϵ es paralelo a la dirección de vibración del

polarizador. (b) El color es gris claro porque está en una dirección intermedia entre los rayos ω y ε es paralelo a la dirección de vibración del polarizador. (c) El color es gris oscuro porque es el color asociado al rayo ω paralelo a la dirección de vibración del polarizador.

Ambas direcciones pueden no presentar la misma cantidad de absorción selectiva.

En este caso, al girar el cristal transmite diferentes colores según que sea la dirección del rayo ε o la del rayo ω la que sea paralela a la dirección de vibración del polarizador.

Pleocroísmo en cristales biáxicos

Los cristales biáxicos pueden presentar diferente absorción de la luz en tres direcciones, según que la luz vibre paralela a:

X (bisectriz obtusa o aguda -bisectriz de los ejes ópticos- según el signo óptico. Con este eje se asocia el índice de refracción n_α),

Z (bisectriz aguda u obtusa según el signo óptico. Con este eje se asocia el índice de refracción n_γ)

Y (normal óptica -perpendicular al plano que contiene a los ejes ópticos. Con este eje se asocia el índice de refracción n_β).

Las direcciones de vibración correspondientes a los índices de refracción intermedios $n_{\alpha'}$, $n_{\beta'}$ y $n_{\gamma'}$ se asocian generalmente con absorciones, o lo que es lo mismo colores transmitidos intermedios entre los correspondientes a n_α y n_β o n_β y n_γ , respectivamente.

Procedimiento de observación con el microscopio polarizante de transmisión:

1. Situar el microscopio en disposición ortoscópica y luz polarizada y la lámina delgada sobre la platina.
 2. Observar el color del grano o sección mineral.
 3. Girar 45 y 90° el grano o sección mineral y observar si ha habido cambio en el color, es decir, si presenta pleocroísmo.
- Uno de los colores extremos de la sección lo observaremos cuando la dirección de vibración asociada a ese color sea paralela a la dirección de vibración del polarizador, girando 90° y situando la otra dirección de vibración de la sección cristalina paralela al polarizador se verá el otro color

extremo; en posiciones intermedias a éstas se verán colores intermedios a los extremos.

Hábito

El hábito es la forma más habitual de presentarse un cristal o mineral. Puede ser prismático, acicular, tabular, laminar, etc.

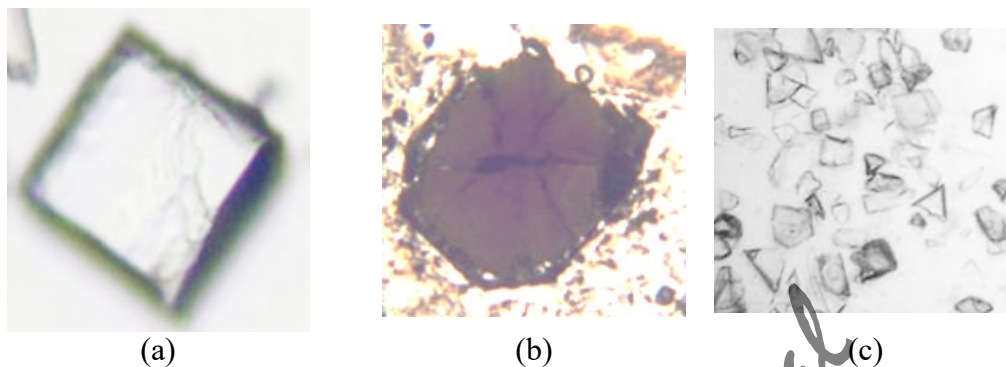


Figura 13.6.- Hábito romboédrico de calcita, octogonal de granate y triangular de fluorita

Exfoliación

La exfoliación es la rotura de un cristal o mineral por determinados planos cristalinos.

Se acostumbra a denominarla por los índices de Miller del plano de exfoliación, así, la exfoliación octaédrica es la rotura según planos (111), la exfoliación romboédrica, etc.

Las marcas que dejan estos planos de exfoliación cuando se corta una sección mineral perpendicular a ellos se denominan trazas de exfoliación. Cuando sólo hay un conjunto de trazas de exfoliación paralelas se dice que forman un sistema de exfoliación, mientras que cuando hay dos conjuntos de trazas de exfoliación que intersectan se dice que forman dos sistemas de exfoliación.

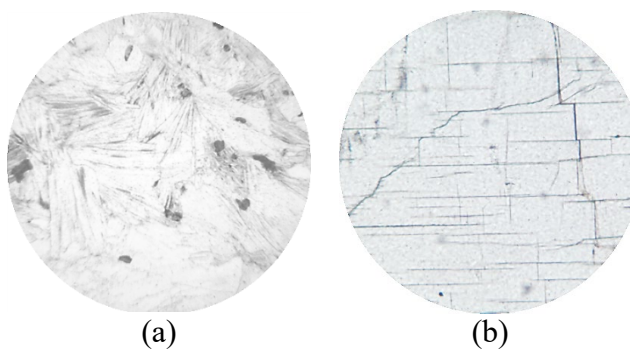


Figura 13.7.- Exfoliación: (a) Un sistema de exfoliación en la moscovita; (b) dos sistemas de exfoliación en la plagioclasa.

Ángulo de exfoliación

El ángulo de exfoliación es el ángulo que forman dos planos de exfoliación que se cortan.

En el caso de las secciones que muestran dos sistemas de exfoliación se puede medir el ángulo entre ellos, ángulo de exfoliación, el cual puede ser útil para distinguir un mineral de otro.

El procedimiento consiste en:

1. Situar el microscopio en disposición ortoscópica y luz polarizada y la lámina delgada sobre la platina.
2. Situar la traza de un plano de exfoliación de un grano o sección mineral enfocado coincidiendo con uno de los hilos del retículo, N-S o E-O, y anotar la posición de la platina.
3. Girar grano o sección mineral hasta que la otra traza de exfoliación coincida con el hilo del retículo seleccionado en el apartado 2º) y anotar la posición de la platina.
4. Restar los valores anotados en los apartados 2º) y 3º) para obtener el ángulo de extinción.

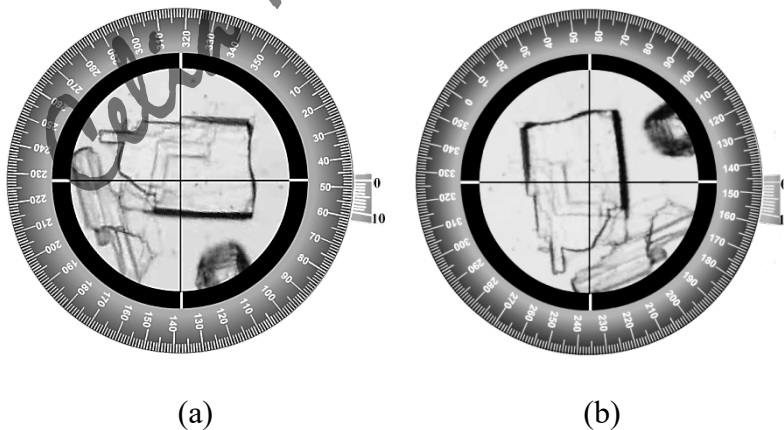


Figura 13.8.- Medida del ángulo de exfoliación: (a) Traza del plano de exfoliación de un grano mineral paralelo al hilo reticular E-O y la posición de la platina es 48° (b) La otra traza del plano de exfoliación coincidiendo con el hilo reticular E-O y la posición de la platina es de 146°. La diferencia entre las dos posiciones proporciona el ángulo de exfoliación, que en este caso es 98°.

Relieve

Puede decirse que es el contorno del cristal o mineral. Se expresa en función de su menor o mayor pronunciación como relieve bajo, moderado, alto o muy alto. Es función del índice de refracción ya que el relieve manifiesta la diferencia entre los índices de refracción del cristal o mineral y el medio en el que se encuentra. A mayor diferencia entre los índices de refracción, mayor relieve; mientras que cuanto menor es la diferencia, menor es el relieve. En la Tabla 16.2 se puede observar el relieve de algunos minerales en función de su índice de refracción.

relieve	índice de refracción	ejemplo
bajo	1.50 a 1.58	yeso (1.52 - 1.53)
moderado	1.58 - 1.67	calcita (1.658 - 1.486)
alto	1.67 - 1.76	corindón (1.76 - 1.77)
muy alto	> 1.76	circón (1.90 - 2.00)

Tabla 13.2.- Relieve de algunos minerales en función de su índice de refracción

En cristales o minerales anisótropos con una birrefringencia pronunciada, como los carbonatos, es fácil observar cambio de relieve al girar el cristal. Dicho relieve será más pronunciado cuando la dirección del cristal o mineral con la que está asociada el índice de refracción que muestra la mayor diferencia con el índice de refracción del medio que le rodea coincide con la dirección de vibración del polarizador (Figura 13.9 (a)). Cuando la dirección situada a 90° respecto de la anterior coincide con la dirección de vibración del polarizador, el relieve será menos pronunciado porque la diferencia entre el índice de refracción asociado a dicha dirección y el del medio que rodea al cristal o mineral es menor (Figura 13.9 (b)).

- El cambio de relieve indica anisotropía.

