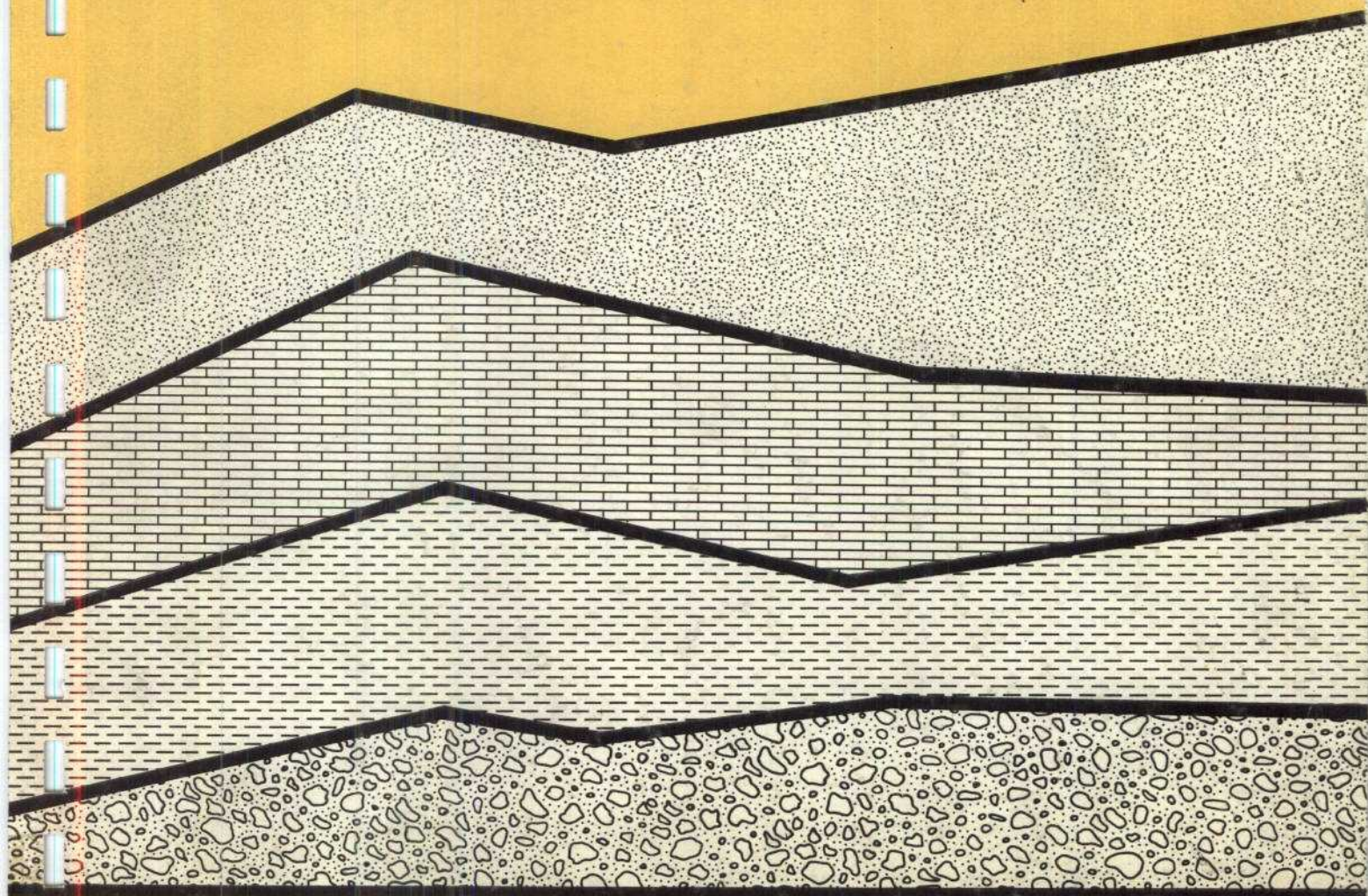


INSTITUTO GEOLOGICO
Y MINERO DE ESPAÑA

00082

MONOGRAFIAS DE ROCAS INDUSTRIALES
ROCAS SILICOALUMINOSAS



COLECCION - INFORME

00082

00082

INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

MONOGRAFIAS DE ROCAS INDUSTRIALES
ROCAS SILICOALUMINOSAS

SERVICIO DE PUBLICACIONES
MINISTERIO DE INDUSTRIA

68000

el presente
estudio
ha sido realizado
por
FRASER ESPAÑOLA,
en
régimen de contratación
con el
Instituto Geológico y Minero
de España

INDICE

| | Pág. |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.1 Nomenclatura | 1 |
| 1.2 Generalidades | 2 |
| 1.3 Características | 3 |
| 1.4 El Material Comercial | 8 |
| 1.5 Composición Química | 8 |
| 1.7 Tipos de Yacimientos | 13 |
| 1.8 Minería | 14 |
| 1.9 Beneficiación | 14 |
| 1.10 Calidades | 15 |
| 1.11 Reservas | 17 |
| 1.12 Reconocimiento de estas Sustancias | 18 |
| 2. PROPIEDADES | 23 |
| 2.1 Calcinación | 23 |
| 3. CLASIFICACIONES INTERNACIONALES | 27 |
| 3.1 Especificaciones Generales | 27 |
| 3.2 Composición | 32 |
| 3.3 Composición Mineralógica | 34 |
| 3.4 Tamaño de las Partículas | 35 |
| 4. USOS | 37 |
| 4.1 Visión General | 37 |
| 4.2 Productos Refractarios | 37 |
| 4.3 Abrasivos | 41 |
| 4.4 Piedras Preciosas | 42 |
| 4.5 Otros Usos | 42 |
| 5. ESPECIFICACIONES PROPIAS DE CADA UNO DE ESTOS USOS | 45 |
| 5.1 Generalidades | 46 |
| 6. PORCENTAJES DE UTILIZACION POR LA INDUSTRIA | 47 |
| 7. PRODUCTOS SUSTITUTIVOS | 49 |
| 7.1 Materiales Naturales | 49 |
| 7.2 Materiales Sintéticos | 49 |
| 8. CLASIFICACION EN FUNCION DE SUS USOS | 55 |
| BIBLIOGRAFIA | 57 |

1.— INTRODUCCION

Es imposible empezar un análisis de la andalucita, sin caer en la cuenta de que hay otras rocas industriales de propiedades y características, tanto físicas como químicas e industriales, muy similares a las de esta; por lo que parece conveniente, a fin de evitar innecesarias repeticiones que acarrearían la consiguiente pérdida de tiempo, realizar el estudio global de todas ellas.

Así pues se comienza aquí en análisis de la andalucita, junto con el de la silimanita (también llamada por algunos autores sillimanita), cianita o distena y mulita (o mullita), así como el de topacio, la dumortierita y la pinita, aunque estas tres últimas de manera menos exhaustiva.

1.1.— NOMENCLATURA

No existe en el mundo ningún término completamente aceptado para designar globalmente a todas las sustancias antes citadas, sino que por el contrario hay un gran desacuerdo, manejándose cuatro o cinco términos distintos.

Posiblemente el más extendido de todos sea el de "grupo de la silimanita", o simplemente "silimanita", debido en parte a que el material importado de la India en los albores de la industria de refractarios era este producto, y en parte a la

creencia, mientras no se perfeccionaron las técnicas de diferenciación y análisis de estas sustancias, que era silimanita el producto de la calcinación de los minerales de este grupo en vez de mulita.

Este término es inexacto, debiéndose como se acaba de indicar a un error de apreciación, pero a pesar de esto está tan arraigado que resulta muy difícil su destierro.

Hoy en día, y debido a la puesta a punto de nuevos métodos, es relativamente fácil distinguir ambas sustancias.

