

00079

MINISTERIO DE INDUSTRIA  
DIRECCION GENERAL DE MINAS  
E INDUSTRIAS DE LA CONSTRUCCION  
INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

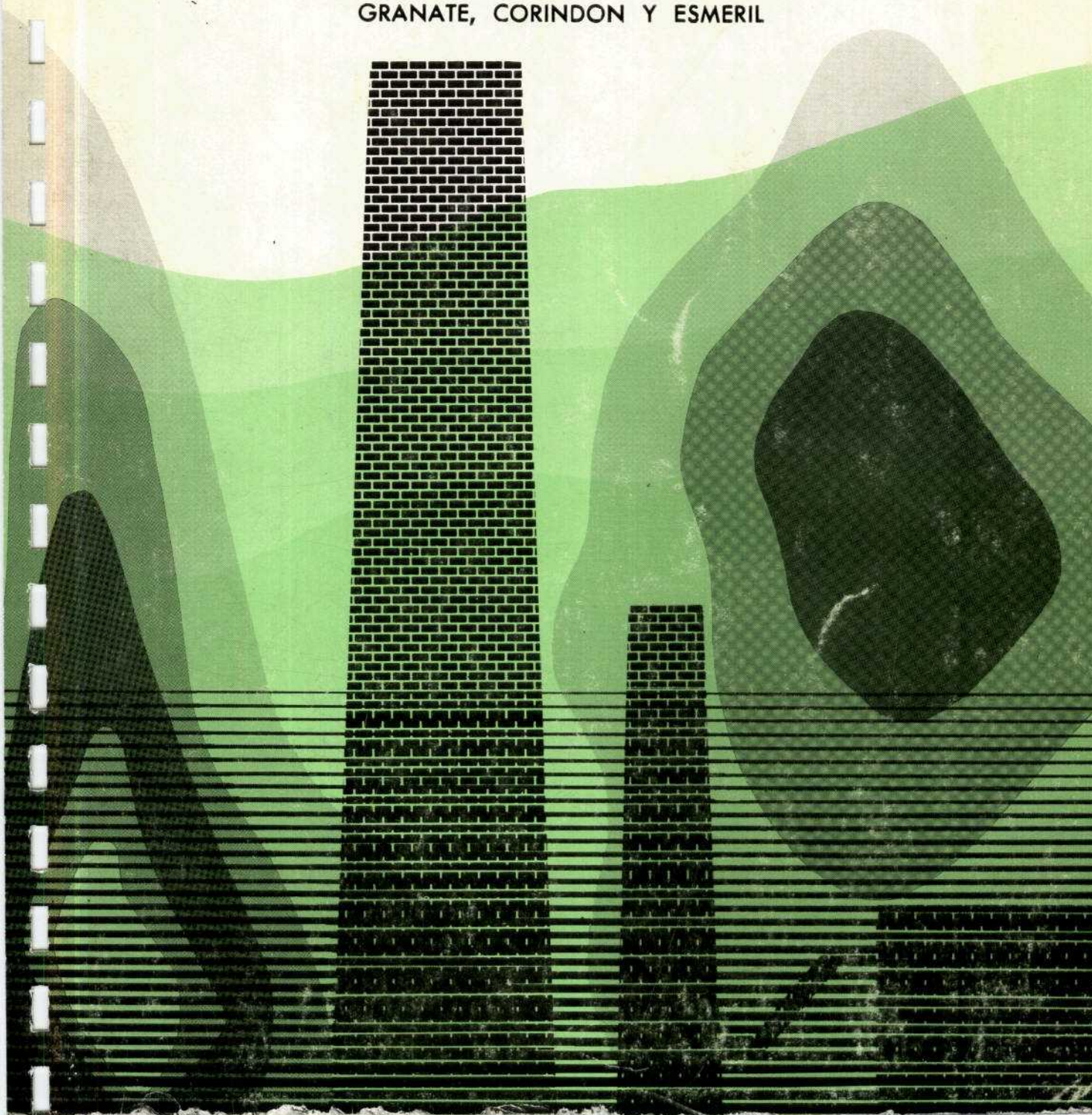
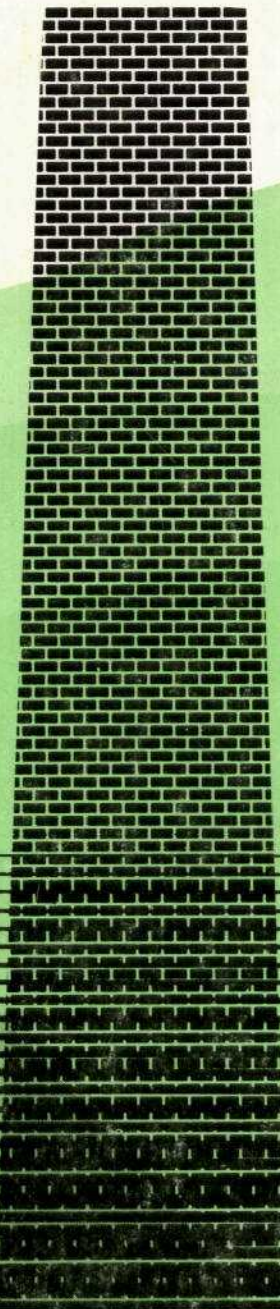
PLAN NACIONAL DE LA MINERIA  
PROGRAMA NACIONAL DE INVESTIGACION MINERA

# ESTUDIO ECONOMICO Y TECNOLOGICO PARA EXPLOTACION Y APROVECHAMIENTO DE LAS ROCAS INDUSTRIALES

Especificaciones y clasificación de las Rocas Industriales.

TOMO XIII

GRANATE, CORINDON Y ESMERIL



00079

PLAN NACIONAL DE LA MINERIA.  
PROGRAMA NACIONAL DE INVESTIGACION MINERA.

ESTUDIO ECONOMICO Y TECNOLOGICO PARA  
EXPLOTACION Y APROVECHAMIENTO DE  
LAS ROCAS INDUSTRIALES

Especificaciones y clasificación de las Rocas Industriales.

TOMO XIII

Marzo, 1976

00079

El presente estudio ha sido realizado por la empresa  
FRASER ESPAÑOLA, S. A. , en régimen de contrata-  
ción con el INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE  
ESPAÑA.

00079

GRANATE, CORINDON Y ESMERIL

I N D I C E

	<u>Página</u>
0. <u>INTRODUCCION</u>	1.
1. <u>COMPOSICION Y PROPIEDADES GENERALES</u>	2.
1.1. Granate	2.
1.1.1. Composición	2.
1.1.2. Estructura	3.
1.1.3. Propiedades ópticas y cristalográficas	6.
1.1.4. Propiedades físicas	9.
1.1.5. Propiedades térmicas	11.
1.1.6. Características distintivas	12.
1.2. Corindón y Esmeril	13.
1.2.1. Composición	13.
1.2.2. Propiedades ópticas y cristalográficas	15.
1.2.3. Propiedades físicas	17.
1.2.4. Propiedades térmicas	20.
1.2.5. Propiedades químicas	20.
1.2.6. Características distintivas	20.
2. <u>ESTUDIO GEOLOGICO</u>	22.
2.1. Yacimientos de granate	22.
2.1.1. Formas de presentarse	22.
2.1.2. Génesis y morfología. Distribución geográfica de las distintas variedades.	23.
2.2. Yacimientos de corindón	29.
2.2.1. Yacimientos de corindón común	29.

	<u>Página</u>
2.2.2. Gemas de corindón	32.
2.2.3. Yacimientos de esmeril	35.
2.3. Yacimientos españoles de granate	37.
2.3.1. Granates de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central)	37.
2.3.2. Granates de aplitas y granitos de Galicia Oriental	40.
3. <u>ESTUDIO MINERO. TRATAMIENTO Y PROCESOS INDUSTRIALES.</u>	42.
3.1. Estudio minero	42.
3.1.1. Distribución de la producción y minas principales	42.
3.1.2. Reservas aparentes	48.
3.2. Tratamientos y procesos industriales	51.
3.2.1. Concentración de los minerales	51.
4. <u>USOS</u>	56.
4.1. <u>Granate</u>	56.
4.1.1. Telas y papeles abrasivos	56.
4.1.2. Pulimento del vidrio	57.
4.1.3. Granos sueltos	58.
4.1.4. Gemas	58.
4.1.5. Otros usos	59.
4.2. Corindón	61.
4.2.1. Abrasivo	61.

	<u>Página</u>
4.2.2. Refractario	64.
4.2.3. Otros usos	64.
4.3. Esmeril	65.
4.3.1. Muelas abrasivas	65.
4.3.2. Papeles y telas abrasivas	66.
4.3.3. Otros usos	66.
5. <u>CALIDADES Y ESPECIFICACIONES</u>	69.
5.1. Granate	69.
5.2. Corindón	72.
5.3. Esmeril	78.
6. <u>PRODUCTOS SUSTITUTIVOS</u>	79.
6.1. Granate	80.
6.2. Corindón	82.
6.3. Esmeril	84.
7. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	86.

## INDICE DE CUADROS

		<u>Página</u>
Cuadro nº	1. Variedades de granate	4.
"	2. Análisis de diversos tipos de esmeril	14.
"	3. Características físicas del corindón como abrasivo	62.
"	4. Aplicaciones abrasivas del granate, corindón y esmeril	68.

## INDICE DE FIGURAS

Figura nº	1. Cristales de granate	7.
"	2. Cristales de corindón	7.
"	3. Composición molecular de granates de la Sierra de Guadarrama.	39.
"	4. Diagrama de procesos del granate	53.



## 0. INTRODUCCION

La presente monografía comprende un estudio general del granate, co  
rindón y esmeril, analizando fundamentalmente los aspectos que es-  
tán más íntimamente relacionados con sus aplicaciones industriales,  
haciendo especial mención a su utilización en la industria de los abrau  
sivos.

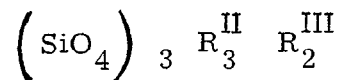
Debido a la fuerte competencia que en ese campo presentan a estas rou  
cas la producción de abrasivos artificiales, se revisa en la parte final  
la posible evolución de las mismas en los próximos años, desde el -  
punto de vista industrial así como del de su comercialización.

## 1. COMPOSICION Y PROPIEDADES GENERALES

### 1.1. Granate

#### 1.1.1. Composición

El nombre de granate se da a un grupo de minerales (ortosilicatos) - muy difundidos que poseen propiedades físicas y formas cristalinas - similares y presentan la siguiente fórmula general:



Si se prescinde de la valencia, la fórmula general se puede expresar como sigue:



X : Ca, Mg, Fe, Mn e Y

Y : Fe<sup>III</sup>, Al, Cr, Ti<sup>III</sup>

Z : Principalmente Si y también algo de P o As.

Su composición química es muy variable dentro de la fórmula general, particularidad observable además en un mismo cristal si su estructura es marcadamente zonal. De acuerdo con dicha composición, existen siete especies diferentes, con características parecidas en general, que presentan en su estructura metales sustituibles entre -

sí. Dichas variedades se recogen en el cuadro siguiente. (Cuadro nº 1).

Es raro encontrar un granate que corresponda a cualquiera de las fórmulas dadas. Muchos granates son una mezcla isomorfa de diferentes variedades, así por ejemplo la rodolita es una mezcla de dos moléculas de piropo y una de almandino. En general se le dá el nombre en atención al individuo que predomine en el mineral.

### 1.1.2 Estructura

El grupo de los granates, con la notable uniformidad morfológica, la gran diversidad de composiciones químicas y la estricta dependencia entre las propiedades físicas y la composición, constituye un claro ejemplo de un grupo isoestructural.

La estructura consiste en tetraedros  $\text{SiO}_4$  independientes unidos por enlaces oxígeno-catión-oxígeno, por medio de dos tipos de posiciones del catión, estructuralmente distintas. Una de estas posiciones, la X, está ocupada por iones divalentes bastante grandes y la otra, la Y, por iones trivalentes más pequeños que conducen a la fórmula general ya mencionada.

La disposición estructural es tal, que en las familias de planos (100) y (111) hay pocos átomos y como resultado de esto, el cubo y el octaedro rara vez se encuentran en los cristales de granates. Dentro de este tipo de estructura, hay un fácil y sustancialmente completo

CUADRO Nº 1.