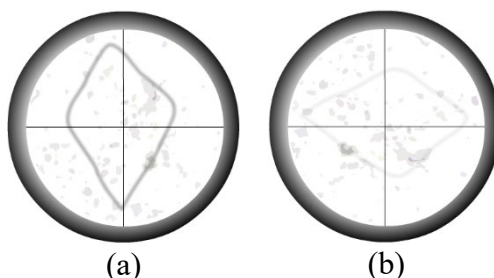


Figura 13.9.- Relieve en calcita: (a) Relieve muy pronunciado, la diagonal corta que coincide con el índice de refracción más bajo, es paralela a la dirección de vibración del

polarizador. (b) Relieve bajo, la diagonal larga que coincide con el índice de refracción más alto, es paralela a la dirección de vibración del polarizador.

Test de la línea de Becke

Es una prueba que permite conocer si el índice de refracción del cristal o mineral que se observa es mayor o menor que el bálsamo de Canadá ($n = 1.54$) o que otro cristal o mineral diferente que esté junto a él.

Para observar el test hay que utilizar:

- Microscopio en disposición ortoscópica
- Diafragma iris a medio cerrar
- Lentes condensadoras superiores retiradas

Procedimiento

- Se sitúa el microscopio en disposición ortoscópica y luz polarizada y la lámina delgada sobre la platina.
- Se sitúa el grano o sección mineral enfocado con una dirección cristalográfica u óptica que se pueda identificar coincidiendo con la dirección de vibración del polarizador (E-O).
- Se desenfoca ligeramente el grano o sección mineral.
- Si el desenfoque se lleva a cabo aumentando la distancia entre objetivo y situado sobre la platina la línea de Becke (línea brillante) se introducirá en el medio de mayor índice de refracción.

Ejemplo: La fluorita tiene un índice de refracción de 1,43, inferior al 1,54 del bálsamo de Canadá (resina utilizada para pegar el mineral o la roca y el cubreobjetos al vidrio), y al desenfocar, la línea brillante de Becke queda fuera del mineral (Figura 13.10).

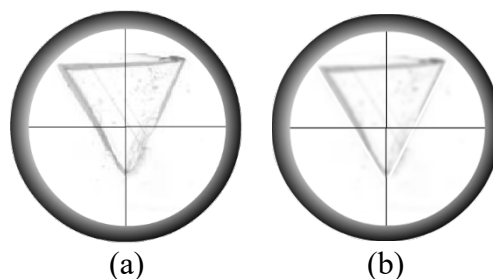


Figura 13.10.- Fluorita: (a) Fluorita enfocada en sección delgada; (b) fluorita desenfocada y con la línea brillante de Becke fuera del mineral.

13.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES

Estudio sistemático con el microscopio polarizante de transmisión

Disposición ortoscópica del microscopio

Observaciones con luz polarizada y analizada

Requerimientos

- Objetivos de bajo aumento (2,5x) o de aumento medio (10x)
- Las lentes condensadoras superiores deben estar bajadas
- El diafragma iris abierto
- Analizador insertado y girado 90° respecto del polarizador

Retardo

Es la diferencia de trayectoria entre la onda rápida y la lenta al salir de un material en estado cristalino anisótropo, como un cristal o mineral anisótropo (ver Figura 13.11).

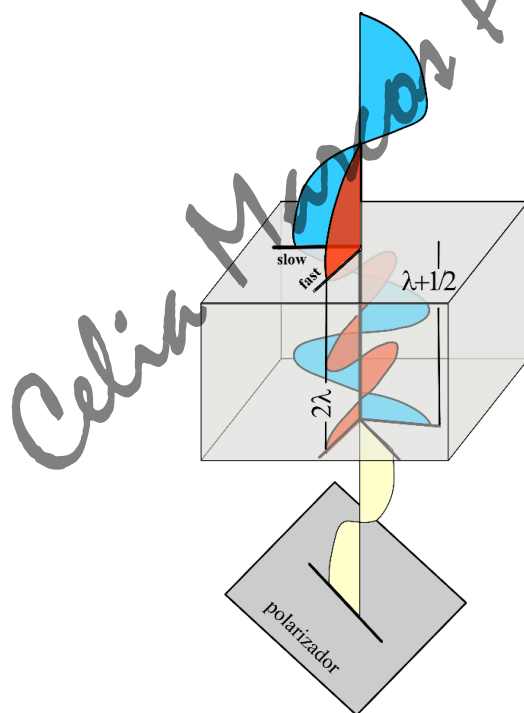


Figura 13.11.- Esquema mostrando la diferencia de trayectoria de las ondas lenta y rápida en el cristal.

Se simboliza por Δ y viene expresado por

$$\Delta = c(T_N - T_n)$$

Ecuación 13.1

donde:

c es la velocidad de la luz en el vacío

T_N es el tiempo que requiere la onda lenta para atravesar el cristal o mineral

T_n es el tiempo que requiere la onda rápida para atravesar el cristal o mineral

Considerando:

La relación:

$$\text{velocidad} = \text{espacio/tiempo}$$

Ecuación 13.2

El concepto de índice de refracción:

$$n = c/v$$

Ecuación 13.3

Sustituyendo en la expresión 13.1 del retardo se llega a que:

$$\Delta = e(N - n)$$

Ecuación 13.4

donde:

e es el espesor

N es el índice de refracción mayor asociado a la onda lenta

n es el índice de refracción menor asociado a la onda rápida

Se observa que el **retardo** depende de:

Espesor

Birrefringencia ($N - n$)

Colores de interferencia

Son los colores que se observan como consecuencia de la interferencia de las ondas cuando salen del cristal o mineral anisótropo.

- Las ondas son las que resultan de desdoblarse la luz cuando interacciona con un cristal o mineral anisótropo.
- Están polarizadas.

- La interferencia implica que la diferencia de trayectoria sea:

$$\frac{(2n + 1)\lambda}{2}$$

Ecuación 13.5

- La onda resultante vibra en un plano que es perpendicular al del polarizador y paralelo al del analizador y por lo tanto pasa luz a su través.
 - Las direcciones de vibración de la onda lenta y rápida de la sección mineral o cristalina no coinciden con las direcciones de vibración de los polarizadores.
 - El analizador transmite de diferente manera los distintos componentes de la luz blanca, es decir, los diversos colores
 - Dependen del retardo.
 - Un retardo dado produce un color de interferencia determinado.
 - Estos colores varían con la sección de un cristal o mineral anisótropo.
- Se debe a que:
- El retardo depende del espesor y de la birrefringencia. Así:
 - A igual espesor (30 mm) el retardo depende de la birrefringencia, que a su vez depende de la sección.

Escala de Newton

- Es el agrupamiento de los colores de interferencia.
- Se divide en órdenes: primero, segundo, tercero, cuarto y superiores.
- Cada orden agrupa a una serie de colores y cada color está asociado a un retardo o diferencia de trayectoria, y por lo tanto a una longitud de onda.

- Cuanto más alto es el orden del color de interferencia mayor es la birrefringencia
- Cada sección mostrará un color de interferencia, el cual depende de la birrefringencia.
- La sección que muestre el color de interferencia de orden más elevado será la más birrefringente o muy próxima a ella.
- En cristales o minerales biáxicos:
 - sección que se corresponde con la sección Z-X de la indicatriz biáxica.
- En cristales o minerales uniáxicos:

- $(h00)$, $(0k0)$, $(hk0)$

Birrefringencia	orden del color	descripción
0.00-0.018	primero	baja
0.018-0.036	segundo	moderada
0.036-0.055	tercer	alta
>0.055	cuarto y >	muy alta

Tabla 13.3.- Descripción de la birrefringencia y relación con el orden del color de interferencia

En la Figura 13.12 se muestra la Tabla de colores de Michel Lèvy normal y la de daltónicos. En abscisas está representado el retardo, es decir la diferencia de trayectoria entre los rayos en los que se ha desdoblado la luz al incidir sobre una superficie de un material en estado cristalino anisótropo, que a su vez se corresponde con un color de interferencia; el espesor del material se representa en ordenadas y la birrefringencia en las líneas que parten del origen del sistema. De esta forma se puede conocer de forma aproximada el retardo y por lo tanto el color de interferencia, espesor o birrefringencia del material conocidas dos de las características mencionadas.