En los Estados Unidos se usa la expresión "minerales del grupo de la cianita" para referirse a la andalucita, cianita y silimanita y "grupo de las rocas refractarias" cuando se quiere incluir la dumortierita y el topacio, mientras que en Rusia se utiliza el término "andalucita" para designar todas las sustancias afines.

Cualquiera de estas expresiones que se utilice para referirse globalmente a todo el grupo, tiene el inconveniente, aunque siempre paliado por el contexto, de no indicar si se utiliza en su sentido general o en el particular, por lo que en Francia se utiliza la frase "produits de sillimanite naturelle" para diferenciar estos productos de los hechos con las otras sustancias del grupo.

El Comité de Productos Refractarios de la "Society of Glass Technology" después de un detallado estudio de estas sustancias, ha llegado a la conclusión de que es imposible recomendar un sistema de nomenclatura comercial con base científica, recomendando por tanto, para evitar errores de interpretación, precisar los nombres individuales más que un término global.

1.2.— GENERALIDADES

Este grupo de sustancias son silicatos de aluminio anhidros naturales, cuya principal característica es su transformación, por medio de calcinación, en mulita y sílice, siendo por tanto esta sustancia la única estable del grupo a altas temperaturas.

Como el producto obtenido en la calcinación es altamente refractario, estas rocas son muy importantes para los procesos industriales que exigen altas temperaturas, v.g. fabricación de vidrio y procesos metalúrgicos. Aunque no sean estos sus usos exclusivos, son los más importantes.

Los países fuertemente industrializados son todos notablemente deficitarios en recursos propios, por lo que tiene que importar estas sustancias de países comparativamente menos desarrollados. Hay, por tanto, un considerable mercado internacional de estos productos, aunque debido a la irregularidad en la oferta,

afectada por motivos estratégicos, se está desarrollando un creciente interés en la producción sintética de refractarios de este tipo. Así por ejemplo se está sintetizando mulita a partir de alúmina y sílice, o efectuando una inversión térmica artificial en alúminos silicatos, como caolín, o pirofilita, a los que se ha añadido el aluminio necesario en forma de óxido.

No obstante, la mayor demanda de material natural hace que las perspectivas sean buenas para cualquier nueva fuente que se descubra.

Los principales productores son la República Sudafricana, India y Estados Unidos.

1.3.- CARACTERISTICAS

a) Andalucita

Es un silicato de aluminio de fórmula teórica $Al_2O_3SiO_2$, al igual que la cianita y la silimanita. Cristaliza en el sistema ortorrombico.

Generalmente se encuentra en prismas cuadrados casi perfectos, pero no es raro encontrarlo en forma columnar, radial, granular o de masas. Su color es corrientemente rosa, blanco o rosa rojizo, aunque se conocen también variedades grises, violetas, amarillas y verdes.

Varía desde transparente a opaca, con rayado blanco y brillo de vítreo a mate. Es frágil y tiene fractura irregular o concoidea.

Una variedad suya, conocida como quiastolita (lapis crucifer), sin importancia económica en el presente, tiene impurezas carbonosas que hacen que su sección transversal sea en forma de cruz.

Los principales productores de andalucita son Sudáfrica, Suecia, Estados Unidos y Corea.

b) Cianita o distena

Químicamente es semejante a la andalucita, presentando la misma fórmula teórica, aunque se diferencia de ésta por la forma de sus cristales que pertenecen al sistema triclinico.

Sus nombres provienen ambos del griego, cianita de "cianos" que significa azul y distena, nombre propuesto por Haüy, basado en la propiedad de esta sustancia de tener "dos sentidos", tanto en su carga eléctrica, pues mientras

unos cristales, por frotamiento, adquieren carga positiva, otros lo hacen negativa, como en su dureza, que varía con la dirección.

La mayor parte de la cianita dedicada al consumo industrial está en forma de agregados cristalinos, a menudo con estructura radial o interpuesta, no so-
liéndose aceptar el cristal perfecto en forma de hoja larga, mucho más conocida por los mineralogos.

Su color es generalmente azul o blanco, aunque la presencia de impurezas de óxidos de hierro hace que sea también muy corriente el marrón, principalmente en el material procedente de la India.

Varía de traslúcido a opaco, con lustre perlado y raya incolora.

Las principales fuentes de cianita son Kenia, Bechualandia, Niasalandia, India Australia y Estados Unidos.

c) Silimanita

Es un silicato de aluminio con la misma fórmula teórica que los anteriores. Cristaliza en el sistema ortorrómbico.

Recibió este nombre después del año 1.824 en honor del profesor Benjamin Silliman.

El antiguo nombre de fibrolita se refería a su forma fibrosa.

Generalmente se encuentra en cristales largos y esbeltos, en grupos cristalinos compactos paralelos, o en agregados radiales.

Su color varía entre marrón, grisáceo blanquecino, grisáceo verdoso y verde oliva pálido. Puede ser desde transparente u opaca. con brillo vitreo, raya incolora y fractura irregular.

Se conocen y explotan depósitos de silimanita en cantidades económicas en Australia, Africa del Sudoeste e India.

d) Mulita

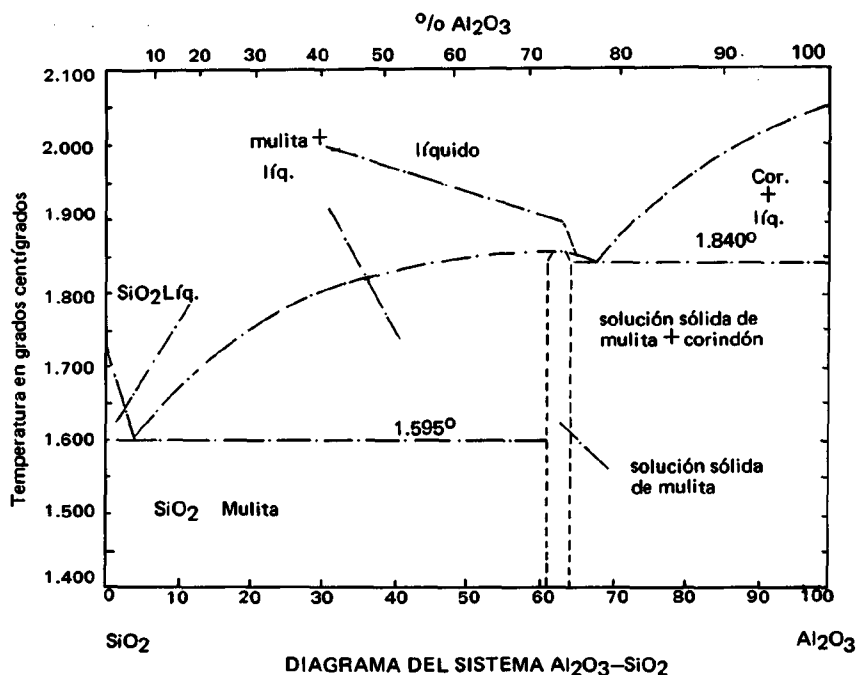
Químicamente es diferente a los anteriores, siendo al igual que ellos un silicato de aluminio, pero de fórmula teórica $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Recibió este nombre cuando fué encontrado naturalmente por Bowen, Greig y Zies en 1.924, tal y como habían predicho, en ciertos sedimentos arcillosos

fundidos, que se encontraban en la isla de Mull, Escocia.

Sus propiedades ópticas son muy similares a los de la silimanita, así como su espectro de difracción a los rayos X, lo que hace que a veces se les haya confundido, aunque al hacer el estudio del sistema alúmina — silice, aparece el componente $3\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$ que diferencia claramente a ambas.