VARIEDADES DE GRANATE

Granate	Variedades de silicato	Ambiente Geológico
Almandino	Fe-Al; 3 FeO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 3 SiO <sub>2</sub>	Esquistos micáceos y gneis: origen metamórfico.
Piropo	Mg-Al; 3 MgO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 3 SiO <sub>2</sub>	Eclogita: origen ígneo profundo.
Rodolita	Mg-Fe-Al.	
Andradita	Ca-Fe; 3CaO. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 3 SiO <sub>2</sub>	Caliza metasomática de contacto.
Espesartina	Mn-Al; 3 MnO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 3SiO <sub>2</sub>	Rocas graníticas y pegmatitas.
Uvarovita	Cal-Cr; 3CaO. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 3SiO <sub>2</sub>	Serpentinas
Grosularia	Cal-Alúmina; 3 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . 3SiO <sub>2</sub>	Caliza impura metasomática de contacto.

intercambio de magnesio, hierro ferroso y manganeso divalente en las posiciones X de los cationes. El calcio sustituye con menos facilidad a los anteriores iones en las posiciones X.

En las Y hay sustituciones limitadas con respecto al aluminio, hierro férrico y cromo.

Debido a exigencias de tamaño en la ocupación de las posiciones X de los cationes es de esperar una división bien neta de los granates en los que contienen calcio y los que contienen los cationes más fácilmente intercambiables, magnesio, hierro ferroso y manganeso divalente. Análogamente y debido a la sustitución limitada de los iones Y, es de esperar una división de los granates en aluminicos, férricos y crómicos. Estas tendencias están bien marcadas y cada una de ellas ha dado lugar a una manera de clasificar los granates. La primera, propuesta por Winchell, a base de los iones X, divide los granates en dos grupos:

<u>Piralspitas</u>	<u>Ugranditas</u>
Piropo MgAl	Uvarovita CaCr
Almandino FeAl	Grosularia CaAl
Espesartina MnAl	Andradita CaFe

La segunda clasificación, a base del ión Y, comprende tres grupos desiguales:

Granates AlumínicosGranates férricosGranates crómicos

Piropo

Andradita

Uvarovita

Almandino

Espesartina

Grosularia

El  $(OH)_4$  puede sustituir en cantidad limitada a los grupos  $SiO_4$ , en los hidrogranates, tales como la hidrogrosularia, y el titanio puede ocupar posiciones Y simultáneamente a la sustitución del calcio por el sodio en las posiciones X, produciendo la melanita negra.

1.1.3. Propiedades ópticas y cristalográficas

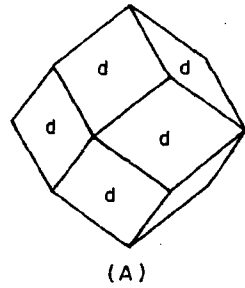
El grupo de granates incluye una serie de subespecies que cristalizan en la clase hexaquisoctaédrica del sistema cúbico (isométrico) y son similares en hábito del cristal.

Sus formas comunes son: dodecaedros "d" y trapezoedros "n", muchas veces combinados, como se observa en la figura nº 1, a), b) y c) respectivamente.

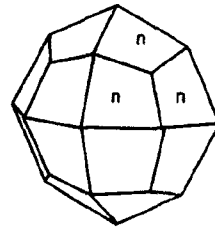
En algunas ocasiones se observan hexaquisoctaedros. (Fig. nº 1.d).

Son cristales frecuentemente aislados, incluidos o implantados, cuyo tamaño es muy variable desde grandes masas a tamaños microscópicos.

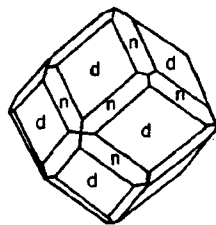
CRISTALES DE GRANATE



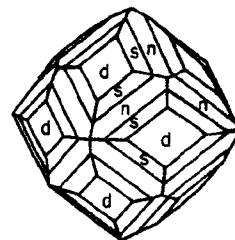
(A)



(B)

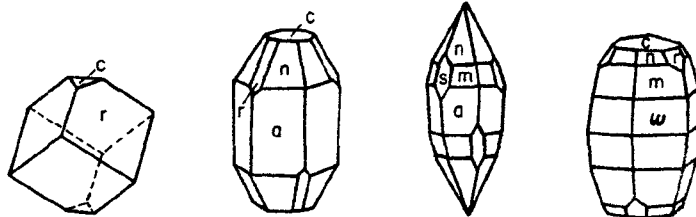


(C)



(D)

CRISTALES DE CORINDON



El granate también se encuentra en granos poligonales, agregados, masas criptocristalinas y suelto en cantos rodados y en arenas. Son frecuentes las inclusiones.

- En secciones delgadas presenta diversos colores: gris verdoso, rojizo pálido, pardo pálido a pardo oscuro, incoloro, etc. Los cristales a veces aparecen a bandas.
- Birrefringencia débil o muy débil en algunas variedades, aunque la mayor parte son oscuras entre nicoles cruzados. Las áreas birrefringentes aparecen en zonas o por sectores.
- El relieve es muy alto;  $n >$  bálamo; el índice de refracción de los minerales del grupo del granate varía entre 1,735 y 1,895 como se indica a continuación.

<u>Granate</u>	<u>Índice de refracción</u>
Almandino	1,830
Piropo	1,705
Rodolita	1,760
Andradita	1,895
Espesartina	1,810
Uvarovita	1,860
Grosularia	1,735



#### 1.1.4. Propiedades físicas

- Tenacidad:

Los agregados de cristal compuestos de numerosos individuos son frágiles y fácilmente fracturables. El granate masivo y los cristales bien formados son notablemente tenaces y se rompen con dificultad.

- Peso específico:

El peso específico de los minerales del grupo del granate varía entre 3,5 y 4,2 según la composición. Los distintos valores según las variedades son los siguientes:

<u>Granate</u>	<u>Peso específico</u>
Almandino	3,9 - 4,2
Piropo	3,7
Rodolita	3,8 - 3,9
Andradita	3,8 - 4,1
Espesartina	3,8
Uvarovita	3,4
Grosularia	3,5

- Dureza:

La dureza varía desde 6 (grosularia) hasta 7,5 (almandino), en la escala de Mohs. En algunas variedades de almandino en esta-

do natural se ha llegado a durezas de 8 e incluso superiores. La dureza del granate se aumenta a menudo cuando se le prepara como material abrasivo.

- Color:

El color de los distintos tipos de granate varía muy ampliamente como se indica a continuación:

- Piropo:** Desde rojo intenso a negro aunque este último es raro.
- Grosularia:** Incoloro, blanco, verde claro, rojo jacinto (pie - dra canela, hesonita), amarillo de ámbar. Su nombre proviene del nombre científico de la grosella, refiriéndose al color verde claro de la grosularia pura.
- Rodolita:** Granate púrpura o rosa rojo pálido.
- Almandino:** Color rojo oscuro, en los granates preciosos y rojo castaño en los granates comunes. El granate rojo columbino (rojo de sangre con reflejos azulados) es el que se denomina verdaderamente almandino.
- Espesartina:** Amarillo o de tono pardo rojizo.
- Uvarovita:** Cristales de color verde esmeralda oscuro.

Andradita: El granate común es casi siempre pardo, pero también incoloro, verde y totalmente negro.

- Brillo:

Los granates presentan brillo vítreo, resinoso intenso o mate.

Son translúcidos o transparentes. Las variedades transparentes alcanzan un valor alto como gemas.

- Fractura:

No existe exfoliación, pero se encuentran reparaciones paralelas a (110). Son características las fracturas irregulares, variando desde concoidal en algunas variedades, mientras que otras tienden a romperse en laminillas delgadas, angulosas o astillosas.

#### 1.1.5. Propiedades térmicas

La acción del soplete depende de la composición química, pero en general funden sin dificultad y se disocian, dando un vidrio magnético.

Los granates que tienen un alto contenido en hierro, tales como el almandino, funden a una temperatura aproximada de 1.200°C.

Se comprueba fácilmente mediante la aplicación de la llama del soplete a pequeñas muestras de mineral con formas puntiagudas y aristas, observándose como se funde y redondea la muestra. Hay que señalar que es infusible a la llama del mechero Bunsen.

Los granates que contienen un considerable tanto por ciento de cromo son infusibles.

#### 1.1.6. Características distintivas

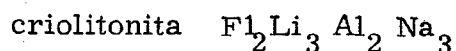
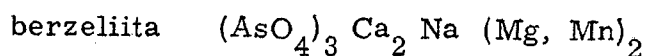
Los granates se reconocen generalmente por los cristales cúbicos característicos, su dureza y color.

Puede ser necesario realizar algún análisis químico para distinguir los con seguridad entre ellos, pero el peso específico y el índice de refracción conjuntamente, son suficientes en general.

Los granates de hierro, almandino y andradita, al fundirse forman globulos magnéticos. La espartina cuando se funde con carbonato sódico da perla verde azulada (manganeso). La uvarovita que es casi infusible, da color verde a la perla de sal fósforo (cromo).

Los productos más corrientes de transformación del granate son: - clorita, talco y serpentinas. Se descomponen imperfectamente con los ácidos, a menos de estar fundidos, en cuyo caso separan sílice gelatinosa.

Minerales de constitución análoga a los granates son:



## 1.2. Corindón y Esmeril

### 1.2.1. Composición

El corindón es teóricamente alúmina ( $Al_2O_3$ ) pura cristalizada de modo natural, con un 52,9% de aluminio y un 47,1% de oxígeno.

El esmeril (cuyo nombre proviene del cabo Emeri en Grecia, donde se encontró) no es un mineral puro, pues consiste en una mezcla mecánica de corindón granular, con impurezas tales como óxidos de hierro, oligisto y magnetita, espinela, cuarzo, etc, con aspecto semejante al de una mena metalífera. La cantidad de corindón no suele exceder del 50% y por lo común es mucho más baja. El porcentaje de alúmina en el esmeril comercial puede variar entre un 40 y un 75 por ciento, pero el valor del mineral depende, no fundamentalmente de su análisis químico, sino principalmente de sus propiedades físicas.

En el cuadro nº 2., se muestran los análisis del esmeril de diferentes localidades.

Desde el punto de vista mineralógico el esmeril presenta tres variedades fundamentales:

#### 1) Esmeril verdadero:

Que consiste en una mezcla de corindón y magnetita, siendo los mejores ejemplos los yacimientos de esmeril de Turquía y Grecia, que contienen de un 60-70% o más de  $Al_2O_3$

CUADRO Nº 2.

ANÁLISIS DE DIVERSOS TIPOS DE ESMERIL

Países	Alúmina	Sílice	Magnetita	Cal	Magnesia	Agua	Total
<b>Grecia</b>							
Naxos	62,64	4,90	31,41	0,45	0,6	1,04	100,50
Naxos	68,53	3,10	24,10	0,86		4,72	101,31
Naxos	67,69	6,36	30,87	0,89	0,20	3,99	100,00
Nicaria	75,12	6,88	13,06	0,72		3,10	98,88
<b>Turquía</b>							
Kulah	63,50	1,61	32,25	0,92		1,90	101,18
Gumuch	60,10	1,80	33,20	0,48		5,62	101,20
Samos	70,10 <sup>a</sup>	4,00	22,21	0,62		2,10	99,03
<b>U. S. A.</b>							
Virginia	45,38	2,53	41,23	0,06	5,71	1,32	96,23
Chester, Mass.	50,02	3,25	44,11			c	97,36
New York	59,22 <sup>b</sup>	0,84	30,68		3,54	2,70	96,98
New York	50,10	14,32	28,17	0,84	4,31	c	97,74

a) También contiene 3,72% de  $TiO_2$  (ilmenita) y algo de alúmina como espinela.

b) " " 3,28% " " " " " "

c) Se desconoce.

Fuente: Industrial Minerals and Rocks.

2) Esmeril espinela:

Es una mezcla de espinela (ceilanita-hercínita), corindón y magnetita. El corindón está presente en proporciones variables e incluso a veces en cantidad muy escasa. Este tipo de esmeril se explota actualmente en Estados Unidos, Peekskill, New York, y anteriormente en Virginia.

3) Esmeril feldespático:

Es similar al anterior, pero con un contenido de 30 a 50% en feldespato plagioclasa en lugar de espinela.

1.2.2. Propiedades ópticas y cristalográficas

El corindón cristaliza en el sistema hexagonal, subsistema romboédrico. Los cristales son a veces de considerable tamaño, incluidos o sueltos, de habitus primático con pirámides muy agudas, tabulares aplanados o de tipo romboédrico, pudiendo mostrar las secciones estructura zonal.

Es característica y frecuente la existencia simultánea de pirámides agudas de segundo orden, lo que da origen a cristales en forma de tonel con estriación fuerte horizontal. (Fig. nº 2).