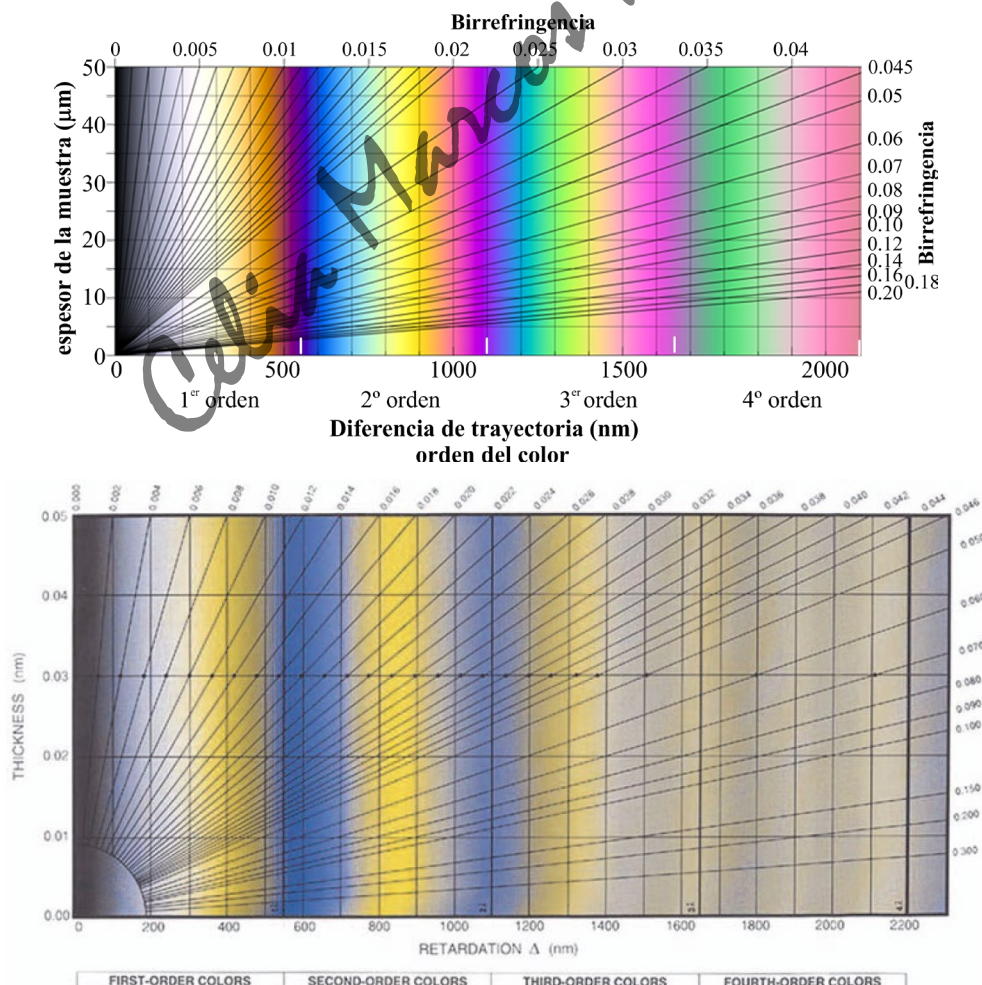


Figura 13.12.- Tabla de colores de Michel Lèvy normal (arriba) y para daltónicos (abajo)

Maclas

Una macla es la asociación de uno o más cristales o minerales con diferente orientación cristalográfica.

Una macla se reconoce fácilmente cuando se observa en el microscopio en disposición ortoscópica y polarizadores cruzados, debido a la diferente orientación cristalográfica de los individuos que la forman, pues en una determinada posición podrán mostrar colores de interferencia diferentes o unos estar en posición de extinción y otros no.

En la Figura 13.13 se pueden observar plagioclasas macladas

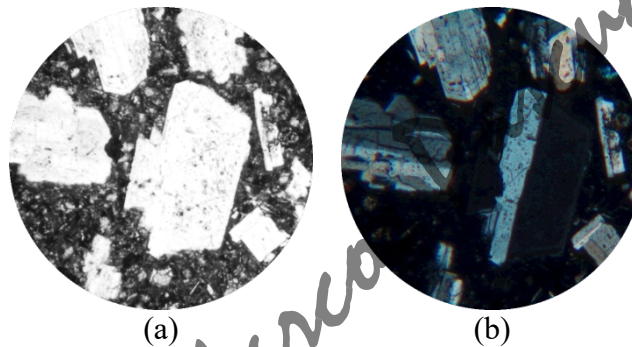


Figura 13.13.- Lámina delgada con plagioclasas: (a) con luz polarizada; (b) con polarizadores cruzados en la que se puede observar las maclas.

Zonado

Es la variación composicional dentro de un mineral. Muchas veces afecta al color y, entre polarizadores cruzados, se observa por cambios en la birrefringencia o en orientación de la extinción.

En la Figura 13.14 se puede observar turmalina con zonado



Figura 13.14.- Zonado en turmalina

Alteración

Aparece como un área de turbidez en los feldespatos, o como un reborde oscuro en los granos de olivino y en las fracturas.

Se debe a la reacción de algún elemento del mineral original con CO_2 o con agua que se encuentra en contacto con él, originando una nueva fase mineral.

Ejemplo: Olivino con borde oscuro de alteración.

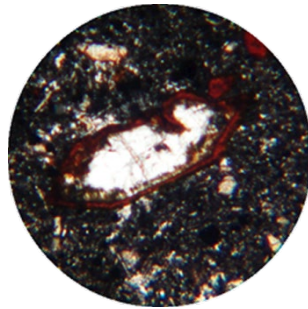


Figure 13.15. Olivino con borde oscuro de alteración

Inclusiones

Fases sólidas, líquidas o gaseosas atrapadas en el mineral hospedante.

Se pueden formar antes (protogenéticas), durante (singenéticas) o después (epigenéticas) que el mineral hospedante.

Algunas son características de determinados minerales.

Ejemplo: Apatito incluido en hornblenda (Figura 13.16)

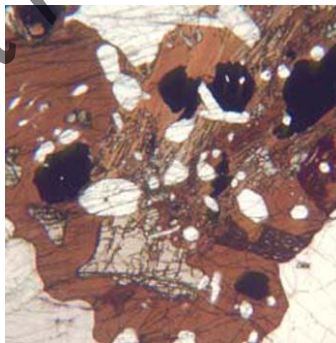


Figura 13.16.- Inclusiones de apatito incluido en hornblenda

Determinación de las direcciones de vibración

Es necesario considerar los conceptos de retardo y colores de interferencia y usar una lámina auxiliar.

Cuando una sección anisótropa se encuentra situada en la platina del microscopio en posición de claridad (a 45° de la extinción) y una lámina auxiliar está

insertada en el tubo del microscopio, pueden darse dos situaciones:

1. Adicción

Es la suma del retardo de la sección mineral o cristalina y el de la lámina auxiliar.

El color de interferencia de la sección cristalina o mineral sube de orden.

Ocurre cuando las direcciones de vibración de las ondas lenta y rápida de la sección mineral o cristalina coinciden con las de la lámina auxiliar (ver Figura 13.17).

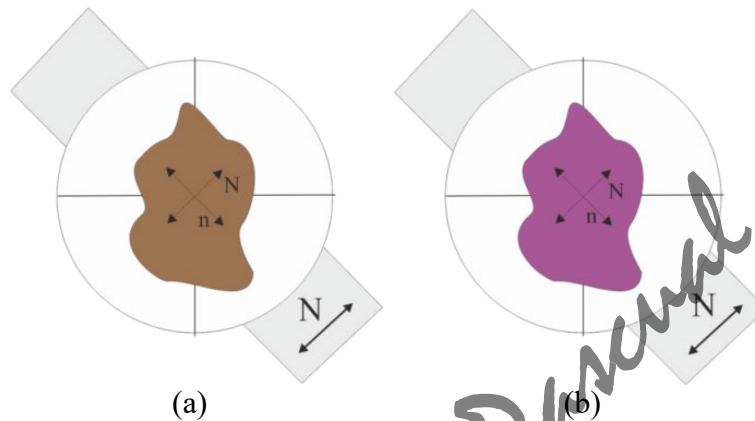


Figura 13.17.- Esquemas mostrando el concepto de la adicción: (a) Sin placa accesoria.
(b) Con placa accesoria

2. Sustracción

Es la resta del retardo de la sección mineral o cristalina y el de la lámina auxiliar.

El color de interferencia de la sección cristalina o mineral sube de orden.

Ocurre cuando las direcciones de vibración de las ondas lenta y rápida de la sección mineral o cristalina son perpendiculares a las de la lámina auxiliar (ver Figura 13.18).

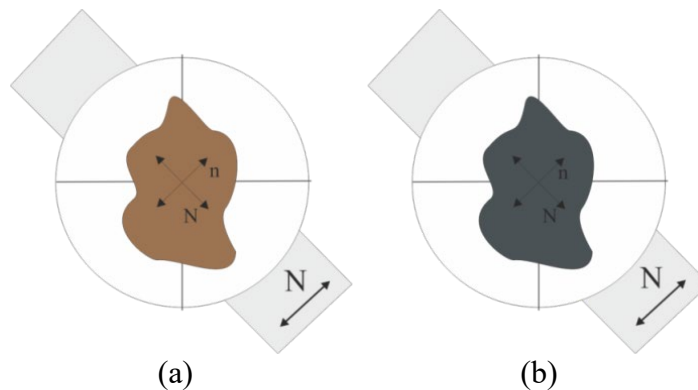


Figura 13.18.- Esquemas mostrando el concepto de la sustracción: (a) Sin placa accesoria. (b) Con placa accesoria.

Elongación

Es la relación entre la dirección larga de un grano o sección mineral alargado y la dirección de vibración con la que va asociada el índice de refracción mayor de ese grano.

Determinación de la elongación

Se requiere determinar las direcciones de vibración.

Se inserta la lámina auxiliar de yeso (530 nm) o de mica (147,3 nm) y se observan los colores de interferencia, los cuales pueden compararse con los de la tabla de colores.

Si los colores han aumentado de orden ha habido suma de retardos porque en ese caso los índices de refracción mayor y menor del grano o sección mineral coinciden respectivamente con los de la lámina auxiliar.

Si los colores han disminuido de orden ha habido resta de retardos porque en ese caso los índices de refracción mayor y menor del grano o sección mineral no coinciden respectivamente con los de la lámina auxiliar.