El diagrama de fase para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ queda establecido pues:



La mulita sintética (β -mulita) se diferencia principalmente en que puede existir como una solución entre $3\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$ y $2\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ que da una composición teórica en los fundentes del 71,79 por ciento de alúmina y 28,21 por ciento de silice, y del 77,24 por ciento y 22,76 por ciento respectivamente de los fundidos, mientras que la mulita natural tiene una composición:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| SiO_2 | 28,21 | 29,04 | 29,93 | 31,93 | 29,17 |
| Al_2O_3 | 71,79 | 69,63 | 68,16 | 64,86 | 64,35 |
| Fe_2O_3 | | 0,50 | 0,62 | 0,94 | 5,93 |
| TiO_2 | | 0,79 | 1,29 | 2,27 | 0,55 |
| Na_2O | | 0,18 | | | |
| K_2O | | 0,06 | | | |
| TOTAL | 100,00 | 100,20 | 100,00* | 100,00 | 100,00 |

(*) Nota: Calculado después de deshidratado.

Siendo las columnas 1: Teórico; 2: Muestras procedentes de Seabank Villa, Mull; 3: Material de Carsaig Bay, Mull, 4: Mulita de los yacimientos de Ballycastle, Co. Antrim; 5: Tievebulliagh, Co. Autrim.

Ninguno de estos depósitos, ni ningún otro conocido, tiene la cantidad suficiente para permitir una explotación rentable.

Es fácil encontrar mulita en muchos tipos de arcillas tratadas a gran temperatura, como por ejemplo en las porcelanas (Sèvres) por lo que en algún momento se la llamó porcelanita y ceramita.

e) Topacio

Es un fluosilicato de aluminio de fórmula teórica $Al_2SiO_4(OH,F)_2$, con una composición típica del 33 por ciento de sílice, 55—57 por ciento de alúmina y 16—18 por ciento de fluorita, diferente, por tanto, de los anteriores en composición química, pero conservando la característica principal de ellos de transformarse en mulita cuando se le somete a procesos de calcinación, razón por la que se la incluye en este grupo.

Se encuentra frecuentemente en forma de prismas, algunas veces casi cuadrados, teniendo en este caso gran parecido con la andalucita. También es posible hallarlo con estructura columnar, granular, y desmenuzado tanto en gravillas como en polvo fino.

Es de color fresa—amarillento a blanco, entre transparente y translúcido con rayado incoloro y frágil, con fractura subconcooidal o irregular.

Es interesante resaltar que el topacio de Brewer (Carolina del Sur) tiene dureza 7 en lugar de 8 como es usual y, sin embargo, un peso específico de 3.509 que cae dentro de los normal.

En la calcinación del topacio, la mayor parte de la fluorita se pierde entre 850°C y 900°C, arrastrando consigo algo de hierro y bastante sílice, que representan una pérdida de peso aproximadamente entre el 16 y el 21 por ciento.

La refractabilidad de esta sustancia equivale al cono pirométrico N° 40, presentando una expansión baja aunque permanente, pero debido a las dificultades que entraña el desprendimiento de fluorita no es el material más adecuado para refractarios.

Hay depósitos comerciales de topacio conocidos en Estados Unidos, Malasia, Nigeria y Brasil.

f) Dumortierita

Al igual que la anterior su naturaleza química difiere de la de los principales componentes de este grupo, pero sigue convirtiéndose en mulita cuando se la somete a grandes temperaturas, con una pérdida de peso superior al 6,6 por ciento.

Químicamente es un borosilicato de aluminio con una fórmula probable $(Al_1 Fe)_7 B Si_3 O_{18}$ que hace que su composición típica sea del 64 - 69 por ciento de alúmina, 28 - 32 por ciento de sílice y algo más del 5 por ciento de B_2O_3 .

Cristaliza según el sistema ortorrómbico, pero en cristales rara vez diferenciados, en agregados fibrosos o columnares.

Se presenta con un color que varía entre azul brillante y azul verdoso, de transparente a translúcido y brillo vítreo.

El material procedente de ciertos yacimientos de Nevada, se desploma a una temperatura relativamente baja, comenzando en el P.C.E.*10 (alrededor de $1.250^{\circ}C$) con la formación de cristales de mulita granulados, la reducción en su peso específico, y tomando al mismo tiempo un color blanco y brillo de porcelana.

Se encuentran depósitos en varios puntos de los Estados Unidos, aunque sólo los de Nevada son explotables de forma rentable.

g) Pinita

Es el nombre dado a los agregados micáceos producidos por alteraciones de la cordierita, nefelina o escapolita.

Los análisis de la pinita comercial dan una composición de 50,47 por ciento de SiO_2 , 27,41 por ciento de Al_2O_3 y 5,44 por ciento de $K_2O + Na_2O$, perdiendo en ignición un 5,63 por ciento aproximadamente.

De todos los depósitos existente en el mundo sólo se ha extraído pinita para fabricar refractarios ricos en mulita en el de Rochester, Nevada.

b) Otros

Existen aún varios materiales que mediante algún proceso, generalmente cal-

(*) Cono pirométrico equivalente.

cinación, se transforman en mulita. Sin embargo, todos ellos necesitan ser bonificados o alterados de alguna forma artificial para ello. Por tanto, no forman parte, propiamente hablando, de este grupo.

La mayor parte de ellos se verán, por tanto, en el capítulo de productos sustitutivos.

Estas características pueden resumirse en el cuadro adjunto.

1.4.- EL MATERIAL COMERCIAL

Las principales características de este grupo de sustancias, sumariadas en el apartado anterior, han sido estudiadas sobre muestras del mejor material disponible, factor muy importante que hay que tener en cuenta, pues en la práctica, y debido a las impurezas presentes, pueden encontrarse algunas diferencias.

No hay, por tanto, que olvidar que el material de uso comercial es muy diferente del que se encuentra en museos y colecciones mineralógicas. Así la variedad de cianita hojosa con cristales jaspeados, mineralógicamente muy bien conocida, no se encuentra prácticamente en el mercado, y es generalmente rechazada por la industria; sin embargo, esta cianita hojosa, de la que hay considerables reservas en Bihar y Mysore, podría ser usada en lugares donde la resistencia mecánica no sea la cualidad más necesaria, v.g. en refractarios con misión aislante.

Generalmente el mercado prefiere estas sustancias en forma de agrupados densos, masas o granos finos.

1.5.- COMPOSICION QUIMICA

Este grupo de sustancias tiene estructuras de silicatos de aluminio, donde todo el Al tiene coordinación 6, no reemplazando a la sílice en ningún caso. Esta cualidad los diferencia de los alúmino-silicatos, donde los átomos de aluminio tienen como número de coordinación 4 y ocupan posiciones estructurales iguales a las de los iones de silicio.

La composición química de la andalucita, cianita y silimanita con un 62,93 por ciento de alúmina y 30,07 de sílice responde a la fórmula teórica de $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, mientras que el análisis cuantitativo de la mulita natural arroja un 71,79 por ciento de alúmina y 28,21 por ciento de sílice correspondiente a $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Sin embargo el análisis de algunas muestras, en especial las procedentes de Singhbhum en Bihar (India), Kenia y Sudáfrica, revela un contenido de Al_2O_3

