

6. Propiedades físicas de minerales

6.1. Propiedades mecánicas

Estas propiedades tienen gran importancia práctica, pues están vinculados con la influencia mecánica de las fuerzas exteriores durante la compresión, la tracción o el impacto y se expresan en la variación de su forma e integridad se distinguen las deformaciones elásticas, frágiles y plásticas.

6.1.1. Dureza

Por dureza se entiende el grado de resistencia que puede ofrecer un mineral o un cristal cualquiera a la destrucción mecánica bajo la acción de un cuerpo más resistente. El valor de la dureza depende mucho de los enlaces químicos y del tipo de dichos enlaces. Los cristales iónicos tienen la dureza baja o moderada en comparación con los cristales covalentes, que en general son duros. Los cristales con tipo mixto del enlace químico poseen generalmente dureza reducida. La dureza depende también del tipo de la red cristalina: el valor es bajo para los cristales con la red de capas, acuosa o molecular, mientras que los cristales con la estructura de armazón son más duros.

La valoración del grado de dureza de los cristales depende en mucho de los métodos de medición. En la práctica mineralógica corriente se emplea el método más sencillo de determinación de la dureza, estableciendo la dureza relativa (método del rayado). Si un cristal raya a otros, es decir, se deja en él una huella, el primer cristal es más duro que el segundo. En este caso se emplea la escala de **Mohs** que consta de diez patrones minerales, donde cada uno pueda rayar todas las anteriores (Tabla 6.1):

Grado de la dureza	Mineral y su formula	Constituyente
1	Talco $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	Grafito de lapiz
2	Yeso $Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$	Uña
3	Calcita $Ca(CO_3)$	Moneda de cobre
4	Fluorita CaF_2	
5	Apatito $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl)$	Vidrio comun
6	Ortosa $K(AlSi_3O_8)$	Cuchillo de acero
7	Cuarzo SiO_2	Lima
8	Topacio $Al_2(SiO_4)O$	
9	Corindon Al_2O_3	
10	Diamante C	

Tabla 6.1. Escala Mohs de minerales.

Hay que subrayar la relatividad de la escala de Mohs; si el talco tiene una dureza igual a 1 y el yeso, igual a 2, esto no significa que el yeso es 2 veces más duro que el talco. Lo mismo concierne a otros minerales de patrón.

De lo anterior confirmar las determinaciones más exactas de la dureza, que se efectúan con la ayuda de instrumentos especiales, llamados esclerómetros (medidores de dureza). En este caso la microdureza (H) se calcula por la fórmula siguiente: $H = 0.7 P/d^2 \text{ kgf/mm}^2$, donde P - una carga determinada (mkg), d - el diámetro de las huellas después de la penetración de una pequeña pirámide de diamante. Los valores de la microdureza para los minerales de patrón de la escala de Mohs, muestran que la dureza del diamante es cinco veces mayor que la del corindon y en tres órdenes más alta que la del talco (Tabla 6.2):

Tabla 6.2. Microdureza de los minerales de la escala de Moos.

Mineral	H kgf/mm ²
Talco	2.4
Yeso	36
Calcita	109
Fluorita	189
Apatita	536
Ortoclasa	795
Cuarzo	1120
Topacio	1427
Corindón	2060
Diamante	10060

Siempre hay que tener en cuenta que para los cristales de diferentes sistemas existe la anisotropía de la dureza, por ejemplo: para el diamante la dureza en las caras del octaedro (111) es mayor que en las del rombododecaedro (110); las caras del cubo (100) tienen la menor dureza. La estructura heterogénea también influye a la dureza de los cristales. En el caso general la dureza depende del tipo de la estructura cristalina, de las distancias entre los planos de la red, de la valencia, del número de coordinación, etc.

6.1.2. Exfoliación (Clivaje)

Denomina Exfoliación a la capacidad que tienen los cristales y los granos cristalinos de dividirse o hendirse con arreglo a determinados planos cristalográficos, paralelos a las caras efectivas o posibles (Fig. 6.1). La posición de estas caras se puede determinar mediante los mismos símbolos que se usan para caracterizar la posición de las caras.

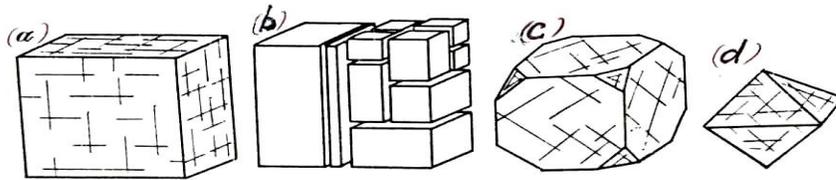


Figura 6.1. Exfoliación en los diferentes cristales: en la Halita (a,b) por el cubo (100) en tres direcciones; en los cristales de la Fluorita (c,d) por el octaedro (111) en cuatro direcciones.