A 90° de la posición en la que se produce suma de retardos ahora se produce resta de retardos.

A 90° de la posición en la que se produce resta de retardos ahora se produce suma de retardos.

En el caso de la turmalina (ver Figura 13.19) se produce resta de retardos cuando la dirección larga de la sección es paralela a la dirección del índice de refracción mayor de la lámina auxiliar.

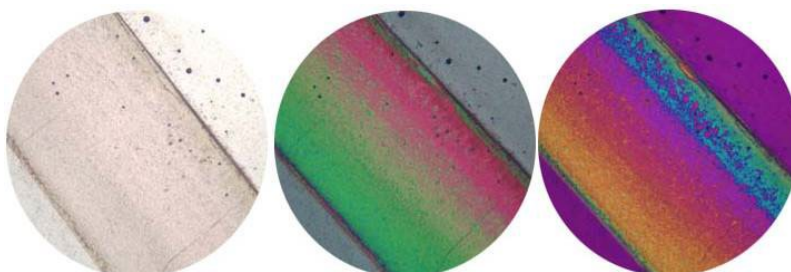


Figura 13.19.- Imágenes de una sección de turmalina paralela al eje óptico: izquierda, con luz polarizada; centro, con polarizadores cruzados; derecha con polarizadores

cruzados y lámina auxiliar de yeso en la que se puede apreciar resta de retardos (los colores de interferencia han disminuido de orden)

La elongación es *positiva* si el índice de refracción mayor coincide con la dirección larga del grano (*largo lento*).

La elongación es *negativa* si el índice de refracción menor coincide con la dirección larga del grano (*largo rápido*).

Extinción

Es la oscuridad que se observa como consecuencia de la interferencia constructiva de las ondas cuando salen del cristal o mineral anisótropo.

La diferencia de trayectoria entre las ondas después de salir del cristal es: $n\lambda$

Están en fase.

La onda resultante vibra en un plano que es paralelo al del polarizador y perpendicular al del analizador y por lo tanto no pasa luz a su través.

Las direcciones de vibración de la onda lenta y rápida de la sección mineral o cristalina coinciden con las direcciones de vibración de los polarizadores.

Una sección isótropa permanece extinguida en un giro completo de la platina.

En una sección anisótropa se observan 4 posiciones de extinción, a 90° una de otra y a 45° de la posición de claridad.

Tipos de extinción:

Recta o paralela

Cuando una dirección cristalográfica (traza de exfoliación o plano cristalino) coincide con una dirección óptica (dirección de vibración de la sección cristalina o mineral (ver Figura 13.20 (a))).

Se observa cuando la dirección cristalográfica de la sección mineral o cristalina que se encuentra en posición de extinción coincide con uno de los hilos del retículo, ya que éste marca la dirección de vibración de uno de los polarizadores.

La pueden presentar los cristales los cristales o minerales uniáxicos y los rómbicos

Simétrica

Similar a la anterior, pero en este caso la dirección cristalográfica biseca a otras dos direcciones cristalográficas (ver Figura 13.20 (b)).

La pueden presentar los cristales los cristales o minerales uniáxicos

Oblicua o inclinada

Cuando una dirección cristalográfica (traza de exfoliación o plano cristalino) no coincide con una dirección óptica (dirección de vibración de la sección cristalina o mineral (ver Figura 13.20 (c)). Este tipo de extinción la pueden presentar los cristales rómbicos, monoclinicos y triclinicos

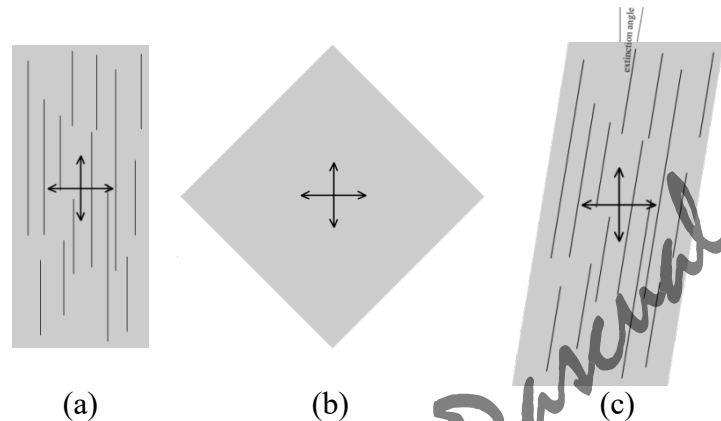


Figura 13.20.- Tipos de extinción: (a) recta, (b) simétrica y (c) oblicua o inclinada.

Ángulo de extinción

Es el ángulo entre una dirección de vibración de la sección mineral y una dirección cristalográfica (traza de cara cristalina o de exfoliación).

Determinación:

Se sitúa la sección mineral en posición de extinción y se anota los grados marcados en la platina del microscopio.

Posteriormente se sitúa la sección mineral con una dirección cristalográfica paralela a la dirección de vibración del polarizador o del analizador y se anota la posición en la platina (ver Figura 13.21).

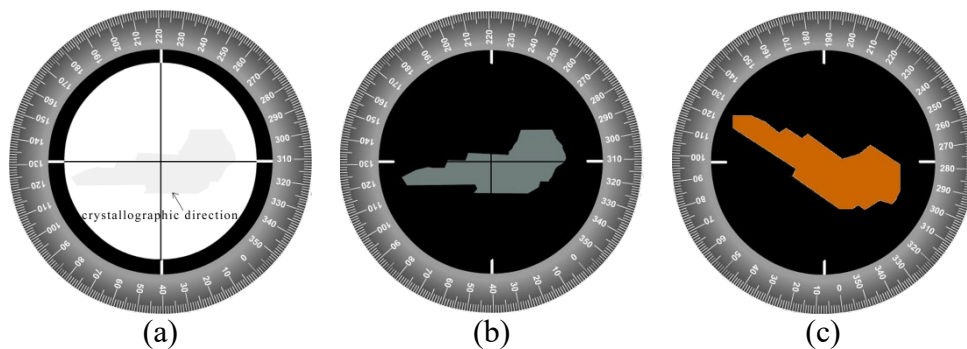


Figura 13.21.- (a) Sección mineral con dirección cristalográfica paralela al polarizador inferior E-O (posición platina en 311,25 °); (b) la misma sección mineral que (a) con polarizadores cruzados; (c) sección mineral colocada en la posición de extinción (275 °).

13.3 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MINERALES

Estudio sistemático con el microscopio polarizante de transmisión

Disposición conoscópica del microscopio

Figuras de interferencia. Signo óptico

Requerimientos

- Objetivos de aumentos grandes (40x)
- Las lentes condensadoras superiores deben estar subidas
- El diafragma iris abierto
- Analizador insertado y girado 90° respecto del polarizador
- Lentes de Bertrand insertadas

Figuras de interferencia

Es la figura que se forma en cristales o minerales anisótropos transparentes por interferencia de la luz.

En ella se puede distinguir (ver Figura 13.22):

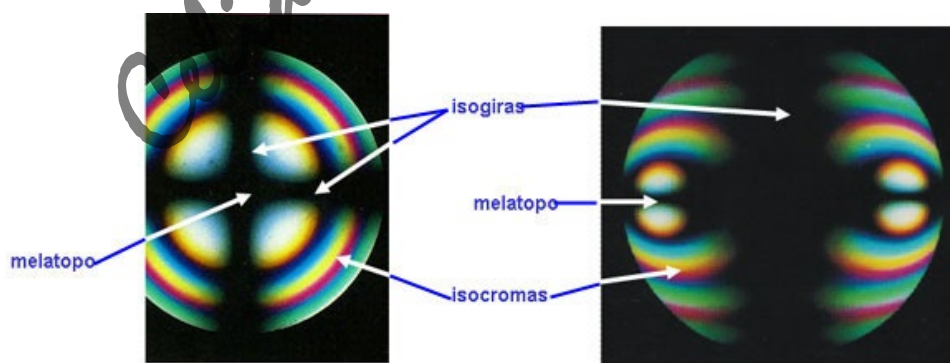


Figura 13.22.- Figuras de interferencia mostrando el o los melatopos, las isogiras y las isocromas. Izquierda: figura de interferencia uniáxica. Derecha: figura de interferencia biáxica

Melatopo(s):

Salida del eje óptico o de los ejes ópticos.

Isogiras:

Zonas extinguidas que se corresponden con zonas del cristal o mineral en las que las direcciones de vibración coinciden con las del polarizador y analizador.

Isocromas:

Zonas de igual color de interferencia (o retardo) que se corresponden con zonas del cristal o mineral en las que sus direcciones de vibración no coinciden con las del polarizador y analizador.

Cada sección de un cristal o mineral anisótropo produce una figura de interferencia de aspecto diferente.

Se observan cuando la luz que incide sobre el cristal o mineral es convergente, es decir, tiene diferentes ángulos de incidencia.

Cristales uniáxicos (tetragonal, hexagonal y romboédrico):**Figuras de eje óptico centrado**

La presentan las secciones perpendiculares al eje óptico (eje cristalográfico c. Son secciones con índices de Miller (001)) (ver Figura 13.23).