CARACTERISTICAS DE LAS PRINCIPALES SUSTANCIAS

| <u>Propiedad</u> | <u>Andalucita</u> | <u>Cianita</u> | <u>Silimanita</u> | <u>Mulita</u> | <u>Topacio</u> | <u>Dumortierita</u> |
|----------------------------------|---|---|--|---|--|--|
| Fórmula | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ | $3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_4$ (OM, Fe) ₂ | Al_2SiO_4 (OM, Fe) ₂ | (Al ₁ Fe)BSi ₃ O ₁₈ |
| Sistema de cristalización | ortorrómbico | triclinico | ortorrómbico | ortorrómbico | ortorrómbico | ortorrómbico |
| Esfoliación | 110 buena 100 pobre | 100 perfecta 010 buena 001 incompleta | 010 buena | 010 perfecta | 001 perfecta | 100 patente 110 imperfecta |
| Dureza | 6 1/2 | 5 1/2 - 7* | 6 1/2 - 7 1/2 | 6 - 7 | 8 | 7 |
| Peso específico | 3,13 - 3 1/6 | 3,53 - 3,65 | 3,23 - 3,27 | 3,155 - 3,158 | 3,4 - 3,65 | 3,3 |
| Índices de refracción | α 1,629-1,640 β 1,633-1,644 γ 1,638-1,650 | 1,712-1,718 1,721-1,723 1,727-1,734 | 1,654-1,661 1,658-1,662 1,673-1,683 | 1,650-1,666 - 1,666-1,690 | 1,606-1,629 1,609-1,631 1,616-1,638 | 1,659-1,670 1,684-1,691 1,686-1,692 |
| Caracter óptico | Biaxial negativo | Biaxial negativo | Biaxial positivo | Biaxial positivo | positivo | negativo |
| Angulo axial óptico 2 V | 73° - 86° | 82° - 83° | 21° - 30° | Moderado | 48° - 68° | De pequeño a moderado |

(*) Varía según la dirección

muy superior al correspondiente teórico, debido a la presencia de impurezas de corindón (alúmina casi pura), llegando en el caso de Namaqualand a superar el 84 por ciento de Al_2O_3 . Otra impureza, relativamente corriente, que produce este mismo efecto es la diasposita, monohidrato de aluminio con 85 por ciento de alúmina y 15 por ciento de H_2O combinada.

Otras impurezas que generalmente acompañan a estas sustancias en sus depósitos son corrientemente: Fe_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , MnO , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , etc., algunas de las cuales son perfectamente tolerables en pequeñas cantidades, como el titanio, y en algún caso se pueden considerar beneficiosas.

El contenido en álcalis debe ser muy bajo. Hoy existe una cierta tendencia a admitir una cantidad ligeramente superior de hierro.

Por regla general los depósitos naturales contienen grandes cantidades de ganga y otras impurezas, que si son técnicamente eliminables a un precio razonable, no reducen el interés económico del yacimiento.

Los problemas que presenta el estudio de los orígenes de estas sustancias, sobre todo los procesos químicos y las condiciones de presión y temperatura bajo las que estos se realizan, no están aún perfectamente resueltos, a pesar de las excelentes hipótesis e ideas dadas por Deer, Howie, Zussman y Temperley entre otros.

Es evidente que el asunto es complejo y ha conducido a muchas controversias, como resultado de las cuales conceptos aceptados durante largo tiempo están cambiando, v.g. la cianita no es esencialmente un mineral de tensión, sino metamórfico.

Una discusión completa sobre la paragénesis de estas sustancias es por otro lado imposible aquí. Por tanto, se limitará al grueso de los depósitos conocidos, que son sin duda de origen metamórfico.

Un estudio, ya clásico, de Barrow sobre el origen metamórfico de las sustancias de arcilla Dalradian, en el sureste de los Highlands, en Escocia, muestra que se puede definir una serie de zonas de metamorfosis regional progresiva, que se caracterizan por los minerales indicativos: clorita, biotita, granate, estaurolita, cianita y silimanita que representa el mayor grado de metamorfosis de la serie. La metamorfosis regional caracterizada por esta cadena de minerales, que se conoce con el nombre de "tipo dalradian", se ha encontrado en muchas zonas metamórficas.

Otro importante tipo de metamorfosis regional es la llamada Abukuma por Miyashiro, caracterizada por la presencia de andalucita y cordierita en sustitución

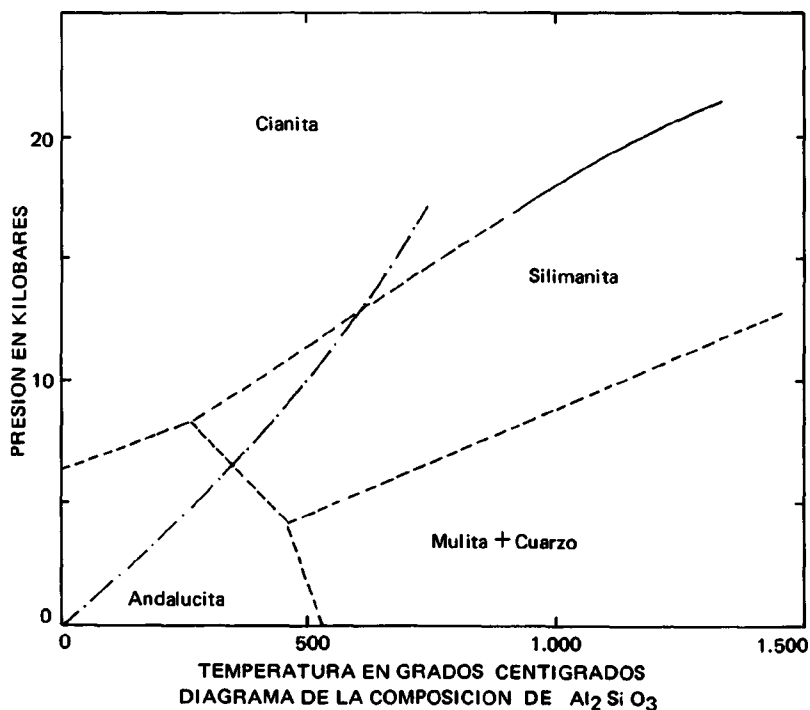
de la cianita y estaurolita respectivamente.

Hay además tipos de metamorfosis regional entre los anteriores que incluyen una asociación de andalucita y estaurolita, como el Buchan de Read, o de andalucita y cianita como en Corea y Idaho (EE.UU.).

Experimentalmente se ha visto que el tipo dalradian es el que necesita mayores presiones para su formación.

La andalucita puede en algún caso, aunque raro, formarse en una fase de proceso metamórfico regional, y convertirse en cianita en otra. El proceso inverso es aún más difícil de encontrar, habiéndose observado sólo en aureolas termales.

Los papeles relativos jugados por la temperatura, presión y condiciones químicas en la paragénesis de la andalucita, cianita, silimanita y mulita han sido objeto de profundos estudios e investigaciones, en los que el concepto más aceptado de los campos de estabilidad se puede resumir en el siguiente diagrama P.T.



En este diagrama hay que hacer notar que las fases límites indicadas por trazos cortos no han sido experimentalmente fijados, por tanto no se las puede pedir una significación cuantitativa.

La curva punto—raya indica el modelo de un típico gradiente geotermal, y su posición tiene significación sólo en el origen.

De cualquier forma parece ser que las condiciones físicas son en este metamorfismo menos críticas que las químicas, pues en ningún caso sedimentos anormalmente bajos en alúmina se transforman en ninguna de las sustancias de este grupo.

Teniendo en cuenta la finalidad de este estudio, se puede afirmar que el origen de estos silicatos es la metamorfosis regional de rocas sedimentarias aluminosas, pues éste es el de la gran mayoría de los yacimientos explotables conocidos en el mundo.

En general, se puede afirmar que la cianita se encuentra más frecuentemente en esquistos y gneises, o sea en rocas metamórficas que se han visto sometidas a grandes temperaturas y presiones, mientras que la andalucita se encuentra comúnmente en hornblendas formadas por metamorfismo térmico sin grandes deformaciones.

La silimanita, debido a ser resultado de una sustitución de las anteriores a altas temperaturas, se encuentra en las dos formas, mientras que la mulita por ser la que mayor temperatura requiere para su formación, como demuestra su producción sintética, se encuentra en arcillas xenolíticas fundidas en diques de basalto, como en los depósitos de Seabank Villa, en la isla de Mull.