Los cristales grandes suelen tener caras desiguales y ásperas. Maclas según  $(10\bar{1} 1)$  frecuentemente en laminillas polisintéticas que producen estriación característica. Si la maclación se efectúa según todas las caras del romboedro, aparece una estriación triangular en la base. También es separación la exfoliación menos perfecta según  $(0001)$ .

Los cristales muy puros de corindón se consideran como piedras preciosas, distinguiéndose entre ellas el rubí (rojo), zafiro (azul), esmeralda oriental (verde) y topacio (amarillo).

El índice de refracción del corindón alcanza los siguientes valores:

$$n_{\omega} = 1,767 \text{ a } 1,772$$

$$n_{\epsilon} = 1,759 \text{ a } 1,763$$

Presenta birrefringencia baja:  $n_{\omega} - n_{\epsilon} = 0,008-0,009$ . Las secciones son en general más gruesas que de ordinario, debido a la extrema dureza del corindón. Por esta razón, el máximo color de interferencia de la mayoría de las secciones delgadas se corre hacia el segundo orden.

El relieve es muy alto con  $n >$  bálamo.



La extinción es paralela al contorno del cristal o simétrica respecto a la partición romboédrica.

Las secciones de los cristales tabulares están orientadas longitudinalmente al rayo lento y las de los cristales prismáticos lo están - al rayo rápido, ya que el signo óptico del mineral es negativo.

La figura de interferencia obtenida en sección basal es uniáxica negativa, generalmente con un sólo anillo. Algunas figuras son biáxicas con  $2V$  alto, hasta  $30^\circ$ .

En secciones delgadas el corindón presenta fuerte pleocroismo, en las variedades de fuerte coloración.

Características distintivas para su identificación son la combinación del relieve muy alto con la débil birrefringencia, la partición y el maclado laminar.

### 1.2.3. Propiedades físicas

#### - Dureza:

El corindón tiene una dureza 9 en la escala de Mohs, aunque va ría algo según su grado de pureza.

A pesar de que la dureza del corindón es la más próxima a la - del diamante en la escala de Mohs, la diferencia existente entre

ambos, es mucho mayor que la existente entre los 8 grados - restantes en dicha escala.

La variedad más dura es el zafiro, disminuyendo paulatinamente hasta alcanzar en el esmeril el valor 8, aunque puede variar entre 7 y 9 según su composición. La dureza y calidad de corte del esmeril depende de la cantidad de corindón presente. La raya del esmeril es de marrón a negra; la del corindón es blanca.

- Peso específico

El peso específico del corindón está comprendido entre 3,93 y 4,10; el del esmeril entre 2,7 y 4,3, dependiendo su valor de la cantidad de impurezas presentes.

- Brillo

En el corindón es adamantino a vítreo; el esmeril presenta brillo mate.

El corindón común es opaco pero hay variedades transparentes.

- Fractura

Las gemas de corindón tienen fractura concoidal, pero la variedad común, aunque recién extraída no presenta cruceros; una vez alterada se resquebraja a lo largo de planos de separación originando superficies lisas, reduciéndose su valor como abrasivo.

El esmeril rompe con una fractura bastante regular.

- Color:

El corindón varía considerablemente de color, presentándose normalmente en tonalidades de castaño, rosa o azul. Puede ser también blanco, gris, verde, rojo, negro, amarillo, violeta y también incoloro.

Generalmente los colores se deben a estar teñidos por óxidos metálicos; así la coloración en rojo intenso se debe a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (1 a 2,5%), la azul oscura se debe al Fe y Ti.

El rubí y el zafiro son las variedades roja y azul del corindón. El rojo de "sangre de pichón" es el color preferido y se reserva para él la denominación de rubí; el zafiro, además del azul, se presenta en otros colores, pero el más apreciado es el azul real profundo.

Los colores hacen atractivas estas piedras, puesto que, teniendo el corindón poca dispersión de la luz, le falta fulgor.

Tanto el rubí como el zafiro son gemas dicroicas y presentan matices de color diferente en direcciones distintas. Ambas cambian de color al ser expuestas a las emanaciones del radio.

El corindón incoloro se denomina "zafiro blanco", el amarillo se conoce como "topacio oriental", el verde y el púrpura "esmeralda oriental" y "amatista oriental", respectivamente.

El esmeril se presenta también con colores diversos: gris oscuro o azul oscuro, a veces jaspeado, así como rojizo oscuro debido a inclusiones de hematites.

- Asterismo:

Es importante señalar el fenómeno denominado asterismo que se aprecia en los rubíes y zafiros y en general en algunos cristales del sistema exagonal, y que consiste en lo siguiente: las inclusiones pueden ordenarse en tres direcciones cristalográficas, que forman un ángulo de  $120^\circ$  entre sí; un corte convexo y pulido en el cristal muestra lo que podría llamarse triple tornasolado, es decir, un rayo de luz en ángulo recto con cada dirección de las inclusiones que produce una estrella de seis puntas.

1.2.4. Propiedades térmicas

El corindón es infusible al soplete; en el horno eléctrico funde a una temperatura próxima a los  $2.000^\circ\text{C}$ .

El punto de fusión del esmeril varía según su composición.

1.2.5. Propiedades químicas

El corindón es soluble, pero con dificultad, en el bórax. Inatacable por los ácidos, se disuelve en bisulfato sódico. Reducido a polvo, humedecido con solución de cobalto y calentado largo tiempo, se tiñe de azul.

1.2.6. Características distintivas

El corindón se caracteriza principalmente por su gran dureza, alto brillo, y peso específico y fractura. Es muy permeable a los rayos X, --

propiedad que sirve para distinguir las verdaderas gemas de corindón de las piedras artificiales.

El rubí y el zafiro poseen una estructura fibrosa por la cual identifi- can los peritos su origen. Si la estructura es muy fibrosa se tienen el rubí y el zafiro estrellado, que presentan un efecto óptico consistente en seis rayos de luz que emanan de un centro.

El corindón se transforma en mica potásica, diásporo, espinela, etc., mientras que los cristales de esmeralda están frecuentemente fisurados y considerablemente alterados a mica hidratada.

Minerales semejantes son sobre todo las piedras preciosas de los aluviones como la esmeralda, circón, espinela, granate, cordierita, turmalina, etc. diferenciándose del corindón por su dureza, peso específico y propiedades ópticas.

## 2. ESTUDIO GEOLOGICO

### 2.1. Yacimientos de granate

#### 2.1.1. Formas de presentarse

Los miembros del grupo del granate se presentan fundamentalmente - en:

- Esquistos y gneis, llegando a representar a veces el 50% de estas rocas. Son característicos los yacimientos en esquistos micáceos y esquistos de hornblenda.
- En pizarras cristalinas, sobre todo en las pizarras de las mesozonas y catazonas (micacitas, eclogitas, etc.), así como en los yacimientos metalíferos enclavados en ellas.
- Como mineral de contacto en las rocas calcáreas y dolomíticas, con caliza granuda, wollastonita, epidota, vesubiana, magnetita, etc.
- Se presenta raramente en rocas eruptivas, caso de la melanita (variedad negra de la andradita), que se presenta en las fonolitas, así como la espesartina en las riolitas, granitos y pegmatitas.
- A veces en yacimientos filonianos de alta temperatura.

- Debido a su resistencia a la meteorización y densidad, se concentran en forma de granos redondeados en los placeres y arenas de los ríos y mares.
- Como mineral accesorio en las "arenas negras" explotadas en la recuperación de la ilmenita y monacita.

### 2.1.2. Génesis y morfología. Distribución geográfica de las distintas variedades.

A pesar de la diversidad de formas en las que aparecen los granates, como se ha descrito en el apartado anterior, únicamente tienen verdadera importancia como depósitos comerciales los que se han formado por procesos metamórficos, bien por metamorfismo de contacto o bien por metamorfismo regional.

Se van a describir a continuación las variedades más importantes de la serie del granate, indicando su forma de presentación, origen, lugares más característicos en los que se han encontrado, señalando igualmente los depósitos comerciales de las mismas.

#### 19) Granate aluminico manganésico (espesartina)

Los granates que se presentan en las rocas metamórficas, sirven como indicadores muy sensibles del grado de metamorfismo. En los grados más inferiores de éste el único granate que se encuentra es la variedad espesartina, rica en manganeso, como ocurre

en las pizarras cristalinas de la provincia de Minas Gerais, Brasil, donde se intercala como verdadera roca independiente.

Principalmente la espesartina se presenta en granitos y pegmatitas, pero también en otras rocas eruptivas. Constituye también el componente más importante de las pizarras de Wetz, de las Ardenas, de Viel-Salm, Ottrez y Hébronval. Otros yacimientos donde se encuentra espesartina son Aschaffenburg en Spessart; S. Marcel, Piamonte, así como los cristales claros y anaranjados encontrados en Antsirabe, Madagascar.

2º) Granate aluminico férrico (almandino o granate común).

En grados algo más elevados de metamorfismo regional se suele formar el almandino.

Muy a menudo se encuentra en rocas pobres en feldespato, como gneis y micacitas; ejemplo de estos yacimientos son Riesengebirge, Erzgebirge y en los acarreos aluviales del norte de Alemania. Se encuentra también en numerosas localidades de los Alpes (Oberglugl en el valle de Oetz, cristales de gran tamaño), Fort Wrangell en Alaska y Ampandranaika en Madagascar.

En los Estados Unidos los depósitos más importantes se encuentran en los condados de Warren, Essex y Hamilton (New York), siendo las minas principales la North River Garnet Company y Boston. El granate (almandino) se presenta en gneis en forma de



granos y cristales, en su mayor parte con tamaño entre el de un guisante y 2,5 cm de diámetro.

En Warren County (New York), el granate debe representar un 6% de la roca como mínimo, para que sea explotable. La ganga más común está compuesta de hornblenda, feldespato y pequeñas cantidades de piroxeno, mica, cuarzo y sulfuro de hierro.

En la cantera de North River, junto al lago Thirteenth, un gneis similar al de Barton contiene de 4 a 8 por ciento de granate en cristales que llegan a tener hasta 7,5 cm de diámetro.

En New Hampshire, cerca de North Wilmot, el granate almandino constituye el 40-60 del esquisto granatífero que lo encierra. El depósito tiene 30 por 55 m. y 7,5 m de potencia. Se cree que los granates se formaron por emanaciones graníticas.

En Carolina del Norte, en la Sugar Loaf Mountain, existe un depósito de rodolita que representa del 20 al 25 por ciento del esquisto que lo encierra.

En Canadá se conocen varios depósitos pequeños, pero la única producción importante se obtiene de los condados de Lennox y Addington (Ontario), donde el almandino se presenta en un gneis.

### 39) Granate alumínico magnésico (Piropo)

Los granates ricos en el componente piropo, se forman sólo en -

los grados más elevados de metamorfismo. Procede por lo común de las serpentinas o de sus rocas originarias.

Son muy conocidos los granates de Bohemia que se encuentran en la serpentina de Meronitz cerca de Bilin y en las arenas que de ella proceden junto a Tribnitz y Podedlitz. Se utilizan en joyería como piedra preciosa. También se presenta incluido en la serpentina de Zöblitz y Greifendor en Sajonia; en la Kimberlita y en los placeres diamantíferos de Africa del Sur y placeres de Rubí de Arizona y Utah.

El piropo de muchas serpentinas está envuelto por una capa fibrosa de 1 mm de espesor, poco birrefringente, de tono pardo grisáceo, de una materia denominada quelifita, consistente en hipersitena, hornblenda y espinela y en parte serpentina, productos de alteración del propio granate.

49) Granate crómico-cálcico (uvarovita)

Es el más raro de los granates. Se encuentra como mineral secundario en la cromita y también en algunas zonas metamórficas de contacto.

Se pueden citar de este modo los granates (uvarovita) en las grietas de la cromita en masa de las proximidades de Sissersk en el Ural septentrional; en las serpentinas cromíticas de Tejas, Pa.,

Nueva Idria, California; Jordansmühl en Silesia y en Kyschtimsk en Ural del Sur. En las calizas granudas y dolomitas del Canadá y Tasmania. También se ha encontrado en masas finamente granudas y de fractura concoide en Bushveld, Transvaal.

59) Granate cálcico-férrico (Andradita)

Puede presentarse como:

- a. Mineral típico de contacto formado por adición de Fe; juntamente con otros silicatos del "skarn", como ocurre en Sajonia (Breitenbrunn), Turingia, Moravicza; en grandes cantidades en la zona de contacto de Oslo. En Sala (Suecia) se presenta incluido en galena, así como en Broken Hill (Australia). De manera muy semejante se presenta la andradita en los minerales de Fe, que han sido modificados posteriormente por contacto, como ocurre en algunas localidades de Silesia.
- b. Diseminado en las grietas de las pizarras cristalinas, especialmente en las de serpentina y clorita. Así se presenta en algunas zonas del Tirol.