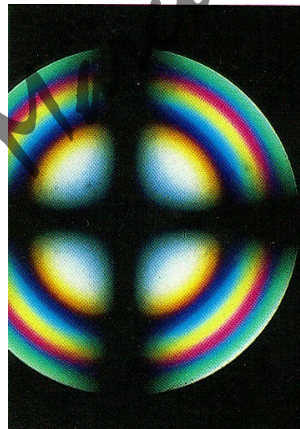


Figura 13.23.- Figura de interferencia uniáxica de eje óptico centrado

Figuras flash.

La presentan las secciones paralelas al eje óptico (eje cristalográfico c. Son secciones con índices de Miller (h00), (0k0) y (hk0)

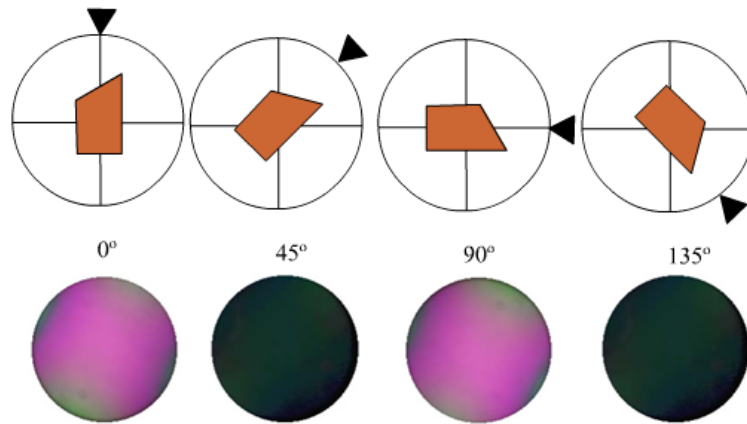


Figura 13.24.- Imágenes ortoscópicas (superior) y conosópicas (inferior) de una sección mineral uniáxica, con el eje óptico paralelo a la platina del microscopio, mostrando la figura de interferencia flash.

Figuras de eje óptico descentrado

La presentan las secciones que forman un ángulo diferente a 0° o 90° con el eje (eje cristalográfico c). Son secciones con índices de Miller (hkl).

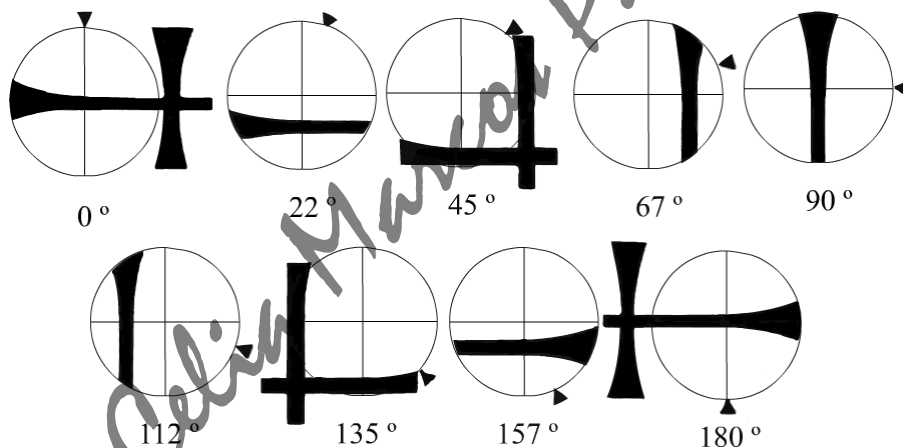


Figura 13.25.- Figura de interferencia de eje óptico descentrado en diferentes posiciones de giro de la platina del microscopio.

Cristales biáxicos (rómicos, monoclinicos y triclínicos)

Figuras de bisectriz aguda centrada

Se observa en secciones perpendiculares a la bisectriz aguda (eje Z si el cristal es (+) o eje X si el cristal es (-)) (ver Figura 13.26).

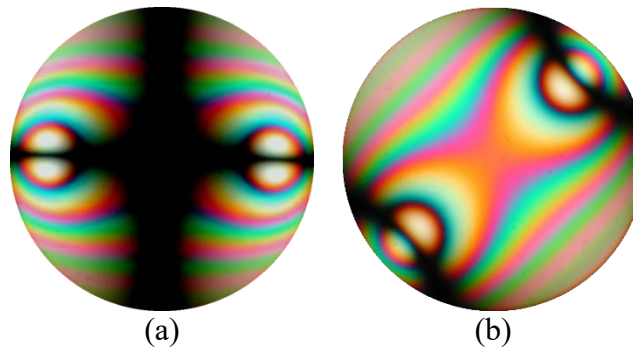


Figura 13.26.- Figura de interferencia bisectriz aguda centrada: (a) Posición de extinción. (b) Posición de extinción a 45° (de Olaf Medenbach con permiso)

Figuras de eje óptico centrado

Se observa en secciones que son perpendiculares a uno de los ejes ópticos del cristal.

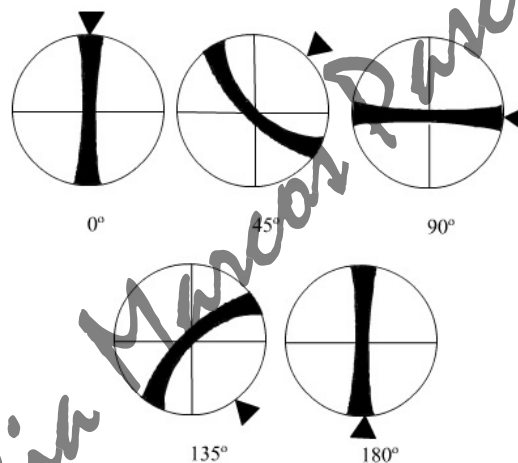


Figura 13.27.- Figura de interferencia biáxica de eje óptico centrado en distintas posiciones de giro

Figuras flash

Se observa en secciones perpendiculares a la normal óptica (eje Y perpendicular al plano óptico). No es fácil distinguirla de la uniáxica (Figura 13.24).

Aspectos diferentes de figuras de interferencia biáxicas

- En función del ángulo entre los ejes ópticos

En la Figura 13.28 se pueden observar figuras de interferencia biáxicas con ángulo pequeño entre los ejes ópticos observada con objetivos de diferente apertura numérica

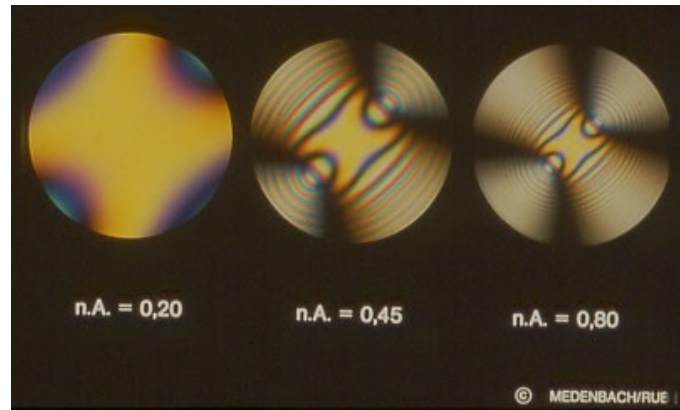


Figura 13.28.- Figuras de interferencia biáxica observada con objetivos de diferente apertura numérica

- En función del ángulo entre los ejes ópticos

En la Figura 13.29 se pueden observar figuras de interferencia biáxica de cristales con diferente ángulo $2V$

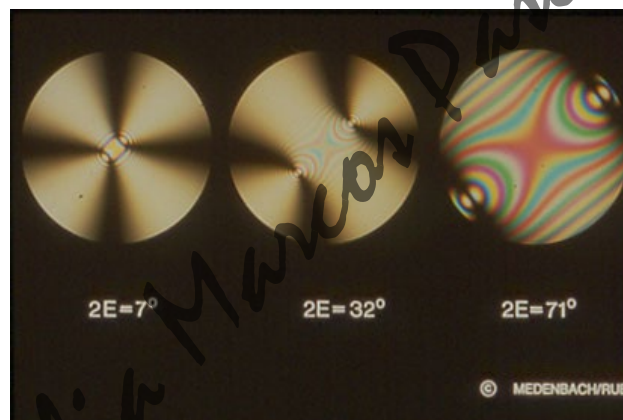


Figura 13.29.- figuras de interferencia biáxica de cristales con diferente ángulo $2V$

Formación de las figuras de interferencia

La forma de las isogiras y de las isocromas puede entenderse relacionando las direcciones de propagación de los rayos convergentes en el cristal y la indicatriz.

Para ello hay que tener en cuenta que:

En la indicatriz anisótropa cada sección representa a una del cristal en la que la luz se propaga perpendicularmente a ella.

Las componentes en las que se desdobra vibran perpendicularmente y se asocian a los semiejes de la correspondiente sección de la indicatriz.

En cada punto de la figura de interferencia incidirá un rayo convergente, perpendicular a una determinada sección de la indicatriz.

Considerando la indicatriz uniáxica como ejemplo, en cada sección los semiejes se asocian a las direcciones de los índices de refracción extremos.