Algunos ejemplos de paragénesis menos usuales pueden ser:

- En las montañas de Cargo Muchacho, junto a Ogilby, California, la cianita, en una serie de sedimentos fundamentalmente pelíticos, ha sido regionalmente alterada e invadida por granito, tonalita y adamelita. En este depósito, la aparición de grandes cristales de cianita, con vetas de cuarzo, y el desarrollo de estos a lo largo de las fracturas, se considera como evidencia de una concentración hidrotérmica posterior.
- La silimanita y cianita de Williamstown en el sur de Australia se encuentran asociadas con rocas poco metamorfoseadas, esquistos con biotita, mármol o cuarcita que cortan longitudinalmente los sedimentos metamórficos de los cuales derivan.

Esto sugiere que el proceso de formación de estas rocas, ricas en silimanita y cianita, fué acompañado por otros de tipo metasomático en los que tuvieron importancia fluidos ricos en alúmina, junto con gran actividad hidrotermal, durante la cual, la cianita se convertía en muscovita y la silimanita en arcilla, principalmente caolín.

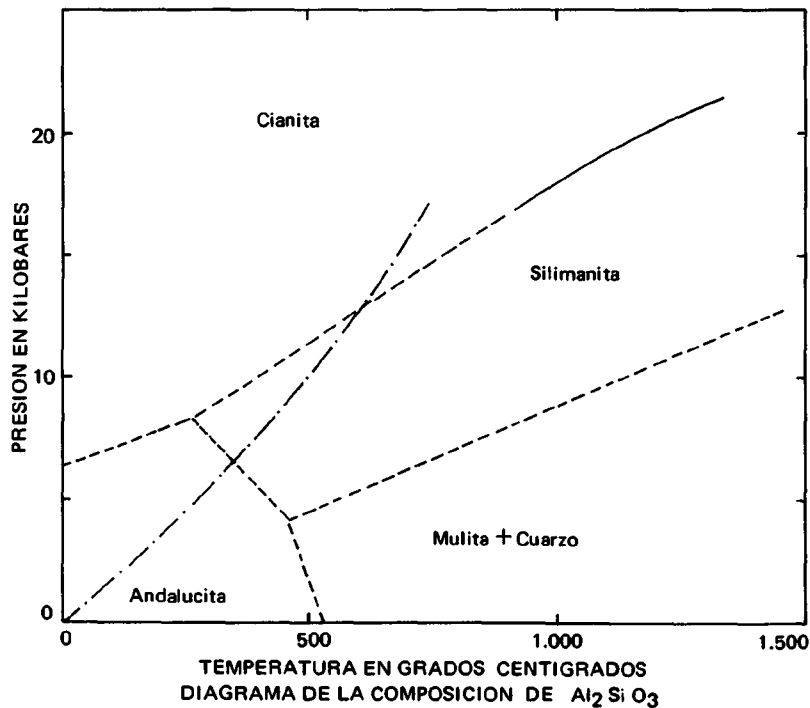
de la cianita y estaurolita respectivamente.

Hay además tipos de metamorfosis regional entre los anteriores que incluyen una asociación de andalucita y estaurolita, como el Buchan de Read, o de andalucita y cianita como en Corea y Idaho (EE.UU.).

Experimentalmente se ha visto que el tipo dalradian es el que necesita mayores presiones para su formación.

La andalucita puede en algún caso, aunque raro, formarse en una fase de proceso metamórfico regional, y convertirse en cianita en otra. El proceso inverso es aún más difícil de encontrar, habiéndose observado sólo en aureolas termales.

Los papeles relativos jugados por la temperatura, presión y condiciones químicas en la paragénesis de la andalucita, cianita, silimanita y mulita han sido objeto de profundos estudios e investigaciones, en los que el concepto más aceptado de los campos de estabilidad se puede resumir en el siguiente diagrama P.T.



En este diagrama hay que hacer notar que las fases límites indicadas por trazos cortos no han sido experimentalmente fijados, por tanto no se las puede pedir una significación cuantitativa.

La curva punto—raya indica el modelo de un típico gradiente geotermal, y su posición tiene significación sólo en el origen.

De cualquier forma parece ser que las condiciones físicas son en este metamorfismo menos críticas que las químicas, pues en ningún caso sedimentos anormalmente bajos en alúmina se transforman en ninguna de las sustancias de este grupo.

Teniendo en cuenta la finalidad de este estudio, se puede afirmar que el origen de estos silicatos es la metamorfosis regional de rocas sedimentarias aluminosas, pues éste es el de la gran mayoría de los yacimientos explotables conocidos en el mundo.

En general, se puede afirmar que la cianita se encuentra más frecuentemente en esquistos y gneises, o sea en rocas metamórficas que se han visto sometidas a grandes temperaturas y presiones, mientras que la andalucita se encuentra comúnmente en hornblendas formadas por metamorfismo térmico sin grandes deformaciones.

La silimanita, debido a ser resultado de una sustitución de las anteriores a altas temperaturas, se encuentra en las dos formas, mientras que la mulita por ser la que mayor temperatura requiere para su formación, como demuestra su producción sintética, se encuentra en arcillas xenolíticas fundidas en diques de basalto, como en los depósitos de Seabank Villa, en la isla de Mull.

Algunos ejemplos de paragénesis menos usuales pueden ser:

- En las montañas de Cargo Muchacho, junto a Ogilby, California, la cianita, en una serie de sedimentos fundamentalmente pelíticos, ha sido regionalmente alterada e invadida por granito, tonalita y adamelita. En este depósito, la aparición de grandes cristales de cianita, con vetas de cuarzo, y el desarrollo de estos a lo largo de las fracturas, se considera como evidencia de una concentración hidrotérmica posterior.
- La silimanita y cianita de Williamstown en el sur de Australia se encuentran asociadas con rocas poco metamorfoseadas, esquistos con biotita, mármol o cuarcita que cortan longitudinalmente los sedimentos metamórficos de los cuales derivan.

Esto sugiere que el proceso de formación de estas rocas, ricas en silimanita y cianita, fué acompañado por otros de tipo metasomático en los que tuvieron importancia fluidos ricos en alúmina, junto con gran actividad hidrotermal, durante la cual, la cianita se convertía en muscovita y la silimanita en arcilla, principalmente caolín.

- Los depósitos de silimanita y corindón de Assam se cree que pudieron originarse por metamorfosis de sedimentos de arcilla bauxítica muy pura, probablemente depositados en pequeñas depresiones, y recubiertos posteriormente por arcillas silíceas.
- En Lapsa Buru la cianita fue originada a partir de arcillas aluminosas, tipo Archaean formados por descomposición de basalto, posteriormente enriquecidas en Al_2O_3 por soluciones de magma.
- Los depósitos de Henry Knob en York County, Carolina del Sur se pensaba que fueron creados como resultado de una acción hidrotérmica asociada con el emplazamiento en la vecindad de monzonita (Yorville). Sin embargo estudios posteriores concluyen que no hay evidencia directa sobre esto y que como otros yacimientos de la misma zona pueden haberse formado por metamorfosis de arenas y limos ricos en arcillas.
- La transformación de cianita en andalucita por metamorfismo térmico, seguido de regional, se encuentra en Argyllshire en el área de Aberdeenshire, isla de Mull, Escocia.

El cambio inverso debido a metamorfosis regional precediendo a otra térmica se puede encontrar en Ross-shire con la transformación de silimanita en andalucita, y el paso de esta a cianita en Suecia, Tirol y Rodesia. En estos dos últimos lugares puede apreciarse que la estructura cristalina se ha conservado. Este cambio se realiza bajo presiones relativamente moderadas.

- En algunos casos el origen puede ser pirogénico, apareciendo en rocas volcánicas como resultado de contaminación del magma por alúmina, aunque en otros casos como en Pyramid Hill en Victoria, Australia y en Askdale en Cumberland, Inglaterra no se aprecian evidencias de que esto sea cierto.