Esta propiedad de los cristales y minerales depende exclusivamente de la estructura interna cristalina y en primer lugar de las fuerzas de cohesión entre los distintos planos de la red tridimensional (Fig. 6.2). Serán mayores, cuanto menor sea esta distancia y viceversa, serán

menores, cuanto mayor sea la distancia. En los cristales reales la Exfoliación se complica debido a que, además de las fuerzas de cohesión, hay enlaces de diferente carácter químico. Para la evaluación práctica de la Exfoliación existe la escala de cinco grados:

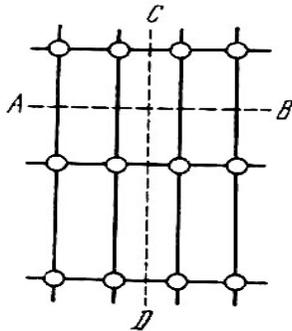


Figura 6.2. Planos de exfoliación son paralelos a los planos (AB) de la red tridimensional con distancias máximas entre los planos. La existencia de la exfoliación por otra dirección (CD) es menos probable.

1. MUY PERFECTA. Los cristales son capaces de dividirse en finísimas láminas, hojas de superficie lisa especular (micas, yeso, cloritas). Es bastante difícil lograr una fractura distinta de su Exfoliación.

2. PERFECTA. Al golpe mecánico se obtienen siempre fragmentos parecidos a verdaderos cristales con las superficies planas brillantes (galena, gema, calcita, fluorita etc.) Es bastante difícil lograr fracturas en otras direcciones (que no coinciden con la Exfoliación).

3. MEDIANA. En los fragmentos de los cristales se ven perfectamente tanto los planos de Exfoliación como las fracturas irregulares en direcciones casuales (feldespatos, piroxenos).

4. IMPERFECTA. Las superficies de Exfoliación regulares son raras. Comúnmente, las fracturas presentan superficies irregulares (apatito, berilo).

5. MUY IMPERFECTA. Se observan las superficies irregulares de fractura (cuarzo, UMSNH-IIM.Depto de Geología y Mineralogía)

casiterita). En dependencia del carácter de esas superficies, la fractura en los minerales puede ser concoidea (cuarzo, sulfuros), irregular (apatito, casiterita) y de otros tipos.

En los cristales de una misma sustancia la Exfoliación se puede observar en varias direcciones de igual o diferente grado de perfección (por ejemplo: los feldspatos tienen dos tipos de Exfoliación; según el tercer pinacoide (001) es perfecta y según el segundo pinacoide (010) es mediana.

Los planos de exfoliación de numerosos minerales, se orientan de distinta manera en los distintos tipos de estructuras cristalinas: en las estructuras de coordinación con enlace iónico, (galena, gema) son los del cubo (100); en la calcita son romboédricos (1010), en los silicatos de cadena (piroxenos) son prismáticos (110); en los silicatos con capas aniónicas (micas, cloritas) son las del pinacoide (001). El número de direcciones de la exfoliación y los ángulos entre ellos son también las características importantes para la determinación de los cristales y minerales.

Cuando en los cristales se producen superficies planas por rotura, a lo largo de alguno de dichos planos predeterminados, se dice que tienen partición o disyunción. Las causas de este fenómeno en general son las fronteras entre los cristales maclados y las impurezas e inclusiones orientadas mecánicas de otras sustancias. Por ejemplo, corindón tiene dos sistemas de partición: por (1011) y (1120) y por (0001) que explican correspondientemente a estas causas.

Las fuerzas mecánicas exteriores aplicadas a un cristal, causan deformaciones que pueden ser plásticas o elásticas. Si la fuerza P no sobrepasa cierto límite al cesar la acción de esta fuerza, desaparece la deformación causada por ella. Esta deformación se le denomina elástica. Al aumentar la fuerza P, se puede llegar a tal valor de la misma, en que el cuerpo no vuelva a adquirir completamente su volumen primitivo y conserva parcialmente la deformación. Esta deformación se denomina plástica.

La deformación plástica de los cristales se lleva a cabo por dos vías: el deslizamiento y la formación mecánica de maclas (maclado mecánico).

El deslizamiento consiste en el desplazamiento paralelo de las capas del cristal según un plano constante denominado plano de deslizamiento. La magnitud de desplazamiento de diferentes capas es directamente proporcional a la distancia de las mismas al plano de deslizamiento, las partículas del cristal conservan su mutua orientación paralela. El plano y la dirección de deslizamiento, consisten en el sistema de este fenómeno.

Los sistemas de deslizamiento de algunos cristales metálicos son los siguientes:

Metal	Cd	Mg	Cu	Ni	Ag	α-Fe
Plano de deslizamiento	(0001)	(0001)	(111)	(111)	(111)	(110)
Dirección	(1120)	(1120)	(101)	(101)	(101)	(111)

En el maclado mecánico también se producen desplazamientos de las capas según el plano de la macla, pero en este caso el desplazamiento se subordina a alguna ley de maclado. Las partículas varían su orientación. El proceso de mezclado mecánico, se llevó a cabo por las direcciones determinadas y distancias atómicas, que no pueden ser más que los parámetros de la red. El maclado mecánico se aparece en el caso cuando el deslizamiento se dificulta. Entre los cristales metálicos el maclado mecánico es mucho más fácil para los hexagonales, muchos más difícil para los cúbicos (red de malla centrada).