Entre los granates calcicoférricos reclama cierta independencia, por su composición y yacimiento, la melanita; se encuentra como elemento primario de las rocas eruptivas y se caracteriza por su elevada proporción de titanio, que lo contiene tanto bajo la forma  $TiO_2$  como la de  $Ti_2O_3$ ; también lleva  $Al_2O_3$ .

Es frecuente en las rocas eruptivas nefeliníferas y leucitíferas, en particular en las fonolitas y sus tobas; es más raro en las rocas profundas y entonces se presenta informe y diseminado, como la variedad llamada chorlomita, procedente de la sienita eleolítica de Magnet Cove en Arkansas, y la iwaarita, de Iwaara en Finlandia.

69) Granate cálcico (Grossularia)

Mineral especialmente de contacto en las corneanas de silicato cálcico. Los depósitos más importantes se encuentran en: Auerbach, St. Andreasberg, Jordansmühl en Alemania; Mussalp en el Valle de Ala, Piamonte, Zermatt, Monzoni, Elba, Somma, - Banato, en Wilui, Siberia Oriental; Concepción del Oro y Xalostoc en Méjico; por último se han encontrado grossularias en Ceilán.

## 2. 2. Yacimientos de corindón

En el grupo del corindón están incluidos por una parte el corindón común y las piedras preciosas, variedades del mismo, como el rubí, zafiro, etc., por otra parte se incluye también dentro del grupo el esmeril. A la vista de los diferentes usos en los que encuentran aplicación estos minerales se va a realizar por separado su estudio geológico.

### 2. 2. 1. Yacimientos de corindón común

#### A) Génesis

1. El corindón es un constituyente primario de ciertas rocas ígneas, por lo general de las pobres en sílice como sienitas y sienitas nefeliníferas.

Se presenta como segregaciones magmáticas en los filones pegmatíticos en las sienitas y sienitas nefelínicas, como ocurre en Ontario (Canadá) y Transvaal (Sudáfrica). Puede hallarse en grandes masas en la zona de separación de las peridotitas de las rocas encajantes como ocurre en Carolina del Norte y Georgia (EE. UU.), presentándose normalmente asociado con clorita, espinela, enstatita, mica, olivino, serpentina, cianita y diáspora.

El origen de los depósitos sudafricanos lo atribuye Hall a un revestimiento de reacción entre diques de pegmatita y rocas ígneas básicas, por un proceso de desilicación del dique.

También se presenta como acompañante de las separaciones - magmáticas de magnetita en Routivare, Laponia.

2. Como producto del metamorfismo de contacto y regional en los gneis, esquistos micáceos y demás pizarras cristalinas; en las calizas granudas y dolomías, en parte como cristales destacados y también formando un esmeril mezclado con magnetita.

El corindón es un mineral accesorio de las rocas metamórficas.

3. Se presenta frecuentemente en cristales y gravas redondeadas - en suelos detríticos y arenas, donde ha sido preservado gracias a su dureza e inercia químicas.

Los cristales, normalmente de varios tamaños, proceden de la desintegración de las rocas que contienen corindón.

4. A veces se presenta el corindón, como inclusión extraña en las rocas eruptivas, basaltos de Unkel en el Rin.

#### B) Distribución

Se conoce la presencia de depósitos comerciales de corindón principalmente en: Siberia y los Urales (URSS), Canadá, Rodesia, Madagascar, Canadá, Sudáfrica, India y los Estados Unidos.

En Ontario (Canadá) existen tres intrusiones de sienita nefelínica - que tienen corindón como constituyente primario, llegando a ser -

tan abundante en algunas zonas, que forma más del 10% de la masa rocosa.

La más importante se encuentra en el condado de Renfrew, cerca de Craigmont, donde una pegmatita de sienita nefelínica contiene cristales de corindón en cantidades comerciales. En otros lugares, se presentan granos diseminados de corindón en la sienita y los granos mayores flanquean los diques de la intrusión pegmatítica.

En Africa del Sur, país cuya producción alcanza una gran importancia, se encuentra corindón pardo (así como rubíes) en los depósitos que flanquean ciertos diques de pegmatita intruídos en rocas ígneas básicas. La zona limítrofe es una masa muy alterada, llamada plumasita, con gran cantidad de mica oscura y corindón, presentándose éste igualmente como mineral de placer.

Todos estos depósitos se encuentran sobre una amplia zona en el distrito de Zontpansberg al Norte de Transvaal, así como también en Bandolierskop y en el distrito de Pietersburg en el este del Transvaal.

En los Estados Unidos se encuentra corindón en el extremo oriental de los montes Apalaches, en el punto de contacto de las intrusiones de una dunita (roca olivínica), con el gneis de Carolina del Norte y Georgia, donde diques feldespáticos atraviesan masas de peridotitas. Estas formaciones se deben probablemente a un proceso de desilicación.

También se presentan yacimientos de contacto en Warwick y Amity en Nueva York.

En la India, se recogen cristales aislados de corindón sobre una sienita meteorizada y en esquistos atravesados por pegmatitas.

En Madagascar, el mineral se encuentra en las zonas meteorizadas de una roca metamórfica que contiene grafito, mica y corindón.

La producción rusa procedente de los Urales y Siberia, proviene de una roca anortosítica denominada "kyschtynnita" y de los diques de una sienita con corindón. Estos depósitos son probablemente de origen magmático.

### 2.2.2. Gemas de corindón

Se denominan gemas de corindón a las variedades de coloración pura y de gran belleza, entre las que cabe destacar el rubí, zafiro, esmeralda oriental, topacio oriental, etc.

Casi siempre se encuentran estas variedades en los lavaderos de piedras preciosas. En este apartado se van a tratar principalmente la génesis y distribución de los yacimientos de rubíes y zafiros.

#### A) Rubíes

Los principales yacimientos de rubíes se hallan en Birmania, Tailandia y Ceilán.



Los rubíes más hermosos proceden de una localidad cercana a Mogok (Birmania), donde se encuentran el rubí y la espinela en una caliza arcaica metamórfica de contacto, con intrusiones de rocas silíceas y básicas. La caliza es demasiado difícil de trabajar, y las piedras se obtienen de los aluviones y detritus de la misma y de las cavidades de solución en la caliza.

El suelo del valle fué antiguamente un lago, y las gemas se obtienen en un depósito lacustre de arcillas con guijarros que se encuentran por debajo de unos 5 m de sobrecarga. Estos depósitos se explotaron desde hace siglos en pequeña escala, comenzando en 1889 las operaciones de explotación en mayores proporciones. Los concentrados contienen también zafiros, espinela, turmalina, sillimanita preciosa y otras muchas piedras semipreciosas.

Los rubíes de Tailandia se encuentran cerca de Bangkok, en el golfo de Tailandia y en Battambang, Camboya.

En Ceilán se hallan rubíes junto a otras gemas en las gravas de los riachuelos.

Otros países en los que se encuentran yacimientos de rubíes son la India, Siam, Madagascar y los Estados Unidos, país este último en el que se han encontrado rubíes en las arenas y en relación con los grandes depósitos de corindón de Carolina del Norte.

## B) Zafiros

El zafiro es un mineral más extendido. Se encuentra junto a los rubíes birmanos, pero no en la caliza. Igualmente se hallan asociados con los rubíes en Tailandia, Camboya y Ceilán, en depósitos de aluvión.

Ceilán ha producido zafiros (así como rubíes y la mayor parte de las piedras preciosas) por espacio de 2.500 años. Virtualmente todas las gemas son aluviales, presentándose en gravas como resultado de la denudación de esquistos arcaicos, gneis y calizas cristalinas. La localidad más conocida a este respecto es Pelmadulla. Las gravas se presentan en capas y bolsadas hasta una profundidad de 35 m. Los zafiros y rubíes provienen de las calizas, y las demás piedras, de los gneis y esquistos.

Se encuentran zafiros de gran belleza en un dique de pegmatita existente en la cordillera de Zonskar, en Cachemira (India) y en los pozos de corindón de Madrás y Mysore (India).

En los Estados Unidos se han encontrado pequeños zafiros de color muy bonito en diversas localidades de Montana. Se descubrieron en las arenas fluviales al este de Helena en la explotación de placeres de oro, y posteriormente se han encontrado incrustados en las rocas de un lamprófido en Yogo Gulch. Una vez extraída la roca, se expone al aire por algún tiempo, y se descompone gradualmente, dejando así libres los zafiros.

Otros yacimientos de zafiros se encuentran en la caliza cristalina del Afganistán; en Siam y Camboya producen gemas de gravas; en una zona muy extensa en Queensland Central (Australia), se producen zafiros de color azul oscuro y en Rubyvale, se encontró en 1938 una gema de 412 quilates de color azul verdoso.

### 2.2.3. Yacimientos de esmeril.

El esmeril se ha formado fundamentalmente por procesos metamórficos, sobre todo metasomatismo de contacto, presentándose en masas de forma irregular con tamaño de grano variable, en calizas cristalinas, rocas ígneas básicas alteradas y esquistos de clorita y hornblenda.

La mayor parte del esmeril comercial procede de Grecia, Turquía y Estados Unidos.

El esmeril de mejor calidad (Naxos) (Grecia) y Turquía se presenta en bolsas o masas lenticulares en calizas cristalinas y arcillas rojas residuales. En la isla de Naxos (Grecia) esas masas tienen una anchura variable entre 3,5 y 35 m y una longitud superior a los 70 m y están asociadas estrechamente con calizas cristalinas, gneis y esquistos. Es un esmeril muy parecido al corindón de alta calidad. En las islas de Naxos y Samos, existen depósitos más pequeños.

En Aidin (Turquía), las masas irregulares de esmeril suelen tener dimensiones de 60 por 90 m y van encerradas en una caliza cristalina interstratificada con esquistos y gneis. Depósitos similares a estos se

encuentran igualmente en los Urales (URSS). También se presenta el esmeril como bloques sueltos de mineral incrustados en arcillas derivadas de la meteorización residual.

En los Estados Unidos los principales depósitos de esmeril se encuentran en Peekskill (Nueva York) Chester (Massachusetts) y Whittles (Virginia).

En Peekskill (Nueva York) se encuentra esmeril de espinela en el complejo ígneo básico de Courtland, con inclusiones y esquistos micáceos, en forma de filones netamente definidos englobados en rocas de silimanita-cordierita-granate-cuarzo. Se ha encontrado un filón que tiene 15 m. de anchura y más de kilómetro y medio de longitud.

En Chester (Massachusetts), el esmeril se presenta en bolsadas en forma de cápsulas, en una falla de esquisto sericítico.

En Virginia, los depósitos de esmeril espinela se presentan en masas lenticulares en: a) esquisto y cuarcita, b) en granate atravesado por pegmatitas. Se cree que estos se formaron por sustitución a alta temperatura, afín al metasomatismo de contacto.

Otros depósitos de menor importancia se encuentran en Baviera, Australia, Uruguay e Irán.

### 2.3. Yacimientos españoles de granate

No existen en España en la actualidad explotaciones de granate, pero sí se conocen muchas localidades en las que aparecen diversas variedades aunque no en cantidades comerciales. Las zonas más características se citan a continuación: en las pizarras cloríticas de Lena; en el Pico de Posets, cerca de Benarque (uvarovita); en las calizas metamórficas de Senet; con mineral de hierro en Bagur; Espinabell (almandino), gneis del cabo de Creus; en los filones de cuarzo de Palaftugell, Orsavinyá y Tibidabo. En Baños, Palencia (granate común en grandes cristales). - Abundantísimo en las micacitas de Sierra Nevada; en cantidades menores en Sierra Alhamilla y cabo de Gata donde fué objeto de explotación; en Alicante (almandino bien cristalizado), así como en Burgillos, Badajoz.

Hay que destacar también la existencia de granates en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central), así como en las aplitas y granitos de Galicia oriental, cuyo origen y composición han sido motivo de extensos estudios y que se resumen en los siguientes apartados.

#### 2.3.1. Granates de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central)

En la Sierra de Guadarrama se encuentran distribuidos los granates en tres sectores de diferente tipo de metamorfismo, presentando una perfecta gradación zonal.

En el sector oriental los granates aparecen en cualquier tipo de roca y en todo el ámbito metamórfico, exceptuando la zona de la clorita, -

siendo muy frecuentes en la zona de la estaurolita. Sus dimensiones son muy variables, desde microscópicas hasta milimétricas, dependiendo del tipo de roca.