De cualquier manera no existen depósitos económicos de este tipo.

1.7.- TIPOS DE YACIMIENTOS

Las principales clases de depósitos de las sustancias de este grupo son:

- a) Diseminación y concentración masiva: en rocas arcillosas y de cuarzo procedente de metamorfosis regional.

Este tipo de yacimiento tiene especial importancia en el este de Africa, India y Estados Unidos.

- b) En rocas arcillosas de metamorfosis de contacto, como por ejemplo la metamorfosis térmica de pizarras por el complejo ígneo de Bushveld en Sudáfrica.
- c) Depósitos de origen mixto: incluyendo alteraciones hidrotérmicas, depósitos en vetas de cuarzo y pegmatitas, y yacimientos originados por diversos procesos.
- d) En rocas sedimentarias, en arenas de playas, como en Florida y Kerala (India), en placeres como en Georgia y en aluviones fluviales v.g. Transvaal.

1.8.— MINERIA

Son, con mucha diferencia, los yacimientos explotados a cielo abierto los que proveen de estas sustancias a la mayor parte del mercado, aunque existen también importantes criaderos que se benefician por laboreo subterráneo, principalmente en depósitos de cianita extraídos mediante pozos verticales de Bechuanlandia y mediante galerías o planos inclinados en el principal yacimiento keniatá.

Si el mineral se encuentra en forma masiva, el troceado y la clasificación manual son suficientes para preparar un producto de alta calidad. Los yacimientos en forma de arena de playas, placeres y aluviones se explotan por medios convencionales a base de dragalinas y palas mecánicas.

1.9.— BENEFICIACION

Como resultado del rápido agotamiento de las reservas conocidas en forma masiva, se han creado varios programas de investigación encaminados hacia el búsqueda de métodos de separación de estas sustancias de sus minerales y rocas asociadas, especialmente de la recuperación de cianita de los esquistos.

Los principales minerales asociados, algunos de los cuales pueden ser de rendimiento económico, que son cuarzo, mica, tanto en la variedad de muscovita como en la de biotita o vermiculita, feldespatos, granate, grafito, magnetita, turmalina, limonita, piritá y varios minerales arcillosos, pueden ser separados por trituración, cribado, separación por medios densos o magnéticos, flotación, separación electrostática, etc. De todos ellos parece ser que se obtiene mejores resultados con la práctica de la flotación.

Diversas pruebas efectuadas por el U.S. Bureau of Mines sobre muestras de rocas cuarzo-cianíticas procedentes de las montañas Graves (Georgia) dan como resultado que usando CO_3Na_2 para controlar el P.H., ácido cítrico como separador del cuarzo y ácido oleico en funciones de colector de cianita se obtiene un

sedimentos del 80 por ciento de esta con una composición práctica de 56,8 por ciento de Al_2O_3 y 3,8 por ciento Fe_2O_3 soluble en ácido clorhídrico, obteniéndose de esta forma un aumento considerable de las reservas en materiales para fabricar mulita de ese país.

Hay que hacer notar que los métodos de producción de estas sustancias a partir de trituración de rocas ricas en ellas tienen el inconveniente de romper el mineral y reducirlo a tamaños que no son válidos para ciertos usos. Así en EE.UU., por ejemplo, el material procedente de la criba núm. 4 (0,10 pulgadas = 4,7 mm de red) es el mínimo tamaño aceptado para la manufactura de ladrillos refractarios.

Cuando la ganga es cuarzo, la cianita y la mica se pueden separar fácilmente por trituración y cribado, concentrando luego por cribado más fino y clasificación por agua, mientras que si la ganga es cuarzo, feldespato y mica, sus apreciables diferencias en densidad, hacen posibles métodos de separación gravimétrica tanto con agua como neumáticos.

1.10.— CALIDADES

Es imposible establecer en términos precisos que calidad mínima hace rentable un depósito de roca. En términos muy generales, se puede afirmar que es explotable un yacimiento de estas sustancias en forma masiva, apto para ser trabajado a cielo abierto, y en el que se pueda preparar el material mediante técnicas sencillas.

Para profundizar un poco más, es necesario estudiar y analizar una serie de factores que influyen económicamente en el rendimiento, v.g. la cantidad de mineral, la localización del depósito, la naturaleza y calidad de la mena y de la ganga, asociación con algún otro mineral explotable, etc. Si el producto beneficiado requiere trituración, esto trae aparejado un coste adicional que a su vez debe ser considerado. En igualdad de condiciones se prefieren los yacimientos de silimanita, pues no requieren calcinación previa de su uso.

Como aclaración de párrafo anterior se puede hacer notar que mientras en los yacimientos de Willis Mountain en Virginia se explotan y benefician rocas con 10—30 por ciento de cianita, en Kenia se requieren esquistos con un contenido mínimo de 40 por ciento y en Niasalandia se consideran rentables depósitos con sólo el 15 por ciento.

Los esquistos del norte de Georgia contienen únicamente entre el 4 y 8 por ciento de cianita, pero un contenido adicional del 25 por ciento de mica, algo de grafito y otros productos comercialmente útiles, hacen rentable su explotación a cielo abierto.

En Carolina del Norte se extraen esquistos de cianita—cuarzo—granate con un contenido del 15 al 20 por ciento que una vez flotados producen un concentrado con el 97 por ciento. En Carolina del Sur se explota silimanita en Pelzer con el 20 por ciento y en Guideon con entre el 3 y el 30 por ciento, y topacio con una concentración del 16 por ciento de Brewer.

Los depósitos de Koralpe, situados en el sur de Australia, tienen rocas con un contenido comprendido entre el 15 y el 20 por ciento de cianita con concentraciones locales del 40—50 por ciento.

Se ha establecido oficialmente en Rusia que serán depósitos de interés económico aquellos que contengan al menos 30 millones de toneladas con un mínimo del 30 por ciento de material aprovechable. Los yacimientos con un contenido comprendido entre el 30 y 39 por ciento se consideran de bajo grado; para ser considerados de grado medio deberán tener una concentración del 40 al 50 por ciento y sólo en caso de ser superior se tendrán como de grado alto.

A su vez se considera deseable un espesor mínimo de 2 a 3 metros, o una serie de estratos de 0,5 a 1 metro cada uno que suman entre todos 3 metros o más. Se consideran indeseables también cualquier cantidad de hierro y titanio contenido en los cristales, pero no tendrá importancia si por ir fuera de ellos son fácilmente separables. Se da también preferencia a los yacimientos situados en puntos cercanos a las zonas de consumo.

La calidad de los depósitos de arenas y gravas es también muy variable. Así las arenas de la playa de Travancore contienen del 6 al 10 por ciento de silimanita, pero son económicamente muy importantes por contener ilmenita, circón, rutilo y monacita en más del 75 por ciento.

Las arenas de Florida contienen sólo el 1 por ciento de cianita y silimanita, pero después de pasar por las plantas de recuperación de minerales de titanio y circonio quedan concentrados al 15 ó 20 por ciento.

El grado de los depósitos fluviales del sur de Africa es superior al 50 por ciento de andalucita recuperable.

Para realizar una apreciación económica válida de estos yacimientos deben tomarse muestras sistemáticamente cada 2 pies, mezclándolas todas y triturando la mezcla repetidas veces.

Posteriormente se retiran 100 gr. y se pasan por un nido de cribas de mallas 8, 14, 28 y 32 y se pesa cada fracción obtenida desechando lo mayor del tamaño 8 y lo menor del 32.

Cada clase de mineral se flota por separado en bromoformo y se determina el contenido en andalucita pesando el hundido después de quitar la pirolusita y la magnetita.

Algunos yacimientos de Georgia tiene 24 Kg de cianita pura por metro cúbico de grava.