6.2. Propiedades ópticas

El color de los minerales es lo primero que llama nuestra atención cuando los vemos, por cuya razón es uno de sus caracteres mas importantes. En la naturaleza existe la extraordinaria diversidad de matices de la coloración de los minerales. En algunos minerales, el color es una propiedad fundamental directamente relacionada con su constitución. En este caso el color sirve

como medio de identificación importante (malaquita, azurita,pirita etc.). El color de otros minerales puede ser cambiarse (esfalerita, turmalina, fluorita etc.). Todo esto sucede cuando en la composición química de los minerales entran los elementos cromoforos: los elementos del grupo de hierro (Fe, Mn, Cu, Cr, Co, Ni), lantanoides y actinoides.

Otros factores son las imperfecciones estructurales y defectos en la estructura cristalina, que pueden ser debidas a la presencia de iones extraños o a espacios vacíos. En algunos minerales que son habitualmente incoloros, pueden estar las inclusiones de los minerales colorados, líquidos y gases, los cuales dan en el resultado la coloración a los compuestos incoloros. En algunos minerales se observa a veces "un juego de colores" determinado por la interferencia de la luz incidente, debido a de reflexión de las superficies internas de las hendeduras de la exfoliación. Este fenómeno se llama la irisación (los colores del arco Iris). En este caso, la coloración no tiene nada que ver con la constitución del propio mineral.

Además, en el proceso de la determinación de los minerales se usa el color de su raya. Bajo esta denominación se entiende el color del polvo fino del mineral. El polvo se obtiene fácilmente al trazar con el mineral una raya sobre la superficie mate de una placa de porcelana llamada biscuit. El polvo queda como huella en la placa, presentando el color característico del mineral, pues a veces los minerales con el color igual tienen el diferente color de su raya. Esta diferencia es un índice diagnóstico e importante para algunos minerales.

El brillo de los minerales depende de los índices de refracción y de reflexión. Los grados de intensidad del brillo de los minerales, establecidos por vía puramente práctica, encajan casi enteramente en la escala siguiente:

1. Brillo vítreo (tiene el reflejo del vidrio) tienen 60% de los minerales.
2. Brillo diamantino (tiene un reflejo fuerte y brillante como el diamante).

3. Brillo semimetálico (submetálico).

4. Brillo metálico

Los minerales con el brillo metálico tienen una raya negra o muy oscura, los minerales con el brillo semimetálico tienen una raya clara o coloreada.

El otro factor importante que influye en los resultados de reflexión de la luz es el carácter de la superficie que refleja. En los minerales de aspecto fibroso paralelo se observa un brillo sedoso. Los minerales transparentes con un aspecto tabular y con la exfoliación acentuada, poseen un brillo anacarado. Las masas terrosas de fina dispersión son de microporosas y tienen un brillo mate.

Las propiedades ópticas de los cristales están en la correspondencia con las leyes de la óptica geométrica. Están vinculadas con la variación de la velocidad de la luz, que atraviesa los cristales transparentes, y se describe a base de las nociones de la naturaleza electromagnética de la luz. De acuerdo con esas nociones, la luz se caracteriza por la longitud de onda y la amplitud de las oscilaciones armónicas de las componentes eléctrica y magnética del campo electromagnético en las direcciones perpendiculares entre sí y al rayo luminoso (Fig. 6.3). En la luz corriente, las oscilaciones suceden perpendicularmente al rayo luminoso en todas las direcciones radiales, mientras que en la luz planamente polarizada éstas se efectúan sólo en un plano de polarización. La simetría de las propiedades ópticas de los cristales a través de los cuales la luz monocromática pasa a la misma velocidad sin tener en cuenta su dirección de vibración, se denominan cristales isótropos.

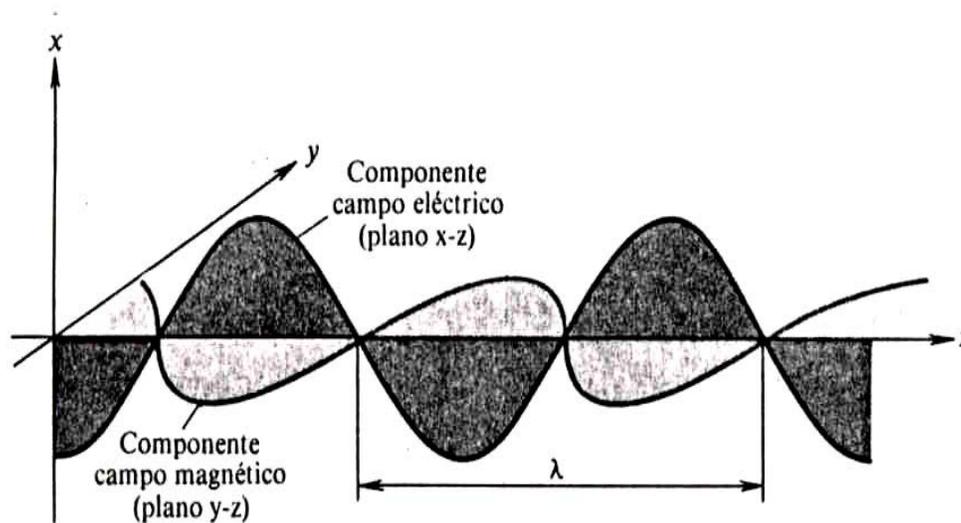


Figura 6.3. Campos eléctrico y magnético como componentes de la radiación electromagnética planamente polarizada

Todos los cristales del sistema cúbico se comportan como isótropos. En estos cristales la dirección de vibración de un rayo de luz, es siempre perpendicular a la dirección de la luz (Fig. 6.4).