En los sectores central y occidental, aunque los granates también aparecen en todo el ámbito metamórfico, son en general poco frecuentes.-

Estos granates están intensamente fracturados y parcialmente transformados en clorita, moscovita, epidota, biotita y cuarzo.

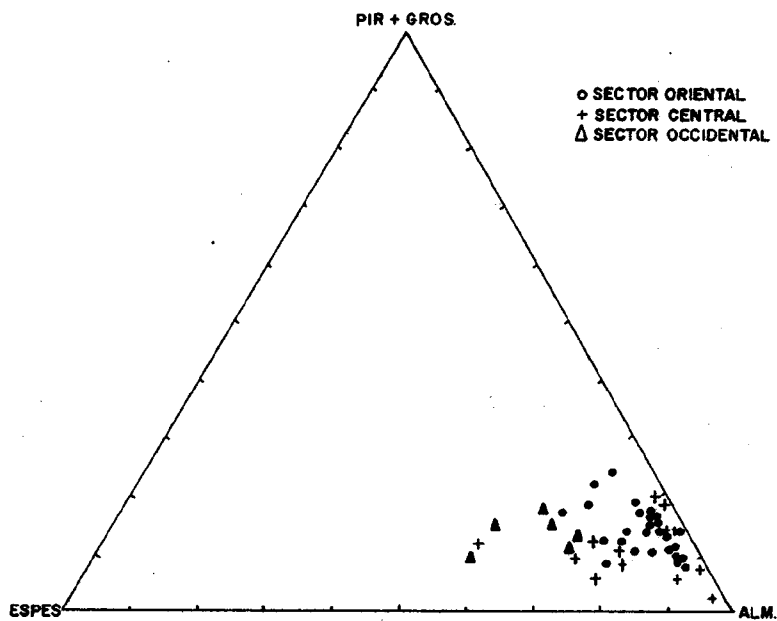
En la fig. nº 3 se representa la composición molecular de los granates de la zona.

Los granates se generaron en una primera etapa metamórfica caracterizada por un gradiente geotérmico intermedio. Posteriormente tuvo lugar un descenso importante de la presión y un aumento de la temperatura, y bajo estas nuevas condiciones los granates sufren un proceso de reabsorción, el cual queda evidenciado por el enriquecimiento en Mn en el borde del cristal, ó, cuando el proceso ha sido intenso, por la existencia de zonado inverso.

De todos los factores que influyen sobre la composición de los granates, el quimismo de la roca huésped debe de jugar el papel más importante, puesto que en cierto modo condiciona a todos los demás.

La composición de los granates de las rocas metamórficas es determinada fundamentalmente por la composición de la roca huésped, puesto

### COMPOSICION MOLECULAR DE GRANATES DE LA SIERRA DE GUADARRAMA



que las diferencias de composición entre los granates pueden explicarse por diferencias de quimismo de sus rocas huésped. Si durante el proceso metamórfico global tiene lugar un cambio brusco de las condiciones metamórficas, la relación roca huésped-granate queda profundamente alterada. Esto ha ocurrido en la mayor parte de las rocas de la Sierra de Guadarrama.

La dependencia existente entre las composiciones roca metamórfica-granate será menos evidente, en general, a medida que se consideran zonas de mayor intensidad de metamorfismo.

### 2.3.2. Granates de aplitas y granitos de Galicia Oriental

Los granitos hercínicos de Galicia oriental se subdividen en dos series:

- Una serie alcalina fuertemente ligada al metamorfismo regional y a la migmatización, resultado de la anatexia de la parte media de la corteza.
- Y una serie calcoalcalina, sin ligazón aparente con los procesos metamórficos, pero sí a rocas básicas como resultado de la fusión de la parte inferior de la corteza.

El granate es un mineral accesorio en los productos más diferenciados de estas dos series.

Se encuentra en los granitos muy ácidos, en las aplitas y en las pegmatitas de la serie alcalina, así como en los granitos y microgranitos de



la serie calcoalcalina. Por regla general es en los granitos y las apilitas de la serie alcalina donde es más frecuente.

### 3. ESTUDIO MINERO. TRATAMIENTO Y PROCESOS INDUSTRIALES

#### 3.1. Estudio minero

##### 3.1.1. Distribución de la producción y minas principales

###### A) Granate

A pesar de que el granate está muy difundido, los depósitos comerciales son muy pocos.

La producción de granate (para usos abrasivos) en 1974 se estimó en 25.560 t, lo que supone un incremento del 6% sobre 1973. Los principales países productores de acuerdo con esta estimación fueron:

Estados Unidos:	21.360 t
India :	3.640 t
URSS :	455 t
Australia :	82 t
Sri Lanka :	23 t

Como principales países productores de gemas de granate figuran: India, Ceilán y Brasil que producen almandino (en calidad gema).

En Estados Unidos (Utah-Arizona), se produce piropo gema, procedente de las arenas superficiales de Fort Defiance; también en Meronitz, Bohemia hay producción de la gema de piropo.

Otros países productores en menor proporción son: Egipto, Madagascar, Austria, Hungría, Japón, Argentina, Canadá, Tanzania y Sudáfrica.

La mayor parte de la producción de granate abrasivo procede de los Estados Unidos, casi exclusivamente de dos estados: New York e Idaho, siendo de menor importancia las minas de New Hampshire, Carolina del Norte y Massachusetts.

En el estado de New York, los depósitos más importantes son los de Barton y North Creek en el sudeste de Adirondack Mountains, donde el granate (almandino) se explota por tres compañías mineras.

El origen de estos depósitos es poco conocido.

Todas las rocas de la zona son precámbricas. El granate está contenido en un gneis cristalino que se presenta en una estrecha banda de dirección este, con una longitud de 1.300 m por 90 m de ancho y a poca profundidad. El depósito es como una lente inclinada 7 u 8 grados al oeste y limitada al norte por metagabro y al sur por sienita. Una característica notable en este yacimiento es la presencia invariable de una envoltura de hornblenda cristalina negra rodeando a cada granate. Esas envolturas tienden a aumentar de espesor con el tamaño del cristal de granate, llegando a tener hasta 5, 6, 7 cm. Los granates rojos, rodeados cada uno de ellos por la envoltura de hornblenda negra, en una matriz de gabro, presentan una imagen sorprendente en las paredes de la explotación.

La mina más importante es la de Barton Mines Corp. situada en Gore Mountain, cerca de North Creek, en Warren County. Lleva en explotación más de 75 años y sus reservas minerales son importantes. La explotación se realiza mediante métodos a cielo abierto con el empleo de bancos.

Las principales gangas minerales son la hornblenda, que constituye de un 40 a 80% de la roca y la plagioclasa e hiperstena, con pequeñas cantidades de biotita, apatito y pirita. Como ya se indicó anteriormente, el contenido en granate del criadero varía entre el 5 y 20%, con una media aproximada del 13%. Como norma general, no se tratan rocas cuyo contenido medio en granate sea inferior al 10% por no resultar económico.

En el estado de Idaho, existe otra compañía minera de gran importancia en la producción de granate abrasivo: Idaho Garnet Abrasive Co. situada en Emerald Creek en Benewah County. Esta compañía explota un depósito aluvial de almandino, que proviene de la erosión de esquistos micáceos blandos. La explotación se realiza con el empleo de dragalinas.

Por último cabe señalar las explotaciones de granate que se llevan a cabo en las arenas de playa en países como Argentina, Tanzania, Malasia y Sudáfrica.

#### B) Corindón

La producción mineral de corindón durante 1974 no experimentó -

apenas variaciones con respecto a 1973. Dicha producción se estimó en 10.800 t, siendo los principales países productores los siguientes:

URSS (Siberia y Los Urales):	7.000 t
Rhodesia	: 3.000 t
Sudáfrica	: 270 t
India	: 400 t

Otras pequeñas cantidades procedieron de: Kenya, Madagascar, Malawi, Malasia, Canadá y los Estados Unidos.

La explotación del corindón en Estados Unidos comenzó en 1871 por la Corundum Hill, N. C. Otras importantes compañías mineras eran la Clay County, en Buck Creek (North Caroline) y la Jackson County cerca de Sapphire (North Caroline)

En la actualidad la "American Abrasive Company", Westfield, Mass., subsidiaria de la "Bondix Corporation", es la única compañía que comercializa el corindón en los Estados Unidos, corindón importado principalmente de Sudáfrica pues las importaciones del corindón de Rodesia quedaron suspendidas a raíz de las sanciones económicas contra este país, establecidas en 1968. La "American Abrasive Company" y sus industrias auxiliares se ocupan de la compra, proceso de fabricación y venta de todos los tipos de materiales abrasivos.

Los depósitos de corindón de Sudáfrica, se explotan por métodos a cielo abierto, con la utilización de palas excavadoras, por la "American Abrasive Company". Hasta hace pocos años, las tres cuartas partes de la producción de corindón natural procedían de estos depósitos, pero en la actualidad su importancia ha disminuido, y es Rodesia quién tiene la mayor producción mundial, exceptuando Rusia cuyo material no se comercializa fuera de los países del bloque soviético.

### C) Esmeril

La producción minera de esmeril en 1974 totalizó alrededor de --- 120.000 t, siendo los principales productores:

Turquía	:	80.000 t
Grecia	:	8.000 t
Estados Unidos:		8.000 t

La URSS, produce igualmente una importante cantidad aunque se desconocen las cifras exactas. Otros países productores de esmeril en menor cuantía son: Australia, Alemania Federal, Uruguay e Irán.

La explotación del esmeril en los Estados Unidos, comenzó cerca de Chester, Mass., en 1868. Otras minas se abrieron posteriormente en Peekskill, N. Y. (1883) y cerca de Whittles, Virginia (1917). La explotación de las minas de Massachusetts cesó en 1912 y en -

1923 cesaban las de Virginia. A partir de 1968, tres compañías mineras reúnen la casi totalidad de la producción de esmeril en los Estados Unidos. Son la "Di Rubbo American Emery Ore Co.", en la mina Kingston, "De Luca Emery Mines, Inc.", en la mina De Luca nº 2 y "Peeshill Emery Co.", en Peeskill. Las tres están enclavadas en Westchester County, New York y es otra firma comercial, "American Abrasive Company" así como sus subsidiarias - quien compra y distribuye la casi totalidad del esmeril de los Estados Unidos.

Todas las explotaciones mencionadas se realizan mediante minería a cielo abierto, con los métodos de perforación y voladura adecuados.

El esmeril griego procede exclusivamente de la isla de Naxos en el Egeo. Sus cualidades abrasivas se conocen desde hace más de 2.000 años. Desde hace unos 100 años el esmeril turco comenzó a entrar en el mercado mundial y Turquía es actualmente el principal país - productor.

Tanto el esmeril griego como el turco se explotan por la "Washington Mills Abrasive Co.", "Nort Grafton, Massachusetts y por la "Hamilton Emery and Corundum Co.", subsidiaria de la "Ameri-can Abrasive Company".

### 3.1.2. Reservas aparentes

#### A) Granate

Sólo en el Estado de New York (EE. UU.) existen reservas conocidas de granate de alta calidad. Una estimación aproximada cifraba en 200.000 t la cantidad de granate que puede ser recuperado del depósito principal. En el Estado de Idaho (EE. UU), Emerald Creek, se calculan unas reservas de 500.000 t de un granate de menor calidad, en la zona donde la explotación se está llevando a cabo.

Las reservas en el resto del mundo no se conocen debido quizá a la poca importancia que el granate tiene en otros países. No es conocida la existencia en cantidades comerciales fuera de los Estados Unidos, del granate abrasivo de alta calidad que se produce en el Estado de New York

#### B) Corindón

No existen reservas conocidas de corindón en los Estados Unidos y Canadá.

La República de Sudáfrica, Rodesia del Sur y la India tienen depósitos que se encuentran en grandes zonas. El corindón de Sudáfrica aparece en cientos de depósitos y zonas que totalizan miles de kilómetros cuadrados y aunque la mayor parte de los depósitos in-



dividuales son pequeños, las reservas acumuladas alcanzan probablemente varios millones de toneladas. Las reservas estimadas en los depósitos de la India están entre las 650.000 a 1.750.000 toneladas. Malawi, Mozambique y la República de Madagascar tienen depósitos sustanciales y se sabe de la existencia de corindón en otros países como Brasil y Malasia. La URSS debe poseer los mayores depósitos mundiales de corindón en los Montes Urales y Siberia Central.

### C) Esmeril

Los datos de las reservas mundiales de esmeril son incompletos, pero el total es evidentemente grande. Una cifra provisional de 10 millones de toneladas se utiliza solamente para indicar el orden probable de magnitud de las reservas mundiales disponibles a los precios equivalentes a los predominantes en 1968.