1.11.— RESERVAS

Debido a la dificultad que entraña definir qué depósitos son rentables y cuales no, es casi imposible determinar las reservas existentes en el mundo de estas sustancias, por lo que el presente cálculo se hace en base únicamente de las fuentes más seguras y de las apreciaciones mínimas pudiendo, por tanto, afirmarse con certeza que son superiores a los aquí reseñados.

| | |
|-------------------|---|
| Chana: | 600.000 toneladas de andalucita |
| Niasalandia: | Grandes reservas de cianita diseminada |
| Canadá: | Grandes reservas de cianita diseminada con un 12 — 30 por ciento de pureza |
| India | |
| Lapsa Buru: | 700.000 toneladas de cianita masiva a una profundi- dad de 3,5 m |
| Assam: | 250.000 toneladas de silimanita masiva |
| Madhya Pradesh: | 200.000 toneladas de silimanita |
| Kerala, etc. | Millones de toneladas de silimanita en arenas de pla- yas |
| Austria | |
| Untersulzbachtal: | 85.000 toneladas de cianita seguro y probable unas 2 millones |
| Koralpe: | 2 millones de toneladas de cianita |
| Wipp Valley: | Millones de toneladas de cianita |
| Finlandia: | 300.000 toneladas de cianita |
| Rusia | |
| Keiv, Kola: | 3 1/2 millones de toneladas de cianita |
| Lovezero, Kola: | 200.000 toneladas de nefelina — sienita con 30 por ciento de andalucita |

| | |
|--------------------------------------|--|
| Kyakhta: | Grandes reservas de silimanita en esquistos |
| Kazakh, Semia—Bugu: | 72 millones de toneladas de andalucita |
| República Sudafricana | |
| Marico, Transvaal: | 800.000 toneladas de arena con 50 por ciento de andalucita. |
| Kyanite Kop, Windkoek: | 120.000 toneladas de cianita |
| Estados Unidos | |
| Virginia, Carolina del Sur, Georgia: | 100 millones de toneladas con 10 — 30 por ciento de cianita |
| California: | Más de 250.000 toneladas de andalucita |
| Florida: | Millones de toneladas de cianita y silimanita en arenas de playas |
| Idaho: | 340.000 toneladas de andalucita y cianita |
| Nuevo Méjico: | 2 millones de toneladas de cianita en esquistos |
| Carolina del Norte: | 40 millones de toneladas de roca de cuarzo con 10—30 por ciento de cianita |
| | 300.000 toneladas con 30 por ciento de silimanita |
| | 300 millones de toneladas de gneises con 10 por ciento de cianita |
| Carolina del Sur: | 45.000 toneladas de topacio |

1.12.— RECONOCIMIENTO DE ESTAS SUSTANCIAS

En la mayor parte de los casos es difícil distinguir en su estado natural estas sustancias debido a su gran parecido con algunas otras, por lo que su identificación en el campo, y ante la imposibilidad de realizar fuera del laboratorio análisis mineralógicos completos, no siempre se hace sin error, aún cuando sea realizada por personal con experiencia.

Muestras de actinota, precedente de Kenia, se remitieron al Instituto Geológico Inglés para su análisis confundiéndolas con cianita. La variedad de esta misma sustancia en forma de granulado muy fino es, salvo en densidad, igual a la cuarcita. La andalucita californiana es muy parecida a la diasporita con la que va asociada y el topacio de Carolina del Sur al cuarzo.

Es obvio que este problema no existe cuando las muestras llegan al laboratorio, pues hay muchos procedimientos, mineralógicos ortodoxos para distinguirlas, pero esto entraña una pérdida de tiempo y por tanto de eficacia, sobre las técnicas de identificación correctas, rápidas y con posibilidad de ser usadas fuera del laboratorio; así, pues, es muy necesario poner a punto una serie de ellas que

Cada clase de mineral se flota por separado en bromoformo y se determina el contenido en andalucita pesando el hundido después de quitar la pirolusita y la magnetita.

Algunos yacimientos de Georgia tiene 24 Kg de cianita pura por metro cúbico de grava.

1.11.— RESERVAS

Debido a la dificultad que entraña definir qué depósitos son rentables y cuales no, es casi imposible determinar las reservas existentes en el mundo de estas sustancias, por lo que el presente cálculo se hace en base únicamente de las fuentes más seguras y de las apreciaciones mínimas pudiendo, por tanto, afirmarse con certeza que son superiores a los aquí reseñados.

| | |
|-------------------|---|
| Chana: | 600.000 toneladas de andalucita |
| Niasalandia: | Grandes reservas de cianita diseminada |
| Canadá: | Grandes reservas de cianita diseminada con un 12 — 30 por ciento de pureza |
| India | |
| Lapsa Buru: | 700.000 toneladas de cianita masiva a una profundi- dad de 3,5 m |
| Assam: | 250.000 toneladas de silimanita masiva |
| Madhya Pradesh: | 200.000 toneladas de silimanita |
| Kerala, etc. | Millones de toneladas de silimanita en arenas de pla- yas |
| Austria | |
| Untersulzbachtal: | 85.000 toneladas de cianita seguro y probable unas 2 millones |
| Koralpe: | 2 millones de toneladas de cianita |
| Wipp Valley: | Millones de toneladas de cianita |
| Finlandia: | 300.000 toneladas de cianita |
| Rusia | |
| Keiv, Kola: | 3 1/2 millones de toneladas de cianita |
| Lovezero, Kola: | 200.000 toneladas de nefelina — sienita con 30 por ciento de andalucita |

| | |
|--------------------------------------|--|
| Kyakhta: | Grandes reservas de silimanita en esquistos |
| Kazakh, Semia—Bugu: | 72 millones de toneladas de andalucita |
| República Sudafricana | |
| Marico, Transvaal: | 800.000 toneladas de arena con 50 por ciento de andalucita. |
| Kyanite Kop, Windkoek: | 120.000 toneladas de cianita |
| Estados Unidos | |
| Virginia, Carolina del Sur, Georgia: | 100 millones de toneladas con 10 — 30 por ciento de cianita |
| California: | Más de 250.000 toneladas de andalucita |
| Florida: | Millones de toneladas de cianita y silimanita en arenas de playas |
| Idaho: | 340.000 toneladas de andalucita y cianita |
| Nuevo Méjico: | 2 millones de toneladas de cianita en esquistos |
| Carolina del Norte: | 40 millones de toneladas de roca de cuarzo con 10—30 por ciento de cianita |
| | 300.000 toneladas con 30 por ciento de silimanita |
| | 300 millones de toneladas de gneises con 10 por ciento de cianita |
| Carolina del Sur: | 45.000 toneladas de topacio |

1.12.— RECONOCIMIENTO DE ESTAS SUSTANCIAS

En la mayor parte de los casos es difícil distinguir en su estado natural estas sustancias debido a su gran parecido con algunas otras, por lo que su identificación en el campo, y ante la imposibilidad de realizar fuera del laboratorio análisis mineralógicos completos, no siempre se hace sin error, aún cuando sea realizada por personal con experiencia.

Muestras de actinota, procedente de Kenia, se remitieron al Instituto Geológico Inglés para su análisis confundiéndolas con cianita. La variedad de esta misma sustancia en forma de granulado muy fino es, salvo en densidad, igual a la cuarcita. La andalucita californiana es muy parecida a la diasporita con la que va asociada y el topacio de Carolina del Sur al cuarzo.

Es obvio que este problema no existe cuando las muestras llegan al laboratorio, pues hay muchos procedimientos, mineralógicos ortodoxos para distinguir las, pero esto entraña una pérdida de tiempo y por tanto de eficacia, sobre las técnicas de identificación correctas, rápidas y con posibilidad de ser usadas fuera del laboratorio; así, pues, es muy necesario poner a punto una serie de ellas que

permitan el fácil reconocimiento en el campo de las sustancias de este grupo y sobre todo de las que den una idea del posible valor comercial del mineral.