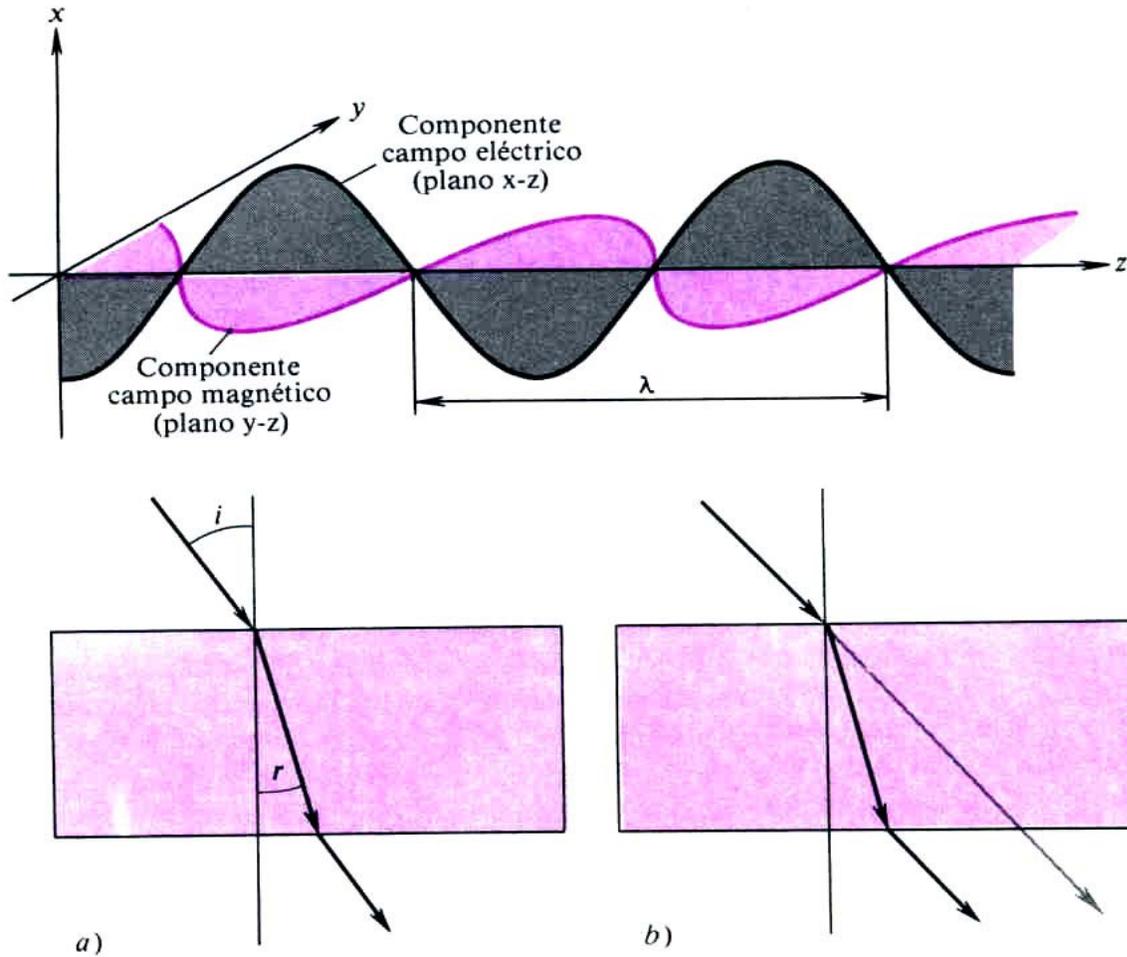


Figura 6.4. Refracción de la luz en los cristales isótopos (a) y anisótopos (b).

Los cristales que pertenecen a los sistemas de media y de baja simetría son anisótropos respecto a la luz; a través de ellos, un rayo de luz puede pasar con velocidades considerablemente distintas para las diferentes direcciones de vibración dentro del cristal (ver Fig. 6.4). El ángulo

UMSNH-IIM.Depto de Geología y Mineralogía

que forman las direcciones de vibración y la dirección del rayo puede ser diferente de 90° .

Respecto a las propiedades ópticas todos los cristales se dividen en tres grupos:

- a) Ópticamente isótropos (sistema cúbico);
- b) Ópticamente anisótropos uniaxiales (sistemas: trigonal, tetragonal, hexagonal);
- c) Ópticamente anisótropos biaxiales (sistemas: rómbico, monoclinico, triclínico).

En los cristales del sistema cúbico, un rayo de luz propaga en todas las direcciones con la misma velocidad, es decir, ellos se caracterizan por un índice de refracción.

Los cristales anisótropos, originan dos ondas luminosas polarizadas en dos planos mutuamente perpendiculares. A cada onda la caracteriza una superficie especial de propagación; una esfera o elipsoide para los cristales uniaxiales, y superficies de orden superior, para los biaxiales.