Los depósitos de esmeril cerca de Peekskill, N. Y., se estimaron por la Federal Bureau of Mines en 1955, como poseedores de unas reservas de 60.000 toneladas.

Los depósitos de esmeril en Virginia han sido inútiles durante 35 años y los de cerca de Chester, Mass., no se explotan desde 1913. Se conoce la existencia de esmeril en Pennsylvania y Carolina del Norte.

Los depósitos de esmeril de Grecia y Turquía tienen grandes reservas. Una estimación parcial para Turquía, basada únicamente en -

el estudio de grandes depósitos, da como resultado de 3 a 5 millones de toneladas, y los depósitos de la isla de Naxos (Grecia) se piensa que contienen al menos un millón de toneladas. Reservas menores se conocen en Bavaria, Alemania Federal. El esmeril de URSS no entra dentro del mercado del mundo libre.

Las reservas totales se piensa que son muy amplias.

### 3. 2. Tratamientos y procesos industriales

#### 3. 2. 1. Concentración de los minerales

##### A) Granate

El granate se somete normalmente a un número determinado de -  
tratamientos en la mina, consistentes fundamentalmente en:

- a) Clasificación manual.
- b) Trituración, tamizado y concentración posterior para la recu-  
peración de los cristales diseminados. Conviene señalar que -  
en algunos casos son los propios compradores los que realizan  
en sus propias plantas la molienda y clasificación final del pro-  
ducto, de acuerdo con los usos a los que destinan el granate.

La trituración se realiza de una manera escalonada, pues según -  
los usos interesará que el producto esté finamente molido (que pue-  
da pasar el tamiz de 300 mesh) o bien se deberán evitar los finos  
como ocurre en los papeles y telas abrasivas. Normalmente se -  
utilizan en esta fase de trituración las trituradoras de mandíbulas  
si es primario o bien el Cono Simmons en circuito cerrado en la  
trituración secundaria. Después de cada trituración se realiza un  
tamizado para clasificar los tamaños.

La etapa de concentración subsiguiente se puede realizar por vía -  
seca o por vía húmeda.

Los concentradores que funcionan por corriente de aire son utilizados en algunas plantas de Estados Unidos para eliminar la mica y el feldespató o cuarzo; el producto así tratada es sometido a un tratamiento magnético para la recuperación de los esquistos de cianita.

La depuración electrostática es efectiva particularmente para la separación de la mica, pero su uso ha decrecido enormemente en favor de los métodos de separación gravimétrica, experimentados en varias plantas (cribas hidráulicas) de tratamiento de los Estados Unidos.

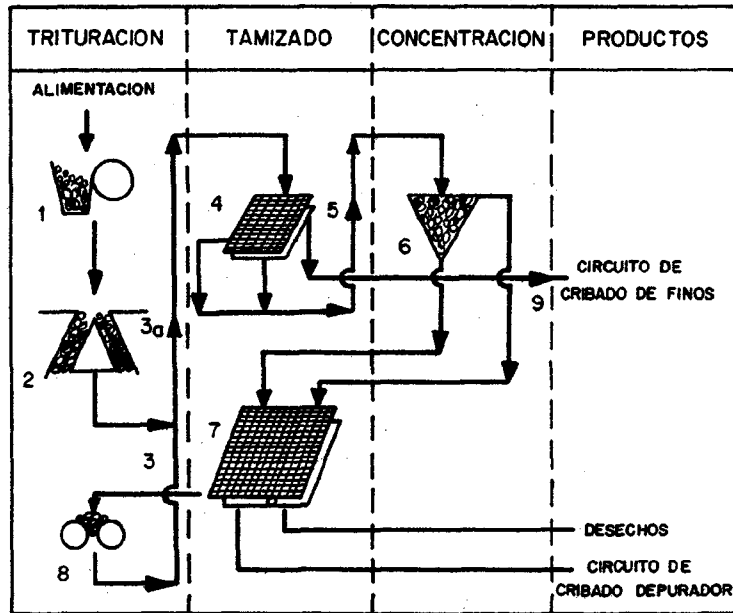
La concentración por líquidos densos se realiza en la Barton Mines Corporation, mediante el uso del ferrosilicio. El granate de peso específico superior al de la hornblenda con la que va ligado, se deprime, mientras la hornblenda flota y se separa. La recuperación mediante flotación por espuma se aplica a los tamaños inferiores a 60 mesh.

Una vez realizados estos tratamientos el producto se almacena como concentrado de granate.

Los concentrados que tienen un contenido en granate de un 98% se muelen, se clasifican según su tamaño y se someten a un proceso de calentamiento variable según las especificaciones del mercado.

En la fig. nº 4, se representa un esquema del tratamiento efectuado por la Barton Mines Corp. en las minas de North Creek, New York.

DIAGRAMA DE PROCESOS DEL GRANATE



LEYENDA

- 1 TRITURADORA DE MANDIBULAS
- 2 TRITURADORA DE CONOS
- 3 APARATO TRANSPORTADOR; ALMACEN DE MINERAL TRITURADO
- 3a ELEVADOR DE CANGILONES
- 4 TAMIZADO
- 5 CORRIENTE DE ALIMENTACION COMPUESTA DE UN 60 a 70 % DEL PRODUCTO MOLIDO
- 6 CONO DE FLOTACION POR LIQUIDOS DENSOS
- 7 TAMIZADO
- 8 MOLINO DE CILINDROS
- 9 CLASIFICADOR HIDRAULICO
- 10 CRIBAS HIDRAULICAS HOOPER
- 11 CRIBAS HIDRAULICAS JAMES. LOS TAMAÑOS INTERMEDIOS SON MOLIDOS POR UN MOLINO DE BARRAS Y SE REENVIAN A 3 a.

## TERMOTRATAMIENTO

Prácticamente todo el granate granular utilizado hoy día es sometido a un tratamiento térmico en función del proceso de fabricación y no con el propósito de aumentar la abrasividad inherente. Las impurezas captadas durante el proceso de fabricación se adhieren a la superficie de las partículas de granate y destruyen la pureza y capilaridad necesaria para el tratamiento posterior de aglutinación.

A principios de 1930 se pensaba que mediante una calcinación se aumentaba la dureza, tenacidad y fractura de las temperaturas podría ocasionar también un incremento en la calidad del abrasivo. Se llegaron a temperaturas de 1.000°C para algunos productos.

A comienzos de 1960 se llegó a determinar después de profundos estudios científicos, que las altas temperaturas podrían llegar a destruir la calidad abrasiva del granate y que el tratamiento térmico únicamente conseguía la limpieza de las superficies de las partículas o a lo más producía un calentamiento superficial de las fracturas microscópicas de la superficie del grano.

A mediados de 1960 la industria de las telas y papeles abrasivos aceptó unos colores "standards" uniformes, asegurando la pureza de la superficie del grano y presentando un color standar más estrechamente aproximado al color natural rojo del granate abrasivo. Este grado de termotratamiento se conoce bajo el nombre de tratamiento RT.

### B) Corindón

Los procesos seguidos en la preparación del corindón comercial constan de una trituración del mineral, posterior tamizado y concentración del mismo.

En Canadá se utilizan cribas hidráulicas y mesas de concentración Wilfley para obtener concentrados de un 55% a partir de un mineral de 10,5% de riqueza. El producto una vez seco se le somete a una separación magnética siendo concentrado entonces mediante mesas Wilfley o cribas de aire. Finalmente vuelve a realizarse otra separación magnética y se le clasifica por tamaños mediante tamices vibratorios antes de ser empaquetado para su venta. Los concentrados contienen de un 90 a 95% de  $Al_2O_3$ .

### C) Esmeril

Las impurezas presentes en el esmeril, están tan finamente divididas y tan íntimamente asociadas con el corindón, que su separación completa resulta difícil y no es comercialmente posible.

Los tratamientos realizados sobre el esmeril comercial se reducen fundamentalmente a una fracturación, por lo común mediante machacadoras de mandíbulas o molinos de bolas en serie, pasando luego el material hacia unas cribas vibratorias que tamizan y clasifican el producto en tamaños según las especificaciones requeridas en el mercado. La mica presente en el esmeril se separa mediante corrientes de aire ascendentes, después de la trituración.

## 4. USOS

### 4.1. Granate

De las siete variedades del granate, fundamentalmente tres son de importancia comercial: almandino o granate común, rodolita y andradita, destacando el almandino como la principal variedad industrial.

Sus utilizaciones fundamentales son dos: como abrasivo o como piedra preciosa.

#### 4.1.1. Telas y papeles abrasivos

Alrededor de un 90% del granate utilizado en la industria, se emplea en la fabricación de papeles y telas abrasivas.

El granate abrasivo se utiliza en forma de telas y papeles abrasivos ante todo para el lijado de maderas duras ya que su efectividad es de dos a seis veces superior a la del papel de lija. Se emplean también en el acabado del caucho endurecido, celuloide, apresto del cuero, manufactura de calzados, superficies barnizadas y pintadas así como en el acabado de superficies de metales blandos (cobre y latón).

En algunas aplicaciones el uso de telas y papeles abrasivos de granate se ha incrementado notablemente debido a la utilización de resinas como material ligante.



En la actualidad son de uso general los llamados "abrasivos electrostáticos", en cuyo proceso de fabricación un campo electrostático da origen a que los granos queden en posición vertical sobre el ligante que va encima del soporte. Se consigue así que los filos cortantes - queden perpendiculares al soporte así como que los granos tengan un espaciamiento más uniforme debido a la fuerza de repulsión que cada grano ejerce sobre los demás.

Las telas y papeles abrasivos de granate constituyen aproximadamente del 10 al 11% del volumen total de telas y papeles abrasivos producidos durante los últimos años. Este porcentaje se ha mantenido constante a pesar del crecimiento general de la economía y las sustituciones de los papeles y telas abrasivos por otros métodos de pulimentado.

La "Barton Mines Co.", es la compañía que abastece de granate a todas las plantas de telas y papeles abrasivos en los Estados Unidos y Canadá y a una gran proporción en el resto del mundo, así como a una gran parte de la industria mundial de pulimentado de lentes ópticas.

#### 4.1.2. Pulimento del vidrio

Durante la 2<sup>a</sup>. guerra mundial se hizo necesario la búsqueda de nuevos abrasivos que sustituyeran al corindón en el pulimentado de lentes ópticas, debido a las dificultades de obtención de este material.

El granate era el mineral que tenía las propiedades más convenientes, aunque nunca se había utilizado con anterioridad en esta aplicación. - Los resultados obtenidos fueron muy buenos mejorando la calidad y la economía de los productos obtenidos, factores que han hecho del granate un abrasivo competente para esta aplicación así como la creación de nuevos mercados en las industrias del vidrio, plásticos, cerámicas y metales blandos.

#### 4.1.3. Granos sueltos

Una utilización importante del granate bajo la forma de granos sueltos es para el limpiado con chorro de arena. El granate posee la ventaja de no tener sílice libre y por lo tanto no puede causar silicosis. El granate es más pesado que la arena cuarzosa, de tal manera, que a igualdad de tamaño en los granos, los de granate dan un golpe más intenso. Gran parte de la producción de granate de Estados Unidos se vende a las industrias aeronáuticas como agente de limpieza con chorro de arena.

#### 4.1.4. Gemas

Algunos granates se comercializan para tallarlos como gemas semipreciosas. El valor de estos granates es pequeño y poco importante. Por lo común la gema de granate se produce en aquellos lugares del mundo en los que la mano de obra es barata.

Las piedras preciosas más importantes de la familia del granate son:

- **Piropo:** es la variedad color rojo sangre que a menudo se confunde con el rubí y a la que se da los nombres de granate de Bohemia, rubí de El Cabo y rubí de Anyma.
- **Almandino:** Variedad color carmesí oscuro, llamado carbunco
- **Rodolita:** Variedad color rojo frambuesa, muy atractiva, procedente de Carolina del Norte (Estados Unidos).
- **Grosularia:** Variedad anaranjada o amarilla a la que se conoce con los nombres de hesonita y piedra de cinamomo, y grosular que se confunde con el jade.
- **Espesartina:** Variedad rojo-anaranjada.
- **Andradita:** De un bello color verde, no muy frecuente, denominada demantoide que tiene un buen fulgor y se la denomina a veces aunque erroneamente "esmeralda árabe" u "olivino".

#### 4.1.5. Otros usos

El granate en granos se utiliza para la manufactura de muelas abrasivas, como producto antideslizante y como medio filtrante. Reducido a polvo se utiliza en compuestos abrasivos para el pulido de piedras ornamentales, placas de vidrio, etc. En la industria del mármol

mol y pizarra se utilizan igualmente los granates para el aserrado - de esos materiales, así como para su pulido. Finalmente se ha utilizado el granate en la manufactura de las ferritas.