También se puede considerar en dicha sección dos normales de onda con distinta oblicuidad, WN1 y WN2 (ver Figura 13.30):

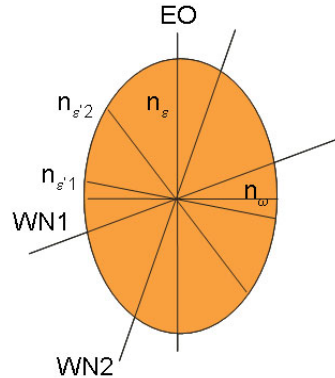


Figura 13.30.- Sección paralela al eje óptico mostrando las normales de onda, WN1 y WN2, con distinta oblicuidad.

Una normal de onda es la perpendicular a un frente de ondas (superficie que une puntos de ondas que están en fase).

En un cristal isótropo la normal de onda y la dirección de propagación coinciden.

En un cristal anisótropo no.

Cada normal es perpendicular a una sección de la indicatriz y tienen una dirección de vibración común, la del rayo ordinario.

Su índice de refracción asociado, n_{ω} , es perpendicular a la sección.

El otro índice de refracción, n_{ϵ} , yace en dicha sección.

Las secciones de la Figura 13.31 corresponden a las perpendiculares a las normales de onda WN1 y WN2.

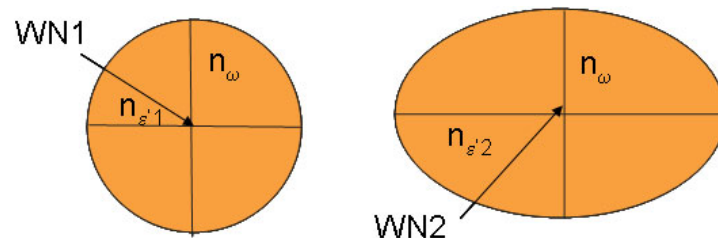


Figura 13.31.- Secciones perpendiculares a las normales de onda WN1 y WN2, mostrando los índices de refracción asociados

La birrefringencia es mayor en la figura de la derecha y por lo tanto el retardo también y el color de interferencia será de orden más elevado.

Cada rayo es perpendicular a una sección de la indicatriz (ver Figura 13.32).

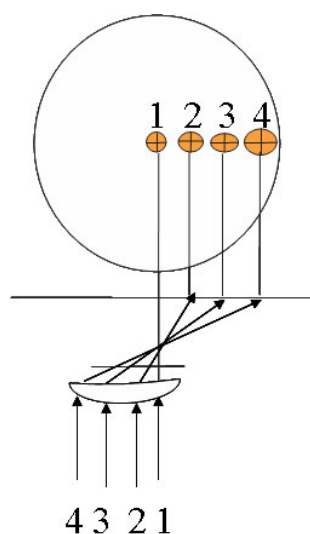


Figura 13.32.- Esquema mostrando los rayos (1, 2, 3, 4) procedentes de la fuente luminosa que inciden sobre la muestra de la platina del microscopio con diferente oblicuidad. Cada uno sería perpendicular a una sección de la indicatriz óptica (Figura adaptada de Stoiber, R.E. y Morse, S.A. (1994)¹).

La birrefringencia de cada sección es diferente, mayor a medida que se aleja del centro del campo de visión.

Las isogiras corresponderán a los puntos en los que las secciones tengan sus semiejes (asociados a los índices de refracción extremos de la sección) coincidiendo con las direcciones de vibración de los polarizadores (ver Figuras 13.31 y 13.32).

Las isocromas corresponderán a los puntos en los que la birrefringencia es la misma y las direcciones de los índices de refracción no coinciden con las direcciones de vibración de los polarizadores (ver Figura 13.33).

¹ Stoiber, R.E. y Morse, S.A. (1994). Crystal identification with the polarizing microscope. Chapman & Hall

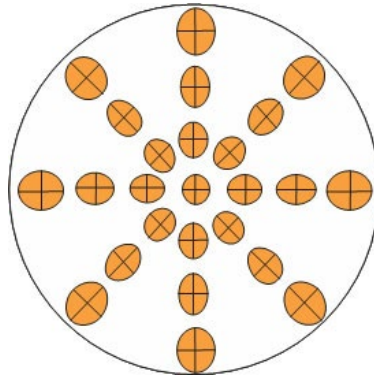


Figura 13.33.- Esquema de cómo se forman las isogiras y las isocromas. (Figura adaptada de Stoiber, R.E. y Morse, S.A. (1994)²).

Signo óptico y su determinación

Puede ser (+) o (-).

Uniáxicos

(+) cuando $n_e > n_o$

(-) cuando $n_o > n_e$

Biáxicos

(+) cuando $n_\gamma > n_\alpha$ y n_β se aproxima a n_α

(-) cuando $n_\alpha > n_\gamma$ y n_β se aproxima a n_γ

Determinación del signo óptico

Se requiere la lámina auxiliar.

El signo es (+) cuando la línea imaginaria que une los dos cuadrantes opuestos en los que hay sustracción (en los otros dos habrá adicción) es perpendicular a la dirección indicada en la lámina auxiliar para su índice mayor (ver Figura 13.34).

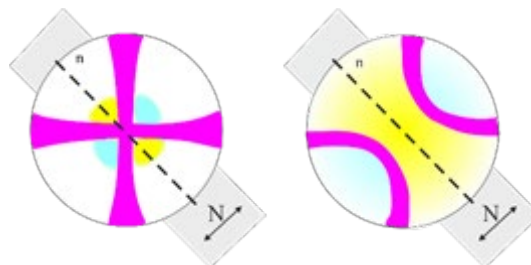


Figura 13.34.- Determinación del signo óptico de un cristal positivo, con la placa accesoria de yeso, sin lámina auxiliar (izquierda) y con lámina auxiliar de yeso (derecha).

² Stoiber, R.E. y Morse, S.A. (1994). Crystal identification with the polarizing microscope. Chapman & Hall

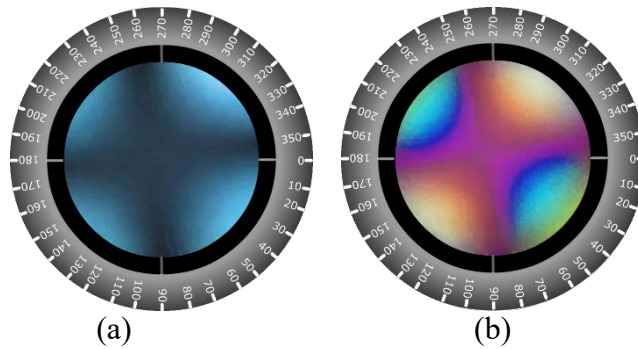


Figura 13.35.- Figura de interferencia de un cristal uniáxico negativo sin lámina auxiliar (a) y con lámina auxiliar de yeso (b).

El signo es (-) si dicha línea imaginaria es paralela a la dirección indicada en la lámina auxiliar para su índice mayor (ver Figura 13.36).

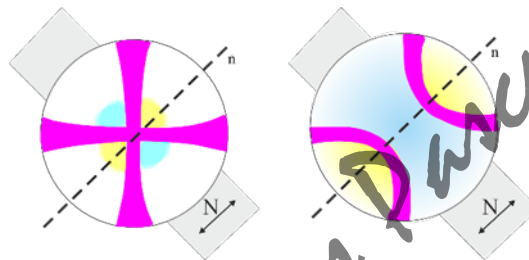


Figura 13.36.- Determinación del signo óptico de un cristal negativo, con la placa accesoria de yeso, sin lámina auxiliar (izquierda) y con lámina auxiliar de yeso (derecha)

Actividad óptica

Una sección perpendicular al eje óptico del cuarzo cortada con espesor mayor que el estándar muestra una característica que no puede explicarse a través de la teoría de la indicatriz óptica. Se trata de la capacidad de rotar la dirección de vibración del rayo incidente a lo largo de ciertas direcciones durante la transmisión.

Este fenómeno se manifiesta en la figura de interferencia del cuarzo, en la que puede observarse como a cruz aparece más o menos difusa en el centro de la misma en función del espesor de la sección en la que se observa.

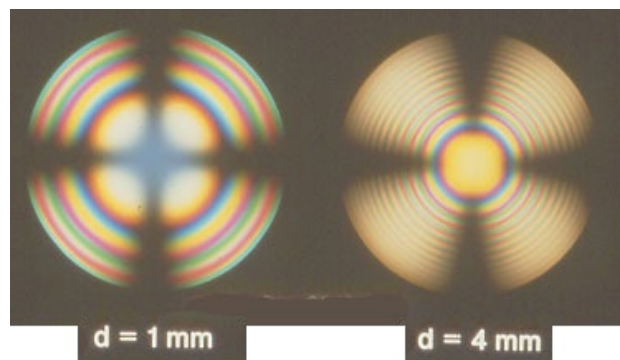


Figura 13.37.- Figura de interferencia del cuarzo. El fenómeno de la actividad óptica hace que en función del espesor la cruz se haga cada vez más difusa en el centro hasta lograr que las isogiras queden aisladas.

Cualquier cristal que pertenezca a uno de los 11 grupos puntuales enantiomorfos, como el cuarzo, presentará actividad óptica

1	2	3	4	6	23	222	32	422	622	432
---	---	---	---	---	----	-----	----	-----	-----	-----

Tabla 13.4.- Grupos puntuales asociados con la actividad óptica.

Un cristal de mano derecha rota la vibración en el sentido contrario a las agujas del reloj. Un cristal de mano izquierda rota la vibración en el sentido de las agujas del reloj.