Las superficies de ambas ondas pueden tocarse en dos puntos (cristales uniaxiales), o cortarse en cuatro puntos (cristales biaxiales). Estos puntos determinan los ejes ópticos, es decir, las direcciones en que sin birrefringencia, se propaga la luz en el cristal. En esta dirección que coincide con el eje de simetría principal de los cristales los valores de los índices de refracción son iguales.

Normalmente a los ejes ópticos están las secciones circulares de los elipsoides. La superficie construida con los índices de refracción según las direcciones de las oscilaciones, se denominan indicatriz óptica. Tiene la forma de elipsoide de revolución (cristales uniaxiales - Fig. 6.5) o de elipsoide triaxial (de tres ejes desiguales) para los cristales biaxiales (Fig. 6.6). En los cristales uniaxiales una onda que se propaga, por el eje óptico, se llama ordinaria y se caracteriza por un índice de refracción constante (n_o). Otra onda que se llama extraordinaria tiene el diferente índice de refracción (n_e) en las diferentes direcciones.

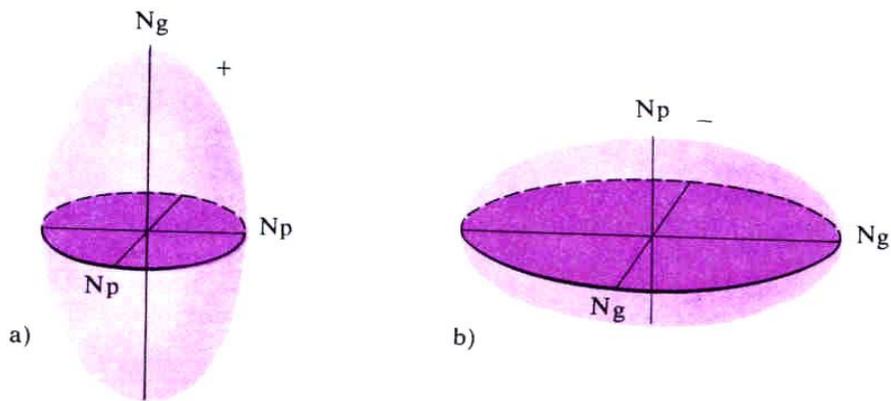


Figura 6.5. Superficies de las ondas luminosas para los cristales de categoría mediana.

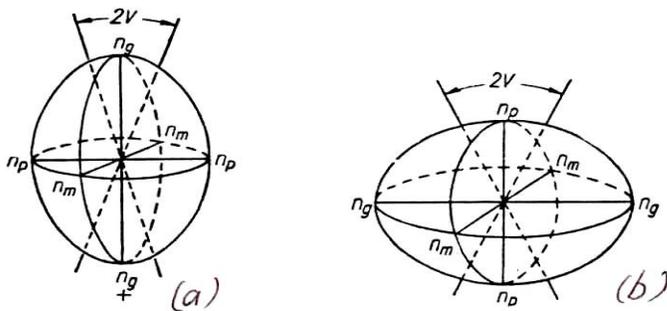


Figura 6.6. Indicatrices ópticas de los cristales uniaxiales positivo (a) y negativo (b).

En los cristales de simetría baja dos ondas son extraordinarias y sus índices de refracción son diferentes por las diferentes direcciones.

Los cristales se denominan ópticamente positivos, si el eje óptico en los uniaxiales o la bisectriz aguda del ángulo de los ejes ópticos, en los biaxiales, coincide con la dirección de oscilaciones de las ondas de menor índice de refracción, los cristales se denominan ópticamente negativos.

Los fenómenos de interferencia de las dos ondas polarizadas observadas con el microscopio polarizante en luz paralela convergente, permiten determinar las constantes ópticas más importantes y el sistema de simetría del cristal.

El microscopio polarizante es uno de los más importantes aparatos utilizados en el estudio de las propiedades ópticas de los cristales. En el microscopio para la transformación de la luz ordinaria a la luz polarizante se usan los prismas de Nicol o los productos artificiales (polaroides). Para los prismas de Nicol (nicoles) se utiliza la calcita incolora completamente transparente (el espato de Islandia) Fracturado según el plano de Exfoliación, el paralelepípedo de forma alargada se talla según la pequeña diagonal; se tallan y pulen las caras extremas de modo que forman un ángulo de 68° con las laterales, se pegan de nuevo las dos partes según la superficie del tallado con bálsamo del Canadá. Al penetrar en el prisma (Fig. 6.7) la onda corriente se descompone en dos ondas planopolarizadas, ordinaria (o) y extraordinaria (e). La primera onda, que tiene en la calcita un índice constante de refracción $n_o = 1.658$, al llegar a la

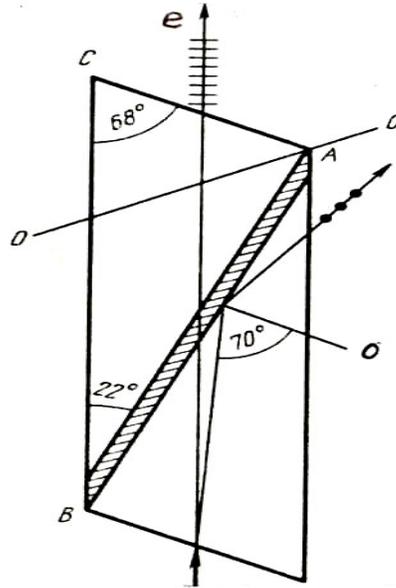


Figura 6.7. Propagación de la luz en el prisma Nicol.

capa de bálsamo del Canadá, que tiene un índice de refracción $n = 1.54$, sufrirá una reflexión interna completa y absorberá el engaste pintado de negro del prisma.