El granate para todos sus usos como abrasivo, se comercializa en tamaños estandarizados entre 20 y 200 mallas.

#### 4.2. Corindón

Tanto el corindón como el esmeril, tienen a nivel mundial y desde el punto de vista de producción y consumo una importancia relativamente pequeña.

Cuando los abrasivos como el carburo de silicio y la alúmina fundida, fabricados artificialmente en el horno eléctrico, llegaron a ser comercialmente útiles y alcanzaron precios razonables, fueron sustituyendo gradualmente al corindón y al esmeril naturales, que perdieron así importancia, hasta quedar limitados a un número reducido de aplicaciones.

El progreso continuo de los abrasivos artificiales ha puesto en peligro el mercado de los abrasivos naturales que tan sólo representa en la actualidad un 2% del de los abrasivos artificiales.

Las principales utilizaciones del corindón se resumen a continuación.

##### 4.2.1. Abrasivo

Según Kupferberger existen una serie de características físicas en el corindón que proporcionan una guía orientativa sobre su valor como abrasivo. Dichas características se recogen en el cuadro nº 3.

Sin embargo, como norma general, el valor industrial del corindón como abrasivo sólo se puede determinar mediante ensayos prácticos.

CUADRO Nº 3.

CARACTERISTICAS FISICAS DEL CORINDON COMO ABRASIVO

Características	Favorable	Desfavorable
Brillo	Con brillo, vítreo a adamantino	Opaco o perlado
Fractura	Irregular o astillosa	Regular o lisa.
Cruceros o planos de separación	Carencia	Bien desarrollados.
Inclusiones	Carencia o muy escasas	Presencia de mica, rutilo, ilmenita, etc.

Fuente: Minerals for the Chemical and Allied Industries.

Los principales usos abrasivos del corindón son los siguientes:

a) en la fabricación de algunos tipos de muelas abrasivas, b) en forma de granos sueltos se utiliza en papeles y telas abrasivas, - c) acabado de lingotes de hierro y piezas de acero fundido, d) pulimentado de vidrio (óptica) y piedras preciosas. Se requiere que el corindón esté finamente molido. e) Como revestimiento de molinos así como en bolas de molino.

El tipo de pasta utilizado para las muelas abrasivas, es un abrasivo aglutinado, de granulometría determinada, formada por carburo de silicio, corindón, esmeril. Arcilla aglutinante, 6,3%; Feldespato 13,7% y lejía de sulfito.

La preparación consiste en un mezclado en seco, adición de agua y lejía de sulfito y finalmente un nuevo mezclado.

Posteriormente se moldea en una prensa hidráulica (40 Atm). El secado se logra en bandejas calentadas por vapor.

Cochura: A 1.300°C en horno intermitente circular o rectangular, con un ciclo de 130-150 h. El acabado consiste en una rectificación y eliminación de rebabas.

Las llamadas muelas abrasivas elásticas tienen como material ligante caucho o goma-laca y más recientemente se han utilizado resinas sintéticas como la bakelita.

#### 4.2.2. Refractario

El corindón finamente molido, aglutinado con arcilla, ha sido también utilizado para la fabricación de crisoles refractarios. Para este fin el mineral se muele hasta que pase el tamiz de 200 mallas; su contenido de alúmina puede ser del 90% y su contenido en óxido de hierro no debe exceder en mucho al 3%. No hay límite en el porcentaje de sílice, pero el feldespató no conviene que esté presente. La máxima temperatura de utilización es de aproximadamente 2.000°C.

La mejor variedad de corindón para usos refractarios proviene de los depósitos de Rodesia, Africa del Sur y Canadá.

#### 4.2.3. Otros usos

En la fabricación de superficies antideslizantes se ha utilizado corindón de baja calidad, molido a 120 mallas y con contenidos inferiores al 2% en hierro y ausencia total de feldespató.

Las variedades transparentes y puras de corindón como el rubí y el zafiro tienen importancia como piedras preciosas.



### 4.3. Esmeril

Los principales usos del esmeril son los siguientes:

- . Fabricación de muelas abrasivas
- . Papeles y telas abrasivas.
- . En forma de granos y reducido a polvo para el pulimento del vidrio y limpieza de piezas (agitación en el tambor).
- . Como material para superficies antideslizantes.

#### 4.3.1. Muelas abrasivas

La utilización del esmeril en la fabricación de muelas abrasivas, es la aplicación más importante de este material en los Estados Unidos, uno de los mayores consumidores del mundo.

Como ocurre con el corindón, la dureza del esmeril y sus propiedades abrasivas varían considerablemente con la localización de los diferentes depósitos.

El esmeril griego de la isla de Naxos, caracterizado por su alto contenido en alúmina, gran estabilidad cuando se somete a un calentamiento intenso, así como por la dureza y fragmentación angular de sus granos es el tipo más apropiado para la fabricación de muelas abrasivas. Hay sin embargo, algunos depósitos en Turquía que contienen un esmeril más duro que el de Naxos y se utiliza también con este fin.

Hay que destacar que el uso de esmeril como abrasivo data de hace mucho tiempo, pero su utilización a escala industrial comenzó en 1870 con la invención de las muelas abrasivas.

#### 4. 3. 2. Papeles y telas abrasivas

Para la fabricación de papel y tela abrasiva de esmeril se utiliza fundamentalmente el esmeril turco, más blando que el de Naxos, poco estable con el calor y que sufre fracturación bajo presión.

#### 4. 3. 3. Otros usos

El esmeril americano, mucho más blando que los anteriores, tiene su aplicación fundamental en la composición de preparados para superficies antideslizantes y pisos de hormigón resistentes al desgaste. Los tamaños más finos del esmeril turco y griego se utilizan en el pulimentado y biselado del vidrio (óptica), así como de ciertas rocas ornamentales y piedras preciosas.

Otras aplicaciones del esmeril son las siguientes: en la fabricación de pulidoras, desbastado del arrabio; en trozos gruesos se emplea a veces en el molido de sustancias tales como: talco, barita, carbonato cálcico, etc., para su posterior utilización en pinturas.

El esmeril se prefiere en general como abrasivo en las utilidades en las que el corindón podría ser demasiado duro.

Por último hay que señalar el uso del esmeril en los revestimientos refractarios de los nuevos hornos de fusión de metales y fundiciones.

En el cuadro siguiente nº 4, se resumen las principales aplicaciones como abrasivos del granate, corindón y esmeril.

CUADRO Nº 4.

APLICACIONES ABRASIVAS DEL GRANATE, CORINDON Y ESMERIL

Material	Abrasivo	Principales usos
Corindón	Ruedas	Corte de metales, pulimentado de lentes - ópticas.
Esmeril	Papeles y telas	Metales y madera dura; óptica.
	Ruedas	Pulimentado de metales.
	Papeles y telas	Metales y madera dura.
Granate	Granos sueltos	Acabado y pulimentado de metales; esme- rilado de cristales.
	Papeles y telas	Maderas duras; superficies de pintura y barnizados.
	Granos sueltos	Esmerilado de cristales.

Fuente: Yacimientos minerales de rendimiento económico.

## 5. CALIDADES Y ESPECIFICACIONES

### 5.1. Granate

No existe un método exacto para determinar con precisión la calidad de un granate o cualquier otro abrasivo, que no sea mediante su aplicación práctica. Sin embargo, hay algunas pruebas preliminares que pueden dar una orientación sobre su poder abrasivo y sobre esta base prácticamente el 100% del granate que se comercializa en la actualidad, es un producto cuyo tamaño y calidad están especificados.

Las normas establecidas por la "National Bureau of Standards" de los Estados Unidos, son las que rigen los criterios de calidad, ensayos normalizados, clasificaciones, etc., de los granates que se comercializan en el mundo.

Las normas de calidad referentes a su uso en papeles y telas abrasivas así como de los tamaños micronizados utilizados en el pulido de vidrios y metales tienen unas tolerancias muy estrechas.

Las calidades utilizadas en la fabricación de muelas abrasivas y limpieza con chorro de arena tienen diferentes normas y unas tolerancias superiores. Por último existen un gran número de calidades especiales para los usos restantes del granate.

Las propiedades físicas del granate constituyen un factor muy importante en sus aplicaciones abrasivas, destacando sobre toda la dureza, tenacidad y fractura del mismo.

La dureza no debe ser inferior a 7,5 (escala Mohs) siendo más favorable valores más altos. Tanto la dureza como la tenacidad pueden ser determinadas en el laboratorio por comparación con otros materiales cuyos valores sean conocidos.

En cuanto a la fractura, se exige que en la molienda, incluso a tamaños finos, se formen fragmentos angulares con bordes agudos, pues los fragmentos de bordes redondeados son poco aptos para las aplicaciones abrasivas. También se determina previamente mediante un análisis microscópico, la existencia de inclusiones de otros minerales en la estructura del granate que pudieran debilitar su poder abrasivo.

La tenacidad y fractura de los granates férricos se mejoran mediante un calentamiento progresivo hasta 800°C durante 12 horas, seguido de un enfriamiento rápido. Este proceso se utiliza muy a menudo en los Estados Unidos (Termotratamiento).

Para su uso como abrasivo el color no es un factor importante, pero la mayor parte de los productores prefieren el rojo intenso.

El "U. S. Bureau of Standards" creó una máquina para la realización de una serie de pruebas para materiales abrasivos; en un principio se diseñó para la comprobación de la calidad del corindón pero posteriormente se amplió para realizar pruebas de la calidad de cualquier tipo de abrasivos en grano suelto, incluido el granate.

Finalmente hay que señalar como se indicó anteriormente que la eficiencia del granate para sus aplicaciones como abrasivo no puede ser determinada únicamente mediante una serie de pruebas estandarizadas, dependiendo el criterio final de su conducta bajo las condiciones de trabajo reales.

## 5.2. Corindón

Debido a la variación en las propiedades abrasivas del corindón natural procedente de depósitos diferentes, es de gran importancia clasificarlo antes de su comercialización. De este modo en Sudáfrica, uno de los principales países productores, el gobierno no permite la exportación del corindón sin que haya sido previamente autorizado por el "Chief Grader" o su delegación. El corindón sudafricano se exporta bajo las siguientes formas:

1. Bloques de corindón
2. Cristal de corindón
3. Concentrados de corindón
4. Corindón en grano

El corindón en bloque se define como cualquier roca portadora de corindón que no haya sufrido ningún tratamiento mecánico excepción hecha de la reducción al tamaño conveniente. El cristal de corindón consiste en cristales de corindón en bruto procedentes de depósitos eluviales o de depósitos de alteración de filones in situ. El corindón concentrado es el producto que se obtiene por molienda y concentración de cualquier roca que contenga corindón para eliminar los materiales que constituyen la ganga y estériles, pero está sin clasificar según el tamaño. El nombre de corindón en grano se da al concentrado con una mayor preparación y clasificado en tamaño.



Antes de que se exporte el cristal de corindón debe ser sometido a un análisis químico para determinar su contenido de alúmina y también - se somete a una prueba de tamizado. La clasificación de acuerdo con el contenido de alúmina es como sigue:

- A- Contenido superior al 92% de  $Al_2O_3$
- B- Conteniendo al menos un 92% de  $Al_2O_3$ , y no inferior al 90% de  $Al_2O_3$ .
- C- Entre 90 y 85% de  $Al_2O_3$ .
- D- Menos de 85% de  $Al_2O_3$ .

La clasificación según el tamaño es la siguiente:

1. Grueso: Queda retenido en un tamiz de agujeros redondos de 1/2 pulgada de diámetro.
2. Medio: Entre 1/2 y 1/4 de pulgada.
3. Fino: Entre 1/4 y 1/8 de pulgada.
4. Mixto 0 C/4: Tamaño superiores a 1/8" con un contenido en  $Al_2O_3 > 85 \%$ .

Las diversas calidades del cristal de corindón preparado para la exportación llevan la indicación de su contenido en alúmina así como su tamaño.

El corindón concentrado se clasifica únicamente de acuerdo con su contenido en alúmina. En orden a lograr un porcentaje productivo de recu-

peración y un concentrado con un 92% de alúmina es necesario moler la roca hasta que todo el material pudiera pasar a través de un tamiz de 8 mallas. El tamaño de los granos en el concentrado por esta razón está comprendido desde 1/8 pulgada hacia abajo.