Las espirales de Airy se observan al introducir una lámina auxiliar, de mica (izquierda) o de yeso (derecha) (ver Figura 13.38).



Figura 13.38.- Espirales de Airy. A la izquierda vista con lámina auxiliar de mica y a la derecha con lámina auxiliar de yeso.

13.4 DISPERSIÓN

Es la variación de cualquier propiedad óptica con la λ , aunque empleado sólo es la variación del índice de refracción con la λ . Un tratamiento adecuado de la dispersión implica profundizar en la teoría atómica de la materia, sin embargo, es posible dar un modelo simplificado haciendo uso de uno o dos resultados básicos concernientes a la estructura de la materia.

Un cristal está constituido por iones, átomos o moléculas dispuestos periódica y ordenadamente en el espacio. Estos iones, átomos o moléculas pueden comportarse como *dipolos*, caracterizados por su momento dipolar, en presencia de un campo eléctrico. La suma de todos los *momentos dipolares* en la unidad de volumen es la *polarización*, tratada en el apartado anterior.

Para un cristal transparente que absorbe muy pocas λ en el visible o cerca del visible, el índice de refracción disminuye de manera no lineal al aumentar la longitud de onda y la curva resultante se denomina *curva de dispersión* (Figura 13.39). Se denomina *dispersión normal* cuando el índice de refracción disminuye al aumentar la longitud de onda y cuando el índice de refracción aumenta con la longitud de onda se denomina *dispersión anómala*, la cual es una consecuencia de la presencia directa de bandas de absorción en el espectro visible.

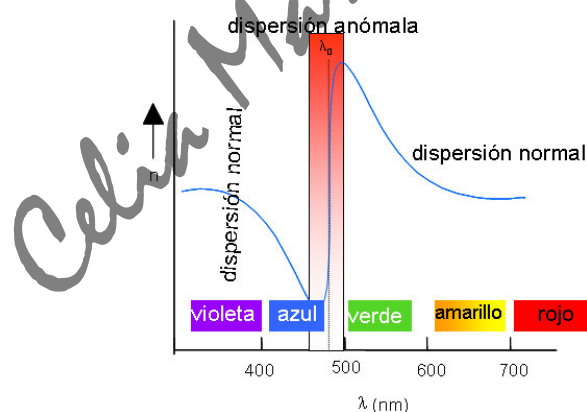


Figura 13.39.- Dispersión normal y anómala en el espectro visible

Estas curvas de dispersión suelen tener una pendiente más pronunciada en materiales con alto índice de refracción en comparación con los que lo tienen bajo y en sólidos que contienen elementos de transición (Fe, Ti) en comparación con los que carecen de ellos.

Los índices de refracción de un cristal determinado para λ específicas puede

simbolizarse usando la λ como subíndice, a partir de la Figura 13.40 se observa que el índice de refracción n_γ para $\lambda=687$ nm es 1,5840 que puede expresarse como $n_{\gamma 687} = 1,5840$.

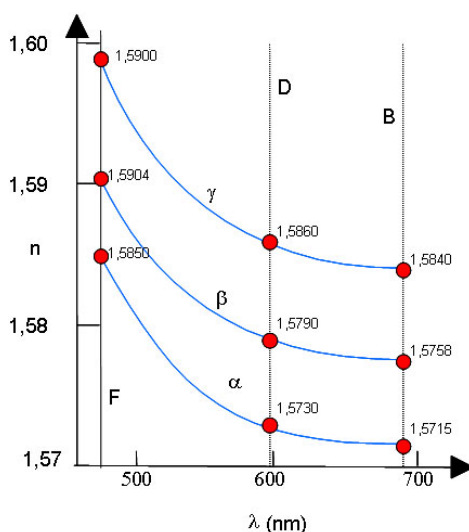


Figura 13.40.- Dispersión de los índices de refracción extremos de un cristal biáxico

La capacidad de dispersión de un cristal puede expresarse por su *coeficiente de dispersión* que se define como:

$$n_F - n_C$$

Ecuación 13.5

y por su *poder dispersivo* definido como:

$$\text{poder dispersivo} = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$$

Ecuación 13.6

Esta última expresión muestra la capacidad de un cristal transparente de separar la luz blanca en sus diferentes componentes (colores).

Los subíndices corresponden a las líneas de Fraunhofer, asociadas con λ particulares. A continuación, se indica una relación de ellas:

Línea de Fraunhofer	λ (nm)
A	759,4
B	687
C	656,3
D	589,3
E	526,9

F	486,1
G	430,8

Tabla 13.5.- Líneas de Fraunhofer y sus correspondientes λ en nm.

Tipos de dispersión en cristales transparentes

isótropos

uniáxicos

biáxicos

 rómicos

 monoclínicos

 triclínicos

Cristales isótropos transparentes

Los tipos de dispersión que pueden darse en los cristales isótropos son dispersión normal y anómala. Generalmente se estudia por observaciones directas de la variación de n usando luz monocromática de diferentes λ .

Cristales uniáxicos transparentes

Tipos de dispersión

 Normal

 Anómala

 Birrefringencia

La variación de los índices de refracción principales puede ser diferente para las distintas λ .

Implica posible variación de la forma y el tamaño de la indicatriz con la λ .

La consecuencia es que puede cambiar el signo óptico en el espectro visible.

Para la mayoría de los cristales, la dispersión de la birrefringencia suele ser pequeña y se considera despreciable.

Si ésta es significativa puede detectarse midiendo los índices de refracción de manera muy exacta a diferentes λ y también por los efectos de los colores de interferencia observados en luz blanca (Figura 13.41).

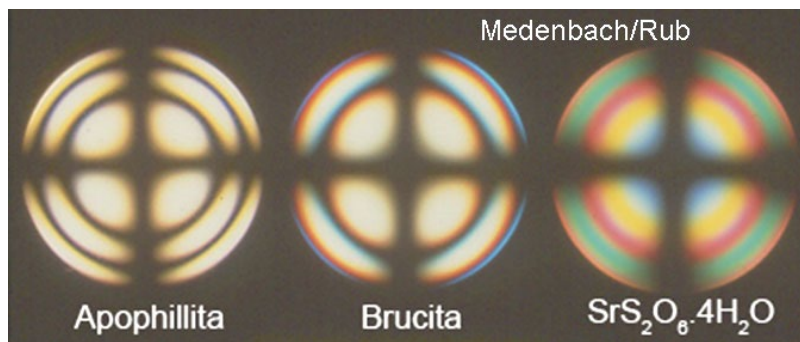


Figura 13.41.- Dispersión de la birrefringencia manifestada en figuras de interferencia

Un cristal uniáxico que presente dispersión se caracteriza porque presenta una familia de indicatrices, cada una correspondiente a una determinada λ . La dirección del eje óptico de cada una de las indicatrices de dicha familia se mantiene para cada λ , debido a la simetría del cristal. Aunque no haya dispersión de la orientación de la indicatriz en cristales uniáxicos, permanecen las otras dos clases de dispersión.

Cristales biáxicos transparentes

Los tipos de dispersión que puede presentar son:

Normal

Anómala

Birrefringencia

Ejes ópticos

Plano axial óptico

Orientación de la indicatriz óptica

El tamaño y la forma de esta superficie de representación pueden variar con λ .

La simetría ejerce control sobre su orientación.

Dispersión de los índices de refracción y de la birrefringencia

La indicatriz biáxica se caracteriza por poseer tres ejes binarios de simetría, de manera que cada uno de ellos es perpendicular a un plano de simetría óptica y coincide con uno de los ejes principales.

En el sistema rómbico hay tres ejes binarios de simetría, por lo que hay seis posibles orientaciones cristalográficas de la indicatriz óptica y cada cristal rómbico presenta una de estas orientaciones.

En el sistema monoclinico hay un solo eje de simetría binario y uno de los ejes principales de la indicatriz debe ser paralelo a éste, de manera que la indicatriz tiene la libertad de girar alrededor de este eje fijo en cualquier posición y para un cristal dado se tiene que definir esta posición. En el sistema triclínico no existe eje binario de simetría y la indicatriz puede tener cualquier orientación.

La dispersión de las propiedades ópticas con la λ es un fenómeno general, tal como se ha expuesto, sin embargo, sólo en determinados materiales transparentes en estado cristalino, como algunos minerales, el efecto es lo suficientemente fuerte para que sea visible en la figura de interferencia, pudiéndose apreciar franjas de color en las isogiras.

La cantidad de dispersión se puede clasificar en:

- *perceptible*, si las isogiras muestran una ligera coloración en los bordes
- *débil*, si esta coloración es más perceptible
- *fuerte*, si la coloración es más fuerte
- *extrema*, cuando las franjas de color cubren una gran parte del campo del microscopio.

Dispersión en los cristales rómbicos

En la indicatriz rómbica existe variación independiente de los tres semiejes X , Y y Z , implicando variación de las birrefringencias parciales y de la total.

La variación de las primeras implica variación del ángulo $2V$: *dispersión del ángulo $2V$ o dispersión de los ejes ópticos*.

La dispersión de los ejes ópticos en cristales biáxicos se expresa por la *fórmula de la dispersión* $r > v$ (Figura 13.42) o $v > r$ constata si el ángulo óptico para el rojo es mayor o menor que el ángulo óptico para el violeta.