La onda extraordinaria tiene un índice variable de refracción. En dirección paralela a las aristas grandes del prisma es de 1.516. Al pasar de la calcita a la capa de bálsamo del Canadá y otra vez a la calcita, la onda extraordinaria casi no se refracta, ya que las de onda extraordinaria casi no se refracta, ya que las magnitudes 1.516 y 1.54 son casi iguales. Por lo tanto, del nícol sale solamente la onda extraordinaria plano polarizado. En el microscopio hay dos nicoles: el polarizador (en el cual entra la luz) y analizador, que permite analizar la onda que pasa por el polarizador. Si el polarizador y el analizador son paralelos, la luminosidad es máxima; si están cruzadas, la luminosidad es mínima, es decir, hay absorción completa. Los cristales del sistema cúbico son oscuros entre los nicoles cruzados. Los cristales anizótropos (de los sistemas medios

o bajos) tienen el color de interferencia en la misma posición de los nicoles.

Los métodos ópticos de la investigación de los minerales y rocas permiten determinar las características exactas de sus propiedades cristaloópticas. Estas características (constantes) importantes son:

1. Forma y tamaño de los granos,
2. Exfoliación y ángulo entre las grietas de la Exfoliación,
3. Color y pleocroismo,
4. Índice de refracción,
5. Isotropía y anisotropía,
6. Birefringencia y colores de interferencia,
7. Extinción.

Las constantes ópticas se investigan en las secciones delgadas (preparación esmerilada de 0.02 a 0.03 mm de espesor) de las rocas que son pegadas por el bálsamo de Canadá entre dos láminas de vidrio. Las constantes ópticas se determinan con la ayuda de los diferentes métodos, por ejemplo: para la determinación de los índices de refracción se usan tres métodos principales: **Método de Becke** (línea de BECKE); **Método del Refractómetro** (de reflexión total interna); **Método de inmersión** (con el uso de los líquidos especiales).

Muchos minerales pueden determinarse con toda precisión sobre la base del conjunto de propiedades físicas características: ópticas (color de los minerales y de la raya, brillo) y mecánicas (dureza y exfoliación). En algunos casos ayudan a identificar los minerales o comprobar la identificación varias propiedades que son típicas solo para ciertos minerales. Estas propiedades son las siguientes: densidad, magnetismo, propiedades eléctricas, juego de colores, luminescencia, solubilidad, fusibilidad, fragilidad, maleabilidad, elasticidad, radioactividad, olor, sonido, coloración de la llama, etc. Veamos algunos ejemplos concretos en el mundo mineral.

6.3. Densidad

La densidad relativa de las sustancias cristalinas depende ante todo de la composición química, del tipo de la estructura atómica (empaquetamiento), del peso atómico de los elementos constituyentes, sus dimensiones y valencias. La densidad real de los cristales habitualmente es menor que la densidad ideal de los mismos. Esta diferencia es la consecuencia de la presencia de los defectos estructurales en las redes de los cristales reales.

La densidad de las sustancias naturales (minerales) medida en unidades de masa por unidad de volumen (g/cm^3), oscila dentro de amplios límites de 1 a 23 g/cm^3 (minerales del grupo de platino). Los minerales más difundidos en la corteza terrestre, por ejemplo, los silicatos (componentes de las rocas más comunes y abundantes) tienen una densidad de 2,5 a $3,5 \text{ g/cm}^3$.

Como regla, los minerales, que contienen metales pesados de la parte inferior de la Tabla Periódica de Dimitry Mendeleev poseen mayor densidad (Metales nativos, Sulfuros). Todos los minerales integrados por elementos de la parte superior de la tabla periódica pertenecen a los ligeros (Sales oxigenadas, Halogenuros).

Para los minerales que representan series isomorfas, el aumento (o disminución) de la densidad es proporcional a la variación de la composición química, por ejemplo en la serie siguiente: Forsterita $\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)$ $3,2 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ Fayalita $\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)$ - $4,35 \text{ g/cm}^3$.

Las modificaciones polimorfas son los ejemplos buenos de la dependencia de la densidad del tipo estructural o del empaquetamiento (Grafito $2,3 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ Diamante $3,5 \text{ g/cm}^3$; Cuarzo $2,35 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ Estischovita $4,35 \text{ g/cm}^3$). En el caso general los cristales con la estructura más compacta tienen mayor densidad en comparación con los minerales y cristales de estructura de capas, de cadena, de armazón.