El corindón en grano se clasifica sobre la base de su contenido en alúmina y se clasifica también en varios tamaños comerciales que exigen los consumidores y lo autoriza el Chief Grader. Algunos consumidores, además de la especificación del porcentaje de alúmina, exigen también que el mineral tenga un peso específico no inferior a 3,70 y que no contengan más del 10% de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y 5% de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

El corindón sudafricano tiene la ventaja de que, en la molienda, se rompe gradual y continuamente con aristas vivas, partículas facetadas, de manera que siempre presenta una superficie reciente y fresca. Esta propiedad es muy ventajosa en el pulido y acabado de instrumentos ópticos así como en la fabricación de las muelas abrasivas.

Los trece tamaños de corindón en grano utilizados en los Estados Unidos para el pulimentado y acabado de las lentes ópticas varían entre las 60 y 275 mallas. Para el uso en muelas abrasivas, se utilizan 11 tamaños, que oscilan entre las 8 y 54 mallas. Las calidades más demandadas en EE. UU. se preparan en Sudáfrica clasificándolas como sigue: A-1, A-2, B-3 y C-4. Además, cinco calidades de tamaños más finos, denominadas "polvos de corindón" y utilizadas para un superpulido, son obtenidas del mineral molido que pasa el tamiz de 220 ma -

llas, determinándose esas calidades por el tiempo en el que el polvo se haya sedimentado en agua.

El U.S. National Stockpile Material Purchase Specification P-18 de 3 - de Enero de 1951, comprende tres calidades, referidas tanto al cristal de corindón natural así como a los concentrados de corindón, propuestas primordialmente para su utilización como abrasivos. Esos productos debe cumplir una serie de especificaciones referidas al:

- 1): Contenido en corindón
- 2): Tamaño
- 3): Valor del abrasivo y rotura de grano.

El contenido de corindón, que se determina con un ensayo de lixiviación-petrográfica, no debe ser menor de los porcentajes siguientes:

<u>Calidad</u>	<u>Cristal de corindón</u>	<u>Concentrado de Corindón</u>
	% mínimo	% mínimo
A	87,5	85,5
B	85,5	83,5
C	80,0	80,0

El ensayo de lixiviación-petrográfica se realiza colocando una muestra de material molido y tamizado, en un crisol de platino y añadiendo ácido sulfúrico concentrado y ácido fluorhídrico. Se pone al baño María - hasta que todo el FH se elimine.

Finalmente se calienta hasta que los vapores de  $\text{SO}_3$  salgan copiosamente. Se lleva a un vaso de precipitado y se le añade ácido clorhídrico; se coloca sobre la placa para calentar y se calienta durante 20 minutos para disolver todos los sulfatos solubles. Se diluye con agua caliente y se calienta durante otros 10 minutos.

Se filtra y se lava primero con  $\text{ClH}$  al 5%, luego con agua caliente y luego tres veces con  $\text{KOH}$  caliente al 10%, para volver a lavarlo con  $\text{H}_2\text{O}$ . Se examina el residuo con el microscopio petrográfico para determinar la existencia de otros minerales insolubles tales como la cianita y el rutilo. Si están presentes, se hace un recuento petrográfico de los granos del residuo para obtener el valor correcto.

En cuanto al tamaño, para la calidad A de cristal de corindón, no debe pasar más del 5% por un tamiz de 3 mallas del U.S. Standard.

Para los cristales de calidades B y C, el límite es del 5% que pasen por el tamiz de 7 mallas de la U.S. Standard. Para los concentrados de cristal de corindón se exige un tamaño variable entre 1/4 pulgada hasta las 16 mallas, con un máximo del 5% que pasen por el tamiz de 20 mallas del U.S. Standard.

El valor del abrasivo así como la rotura del grano se determinan por medios definidos por el U.S. National Bureau of Standards Field Abrasion Tester (N.B.S., T.R. 1482). El método consiste en la comparación de las propiedades del tipo de corindón abrasivo ensayado con las de un abrasivo standard que es el E.L. Alundum X, cuando se usa en

una muela abrasiva trabajando sobre una muestra de una placa de vidrio standard.

Se especifican ciertos valores mínimos para establecer una proporción entre el efecto abrasivo del corindón natural y el abrasivo standard artificial.

### 5. 3. Esmeril

No existen especificaciones generales para el esmeril. Su valor depende fundamentalmente de la pureza, dureza y tenacidad del material.

El esmeril griego y turco que llega a los Estados Unidos en bloques de 25 libras se muele en diferentes tamaños según sus usos.

- 12 tamaños de grano grueso entre 6 y 46 mallas.
- 12 tamaños de grano fino entre 54 y 220 mallas.
- 4 calidades diferentes de esmeril en polvo que se denominarán: F, FF, FFF y FFFF.

Los polvos más finos se utilizan en trabajos ópticos. El esmeril que contiene altos porcentajes de corindón es adecuado para la fabricación de muelas abrasivas. Finalmente se requiere un producto más fiable para trabajos de pulimentado.

## 6. PRODUCTOS SUSTITUTIVOS

El principal obstáculo para el uso en gran escala de los abrasivos naturales tales como el granate, corindón y esmeril, es la dificultad de -- mantener una calidad uniforme, ante la gran uniformidad que presentan los productos artificiales.

Por este motivo en los últimos años se ha ido reduciendo la demanda de abrasivos naturales y productos, como el carburo de silicio y la alúmina fundida artificial preparados en el horno eléctrico, han cobrado un - gran incremento.

El corindón artificial se fabrica en gran escala a partir de las bauxitas por calentamiento y termofraguado, obteniéndose así también el esmeril artificial.

Los rubíes y zafiros sintéticos, coloreados con pequeñísimas cantida\_ - des de cromo y titanio, se vienen fabricando desde 1902 por el proceso Verneuil. Se obtienen fundiendo en el soplete oxhídrico o en el horno - eléctrico, polvo de alúmina pura con  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ó Co y Fe + Ti.

La alúmina obtenida artificialmente en el horno eléctrico ha sustituido al corindón en sus aplicaciones como refractario. Se utiliza como bloques electrofundidos y como fracción granulométrica en los refractarios de alto contenido en alúmina.

Los problemas fundamentales así como las perspectivas que afectan a cada uno de los minerales considerados, se analizan en los siguientes - apartados.

### 6.1. Granate

Los problemas que se presentan a los productores de granate se resumen en los siguientes puntos:

- Costes de los desarrollos tecnológicos
- Costes de mantenimiento
- Aumento de las ventas ante la enorme competencia de otros abrasivos, tanto naturales como artificiales.

En general cada tipo de abrasivo, tiene una aplicación en la cual supera al resto de los abrasivos, pero existen unas aplicaciones en las que las características de los mismos coinciden y es ahí donde se establece una fuerte competencia. El coste relativo es la base de esa competencia y en él influyen decisivamente los costes de molienda así como del resto de la elaboración.

El granate ha conservado su posición relativa dentro del mercado de expansión de los abrasivos y los productores han redoblado su esfuerzo para el mantenimiento de las reservas necesarias de mineral, mediante un programa de exploración y la aplicación de nuevas tecnologías en la explotación minera que permitan el uso económico de minerales de baja ley.

A pesar de que el granate está muy extendido en el mundo, la mayor parte es de una calidad que no resulta competitiva. Existen sin embaro



go nuevas fuentes potenciales y nuevas técnicas que permitirán obtener el granate como subproducto con una calidad aceptable. Para esto se requiere una inversión de capital grande que unido al mercado relativamente pequeño y muy especializado de este material se opone a la puesta en explotación de nuevos depósitos.

## 6.2. Corindón

Muchos mercados tradicionales del corindón (en vidrio y metal, sobre todo), acabaron por ser sustituidos, como consecuencia de las sanciones económicas establecidas contra el material procedente de Rodesia en el año 1968. En Estados Unidos el futuro de la utilización del corindón parece depender de la resolución del problema político de Rodesia y la reanudación del comercio entre ambos países. De lo contrario el agotamiento de los "stocks" disponibles forzaría a cambiar por otras las fuentes del corindón o a utilizar otros abrasivos.

En la actualidad parece existir una tendencia de atraer hacia el corindón el interés de la industria minera mediante la puesta en práctica de un programa de exploración así como de la aplicación de los nuevos desarrollos mineros.

En 1974, la evolución más pronunciada en la demanda de corindón fué en la calidad de polvo, como consecuencia del aumento de los precios de los productos sustitutivos. De cara al futuro se cree que la mayor demanda se deberá a su utilización en el acabado de los metales, mientras que su aplicación en el pulimento de lentes ópticas sufrirá una disminución o bien un incremento muy débil.

Los avances tecnológicos para el futuro incluyen:

1. Una mayor automatización en los procesos de elaboración.
2. Un incremento en las velocidades de rectificación y acabado en los trabajos realizados sobre los metales.

3. Un continuo desarrollo de los abrasivos artificiales según las especificaciones demandadas por los consumidores.

Estos avances tecnológicos reducen en general la necesidad de utilizar corindón natural sobre todo en los países de gran desarrollo industrial.

En Africa y en la India donde no existe una gran producción de abrasivos artificiales y en donde se están adoptando actualmente los métodos modernos de producción, son lugares adecuados para que se incremente el uso del corindón en los procesos de elaboración de abrasivos. El corindón podría igualmente utilizarse en gran cantidad, en algunas zonas de producción como material de bajo coste, para su aplicación en la construcción de superficies antideslizantes y carreteras.

### 6.3. Esmeril

Los principales factores que coartan el crecimiento en la utilización del esmeril natural son los siguientes:

- La existencia de otros materiales antideslizantes, tales como la arcilla calcinada y los agregados esquistosos.
- La posibilidad de una reducción en la tasa de crecimiento en la construcción de carreteras.
- Los avances tecnológicos que favorezcan el uso de abrasivos artificiales.

Frente a estos problemas, los productores de esmeril de Grecia están llevando a cabo estudios relativos al desarrollo de un proceso para la utilización del esmeril como materia prima para la producción de abrasivos de sílice-alúmina fundidas. El esmeril fundido podría tener también aplicación, como materia prima en la producción de refractarios de alta temperatura, del tipo de la mullita.

En los Estados Unidos los avances tecnológicos en el campo de los abrasivos, no favorecen el uso del esmeril.

Se prevé que en los próximos años la máxima utilización del esmeril será en la construcción de superficies antideslizantes así como en las operaciones de acabado de los metales debido al alto grado de perfección obtenido con este abrasivo.

La posibilidad de utilizar el esmeril como un refractario de bajo coste para el revestimiento de superficies sobre las que fluya el acero, podría llegar a ser eventualmente una realidad comercial. También es posible que las pistas de aterrizaje para la aviación comercial supersónica se hicieran resistentes al derrape y si el esmeril resultara apto para este uso, podría significar un incremento notable en la demanda del mismo.

Finalmente hay que señalar las serias dificultades que se crean para la continuación de las explotaciones en algunas zonas, debidas a razones de tipo ambiental y estético, así ocurre en los Estados Unidos en que los depósitos localizados en un área rural-residencial encuentran graves dificultades para su explotación debido al ruido, vibraciones, polvo y otros aspectos negativos que la minería lleva consigo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Tratado de Mineralogía  
F. Klockmann - P. Randorh.
  
- Refractarios  
F. H. Norton.
  
- Manual de Mineralogía de Dana  
Cornelius S. Hurlbut, Jr.
  
- Industrial Minerals and Rocks  
Seeley W. Mudd Series
  
- Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico  
Alan M. Bateman.
  
- Minerals for the Chemical and Allied Industries.  
S. J. Johnstone - M. G. Johnstone.
  
- Mining Annual Review. 1975. Abrasives  
R. P. Bligh
  
- Mineral Facts and Problems  
Bureau of Mines. EE. UU.

- Principios de Geoquímica  
Brian Mason.
- Mineralogía Optica  
P. F. Kerr.
- Boletín Geológico y Minero T. LXXXVI-VI. 1975.  
Origen de los granates de las rocas graníticas y aplíticas de la -  
Sierra de Guadarrama, Sistema Central Español.  
J. López Ruiz y L. García Cacho.
- Boletín Geológico y Miner. T. LXXXI-II-III. 1970.  
Microanalyse de grenats d'aplites et de granites de Galice orienta-  
le (Espagne).  
H. Bizonard, R. Capdevila y C. Gaven.
- El metamorfismo de la Sierra de Guadarrama.  
Sistema Central Español.  
J. López Ruiz, A. Aparicio y L. García Cacho.
- Handbook of Mineral Dressing  
Ores and Industrial Minerals.  
Arthur F. Taggart.
- Geology of the Industrial Rocks and Minerals.  
Robert L. Bates.

- Abrasives. A. M. 1.  
L. Coes, Jr.
  
- Cerámica Industrial  
F. Singer y S. S. Singer.