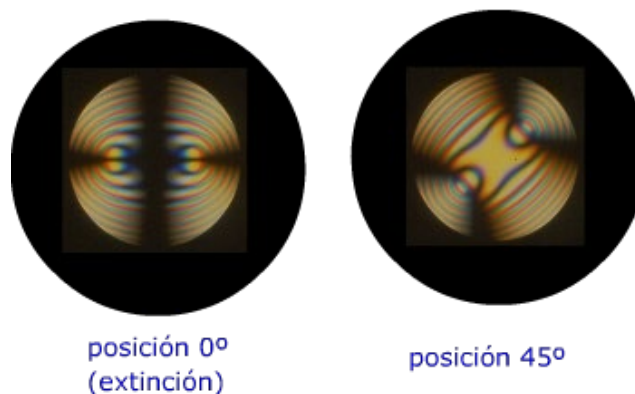


Figura 13.42.- Figura de interferencia mostrando dispersión mayor para el rojo que para el violeta ($r > v$)

Los resultados visibles de esta clase de dispersión pueden observarse en las figuras de interferencia de bisectriz aguda.

Puede haber o no cambio del plano axial óptico si el ángulo $2V$ sobrepasa el valor 0. Significa que puede haber *dispersión del plano axial óptico* y cambio de signo óptico.

Un ejemplo de dispersión del plano axial lo muestra la brookita (Figura 13.43).

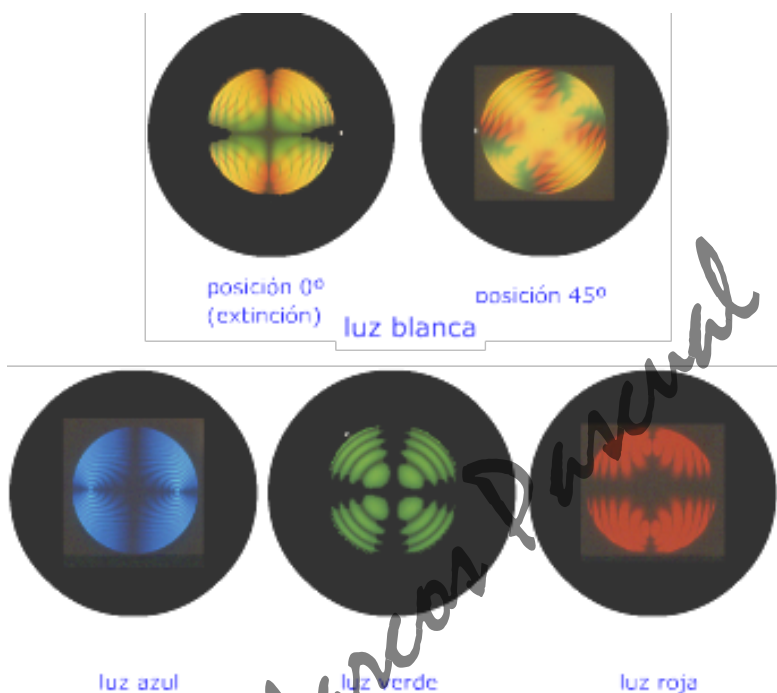


Figura 13.43.- Dispersión del plano axial en la brookita. En la imagen superior puede observarse la figura de interferencia en luz blanca, en la posición de extinción y a 45° de la misma. En la parte inferior puede observarse la figura de interferencia para las luces azul, verde y roja; para la primera el plano axial tiene la dirección este-oeste, para la segunda la brookita es uniaxial, y para la tercera el plano axial tiene la dirección norte-sur

El índice de refracción asociado a la dirección de vibración paralela al eje c es: n_α para λ inferiores a 550 nm; n_β para λ inferiores a 550 nm; uniaxial para $\lambda = 550$ nm

Dispersión en los cristales monoclinicos

En cristales monoclinicos el elipsoide puede girar alrededor del único eje binario y ello implica que puede existir dispersión de la orientación de la indicatriz, denominada *dispersión de las bisectrices*.

Solamente uno de los ejes principales X , Y o Z coincide con el único eje de simetría para cada λ ; los otros dos ejes deben yacer en el plano de simetría cristalográfica.

Pueden darse tres posibilidades:

1. bisectriz aguda coincide con el eje cristalográfico b , y la bisectriz obtusa y la normal óptica yazcan en el plano de simetría cristalográfica.
2. bisectriz obtusa coincide con eje cristalográfico b , y la bisectriz aguda y la normal óptica yazcan en el plano de simetría cristalográfica.
3. normal óptica coincide con al eje cristalográfico b , y las bisectrices aguda y obtusa yazcan en el plano de simetría cristalográfica.

Con dispersión marcada, en las figuras de interferencia, las franjas azuladas marcan la salida de los ejes ópticos para el rojo; las franjas rojizas señalan las salidas de los ejes ópticos para el violeta. Los tipos de dispersión que pueden observarse son los siguientes:

- Dispersión cruzada cuando el eje cristalográfico b coincide con la bisectriz aguda (ver ejemplo de la heulandita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}$), Figura 13.44).

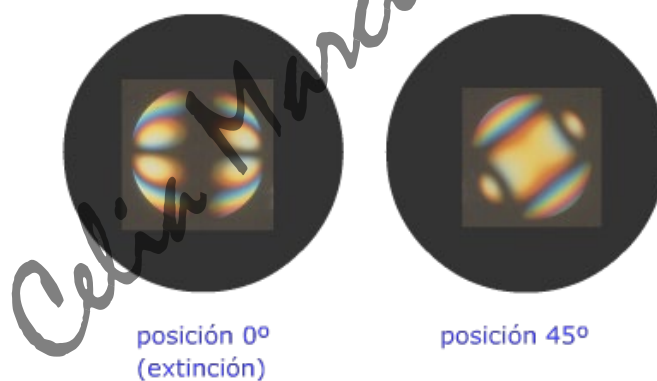


Figura 13.44.- Dispersión cruzada en heulandita con dispersión cruzada ($r > v$). La zona de las isogiras donde salen los ejes ópticos para el rojo está coloreada en azul y la zona de las isogiras donde salen los ejes ópticos para el azul está coloreada en rojo. a) Posición de extinción. b) A 45° de la posición de extinción (adaptado de Olaf Medenbach con permiso).

- Dispersión paralela u horizontal cuando el eje cristalográfico b coincide con la bisectriz obtusa (ver ejemplo de la sanidina de baja temperatura (KAlSi_3O_8), Figura 13.45)

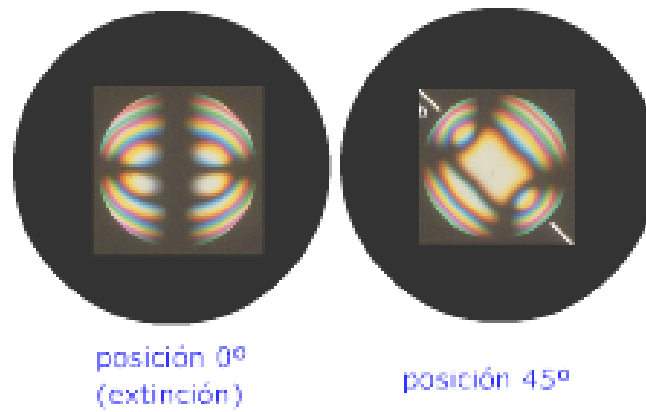


Figura 13.45.- Figuras de interferencia de la sanidina de baja temperatura en luz blanca, mostrando dispersión horizontal. (a) Posición de extinción, (b) a 45° de la posición de extinción (adaptado de Medenbach Olaf con permiso).

Dispersión inclinada cuando el eje cristalográfico b coincide con la normal óptica (Ejemplo, Figura 13.46).

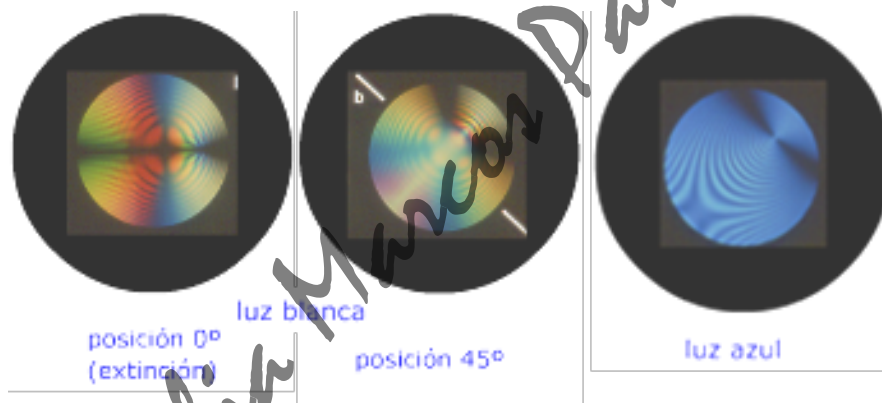


Figura 13.46.- Figuras de interferencia en luz blanca (en las posiciones de extinción y a 45° de la misma) y en luz azul mostrando la dispersión inclinada extrema

Dispersión en los cristales triclinicos

En el sistema triclinico el elipsoide puede moverse en cualquier manera con la longitud de onda, de manera que no se observa simetría en la figura de interferencia dispersada.