La densidad de un mineral de composición determinada es constante y su

determinación es, con frecuencia, un valor importante de la identificación de un mineral. Las considerables fluctuaciones de la densidad que se observan en un mismo mineral son relativamente raras y se deben, además del isomorfismo, a las minúsculas inclusiones de otros minerales, comprendidos burbujas de gases y líquidos.

Se aprovecha mucho la diferencia de la densidad de los minerales en el enriquecimiento y la concentración de las menas, donde se emplean los distintos métodos de gravitación. Con la ayuda de los últimos separan los minerales no metálicos (cuarzo, calcita, barita etc.). Durante el enriquecimiento se obtienen menas concentradas, con alto contenido de minerales útiles. Son conocidos varios métodos de determinación de la densidad de los cristales. Entre ellos son más usados los métodos picnométricos e hidrostáticos.

6.4. Propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas de los cristales surgen y se manifiestan en el campo magnético. Son muy pocos los minerales que poseen gran imantación, suficiente para atraer la aguja magnética o el aserrín de hierro. La mayoría de los minerales manifiesta las propiedades magnéticas sólo en un campo magnético fuerte de gran intensidad.

La inducción magnética, la cual es creada por el campo magnético, varía en presencia del mineral. Como medida de su variación sirve la permeabilidad magnética de los minerales (μ mag.) y la susceptibilidad magnética ($\kappa = \mu^{-1}$ mag.) relacionada con ella, que determina la dependencia de la imantación M (momento magnético) que nace en el mineral con respecto de la intensidad del campo magnético H :

$$\mathbf{M}=\kappa \mathbf{H} \text{ o bien } \kappa=\mathbf{M}/\mathbf{H}$$

En función del valor de la susceptibilidad magnético y la imantación de los cristales se distinguen los siguientes tipos: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos. La Fig. 6.8 muestra la

estructura magnética de diferentes tipos.

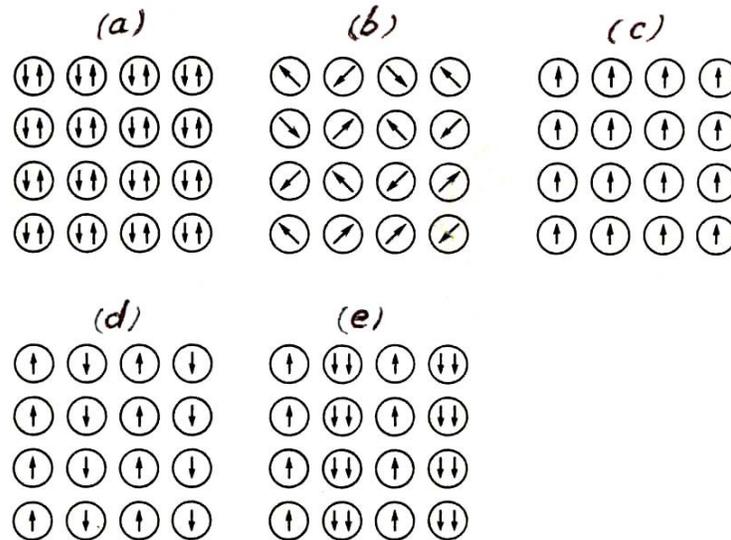


Figura 6.8. Estructura magnética de los cristales: diamagnético (a), para magnético (b), ferromagnético (c), antiferromagnético (d) y ferrimagnético (e).

Los cristales diamagnéticos (cobre, plata, oro nativo, la halita, el cuarzo, etc.) consisten de los átomos no magnéticos, en los cuales los momentos magnéticos de los electrones aislados (no apareados) son compensados. La susceptibilidad magnética tiene el valor negativo y muy bajo.

Los cristales de otros tipos contienen los átomos magnéticos, tanto los componentes principales así como las impurezas. Estos cristales se diferencian por la disposición de sus ejes magnéticos, que depende de una orientación de los spines. Así en los cristales paramagnéticos (pirita, siderita, cromita, etc.) existe una orientación caótica de los spines y sólo una pequeña parte de los ejes magnéticos es orientada conforme a la ley del campo magnético. El valor de χ es positivo, pero bajo.

Los cristales ferromagnéticos se caracterizan por su alto valor positivo de la

susceptibilidad magnética, que depende de la posición paralela de los ejes magnéticos. A los ferromagnéticos con muy alta imantación pertenecen el hierro nativo, el ferroplatino.

Los cristales antiferromagnéticos se distinguen por el hecho de que bajo la influencia del campo cristalino los spins de los iones ferromagnéticos vecinos tienen una orientación antiparalela. En el caso cuando existe una compensación completa de los momentos magnéticos, el valor de χ es positivo y bajo (hematita). Este valor es muy alto en los cristales antiferromagnéticos que se caracterizan por una compensación incompleta de los momentos magnéticos (cristales Ferrimagnéticos: Magnetita, Pirrotita).

Los minerales ferri- y ferromagnéticos, pertenecen a los minerales fuertemente magnéticos, pero se diferencian por tener menor valor de la imantación, lo cual principalmente está vinculado con la presencia de cationes y aniones no magnéticos.

Entre ellos la que mayor imantación tiene es la Magnetita. Son menos magnéticos: la pirrotita, la titanomagnetita, la jacobsita, la maghemita, la cubanita y otros minerales más raros. Los minerales ferrimagnéticos se caracterizan por su alta imantación remanente y manifiestan propiedades magnéticas al faltar el campo magnético.

La separación magnética de los minerales y la concentración de las menas que contienen ferrimagnéticos se basan en el contraste de las propiedades magnéticas y se realizan en los separadores electromagnéticos con intensidad regulable del campo magnético heterogéneo.

6.5. Propiedades eléctricas

La totalidad de los fenómenos que están relacionados con la polarización

eléctrica, son en general las propiedades eléctricas. Esta polarización en ciertos casos es espontánea, es decir, no aparece bajo la influencia externa. En otros casos esta característica es el resultado del calentamiento, del cargamento mecánico, del campo eléctrico.

Son muy importantes las propiedades piro- y piezolétricas de los cristales. Los fenómenos piroeléctricos consisten en los siguientes: si trasladamos un cristal a un medio de mayor o menor temperatura del que se hallaba antes del experimento, en ciertas caras del cristal aparecen cargas eléctricas. Este fenómeno se observa solamente en los cristales dieléctricos, que tienen ejes polares "especiales". Estos ejes se denominan los que no tiene ejes congruentes iguales o simétricas respecto a un plano. Ejes polares se denominan los ejes cuyos extremos opuestos no pueden coincidir mediante operaciones con los elementos de simetría que hay en el cristal dado. Los ejes polares y por lo tanto, los fenómenos piro- y piezolétricos, puede haberlos solamente en las diez clases de simetría: L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_6 , P , L_22P , L_33P , L_44P , L_66P (Fig. 6.9).

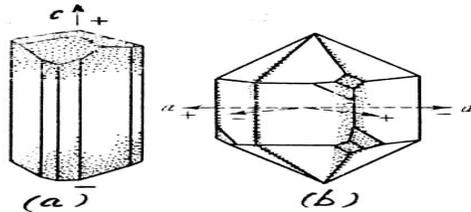


Figura 6.9. Fenómeno de piezo- y piroelectricidad en los cristales con las direcciones polares: en el típico piroeléctrico – turmalina (a) y en el típico piezolétrico – cuarzo (b).

Por primera vez, este fenómeno se observó en los cristales de turmalina de la clase L_33P y vino muy netamente expresado.

El polo que al aumentar la temperatura adquiere una carga positiva, se denomina

análogo (+) el opuesto, antílogo (-). Existe también el efecto inverso, cuando bajo la influencia del campo eléctrico cambia la temperatura del cristal (efecto calorimétrico). Este fenómeno tiene gran aplicación en la técnica. Por ejemplo: los cristales piroeléctricos se usan como los detectores de la temperatura (con la precisión 10^{-9} °C) de la radiación infrarroja, de la tensión, para la transformación de la energía solar en la eléctrica.

Las cargas eléctricas aparecen en ciertas partes del cristal, incluso cuando el cristal dieléctrico se somete a acción de fuerzas exteriores aplicándole tensiones mecánicas, presiones (Fig. 6.10). La fuerza aplicada puede ser positiva (tracción) o negativa (compresión); en ambos casos, las cargas de un mismo lugar del cristal tienen signos contrarios. Este fenómeno se denomina efecto piezoeléctrico directo. Se ha establecido que el cristal sometido a la acción de un campo el eléctrico se deforma elásticamente, es decir, se dilata o contrae. Este fenómeno se denomina efecto pizoeléctrico inverso.

Las cargas aparecen en los extremos de las direcciones polares. Por eso, los efectos piezoeléctricos, tanto directo, como inverso, pueden tener lugar solamente en los cristales que no tienen centro de simetría, en 20 clases de simetría (de ellos se excluye la clase $3L_44L_36L_2$ del sistema cúbico, ya que todas las constantes piezoeléctricas que le correspondan son iguales a cero.

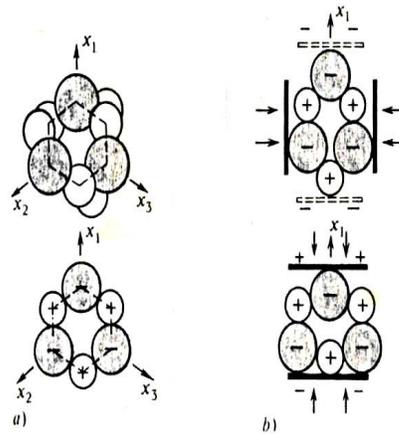


Figura 6.10. Fragmento de la estructura cuarcífera de los iones: a) de Sílice (+) y Oxígeno (-), b) efecto piezoeléctrico al deformar un cristal de cuarzo paralelo y perpendicularmente al eje de segundo orden (b).

Tanto el efecto directo como el inverso, se utilizan ampliamente en la técnica para resolver problemas muy diversos: determinación de la presión en el ánima del cañón, al efectuar el disparo, estabilización de las longitudes de onda de las transmisores de radio, determinación de las profundidades oceánicas, transmisión de radio señales dirigidas, es decir, que pueden ser captadas por el receptor a que van destinadas. Como cristales piezoeléctricos se utilizan principalmente el cuarzo la turmalina, la boracita y la sal de Rochelle (o de Seignette).