Entre los más útiles se pueden señalar los siguientes:

a) **Fluorescencia**

La Sociedad Americana de Cerámica, en los últimos 30 años, ha realizado estudios y pruebas en sus laboratorios sobre muestras de mineral procedentes de todo el mundo, y ha puesto a punto sucesivamente dos métodos similares de diferenciación de andalucita, silimanita y cianita, basándose en la fluorescencia, tanto del crudo como del producto calcinado a 1.450°C bajo luz ultravioleta, para lo que se usa una lámpara emisora de radiación muy intensa con una longitud de onda de 3.650 A, haciendo incidir la luz sobre material en polvo, o superficies recién cortadas.

Ninguna de las sustancias de este grupo son en estas condiciones fluorescentes, salvo la cianita que en algunos casos presenta una tendencia aunque muy débil, mientras que los minerales generalmente asociados a ellas lo son.

De esta forma, es fácil detectar las impurezas de las muestras, sobre todo el corindón, así su distribución.

Los resultados obtenidos en el análisis de la fluorescencia, generalmente causada por los óxidos de cromo, de diversas muestras, se pueden resumir en la tabla siguiente:

FLUORESCENCIA

| <u>Sustancia</u> | <u>Procedencia</u> | <u>Material asociado</u> | <u>Fluorescencia</u> |
|------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|
| Cianita | India (calcinada) | Corindón | rosa |
| | India (calcinada) | Apatita | blanca |
| | Idaho | Apatita | rosada |
| Andalucita | Sudáfrica | Corindón | roja |
| | Corea | Cianita | rosa |
| | Colorado | Apatita | rosa |
| Silimanita | India (arena de playa) | Cianita | rosa pálido |
| | India (arena de playa) | Circonio | naranja o amarillo |
| | Idaho | Apatita | amarillento |
| Topacio | Colorado | Espato de fluor | azul-blanco |

En cuanto a la observación bajo luz natural del material calcinado a 1.450° C pueden verse notables cambios en el color, brillo, fluorescencia, estructura y se acentúa la tendencia a la decoloración.

Los principales cambios observados son: la andalucita se torna gris y translúcida, la diasporita blanco—crema y sin brillo, la pirofilita blanco puro, opaco y esmaltado, el rutilo muestra puntos rojizos—marrones, la limonita, si la hay en suficiente cantidad, se convierte en una corteza negra cristalina de magnetita, y el corindón se vuelve de rosa a púrpura—marrón. Son fácilmente detectables también después de la calcinación la presencia de otros productos como feldespatos y mica.

b) Análisis químicos

De los muchos métodos que se han desarrollado en los últimos años para el análisis químico de silicatos y rocas silíceas, hay varios específicos para la cianita y sustancias afines.

La diferencia principal entre los métodos clásicos, usados durante varias décadas, y los más modernos reside fundamentalmente en su mayor rapidez y alguna vez su superior precisión, mediante la utilización de técnicas de extracción de solubles por medio de agentes complejos. Posiblemente el que ofrece mejores resultados sea el método Shell & Martin.

Los métodos físicos se limitan poco más o menos a fotometría de llama para los álcalis, a medidas fotométricas de los complejos amarillos de silicio—molibdeno o a su reducción azul, con complejos de óxidos de aluminio en cloroformo, y a las manchas coloreadas formadas por algunos reactivos orgánicos.

c) Peso específico

Una vez reconocido el mineral es muy importante tener un método que proporcione una evaluación aproximada de la composición de la muestra, para así calcular su valor comercial. Para ello es costumbre, en Inglaterra, Estados Unidos y algún otro país, calcular su peso específico.

Este método, que se usa por ejemplo para estimar la calidad de la andalucita californiana, es muy útil si la principal impureza presente es cuarzo, que proporciona una disminución de la densidad linealmente relacionada con el empobrecimiento en alúmina de la muestra. Sin embargo cuando las impurezas son de composición variable (caolín, mica, etc.), no están en una proporción fija o su efecto es aumentar el contenido en alúmina (corindón), no se consiguen de esta forma resultados útiles.

La siguiente table recoge el peso específico de varias muestras de estas sustancias obtenidas en diferentes yacimientos:

PESO ESPECIFICO DE LAS MUESTRAS COMERCIALES

| <u>Muestra</u> | <u>Procedencia</u> | <u>Peso específico</u> |
|----------------|--------------------|-------------------------------|
| Andalucita | Sudáfrica | 3,06 – 3,08 |
| | California | 3,025 – 3,085 |
| | Dakota del Sur | 3,109 |
| Cianita | India | 3,646 |
| | Lapsa Buru, India | 3,63 – 3,66 |
| | Virginia | 3,5 |
| | Kharsawan, India | 3,6 – 3,7 |
| | España | 3,55 |
| Silimanita | Assam | 3,15 (media), 2,9 (mínima) |
| | Namagualand | 3,34 (incluido corindón) |
| | India | 3,174 |
| | Dakota del Sur | 2,99 |
| Topacio | Carolina del Sur | 3,45 – 3,50 |
| Dumortierita | Nevada | 3,239 |

Debido a que en el proceso de conversión de cualquiera de estas sustancias en mulita hay una reducción en el peso específico, es muy interesante para conocer la calidad y rendimiento de los métodos de calcinación realizar los cálculos de los pesos específicos antes y después de la inversión térmica.

PESO ESPECIFICO DEL PRODUCTO CALCINADO (MULITA + SILICE)

| <u>Mineral original</u> | <u>Fuente</u> | <u>Peso específico</u> |
|-------------------------|------------------|------------------------|
| Andalucita | Sudáfrica | 2,88 |
| Cianita | Kenia | 2,97 |
| | Virginia | 2,9 |
| | España | 2,88 |
| Topacio | Carolina del Sur | 2,98 |
| Mulita | teórica | 3,156 |

Para hacer el cálculo del peso específico se puede emplear cualquier método preciso, aunque debido a que una diferencia del 1 por ciento de Al_2O_3 corresponde a una diferencia de densidad de 0,075 es necesario conocer el

valor del peso específico como mínimo en sus centésimas.

d) Líquidos densos

Otro método que da excelentes resultados en la evaluación comercial de estos productos es proceder a la separación de las muestras mediante líquidos densos para retirar el cuarzo.

Una simple separación de material en polvo con un líquido de peso específico superior a 2,8 gr/c.c. da una idea muy completa de los componentes, utilidad, y rendimiento de un crudo, pues existe una relación lineal entre el contenido de alúmina y el porcentaje del producto que se retira en la flotación.

Investigaciones llevadas a cabo por el U.S. Bureau of Mines sobre muestras tratadas con tetrabromuro de acetileno de peso específico 2,94 gr/c.c. a temperatura ambiente y centrifugadas a 3.750 pies periféricos, dan como resultado que la ecuación de la relación lineal, basada en el método de los mínimos cuadrados, es en el caso de mineral de cianita:

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = 0,628 \cdot (\% \text{ de la fracción flotada}) - 0,6$$

y en el caso de silimanita:

$$\% \text{ Al}_2\text{O}_3 = 0,631 \cdot (\% \text{ de la fracción flotada}) - 0,7$$

En cualquiera de los casos la dispersión es muy pequeña, siendo el error calculado inferior $\pm 0,9$ por ciento que hace de este método uno de los más aceptables.

2.- PROPIEDADES

La propiedad más característica de estas sustancias, que hace que su estudio puede ser acometido conjuntamente, en su transformación a altas temperaturas en mulita.

El principal valor de esta sustancia es dar a los productos en los que se incorpora propiedades de gran refractariedad, resistencia a altas temperaturas, a la acción de los agentes químicos, a la abrasión, y al choque térmico (debido principalmente a su pequeña expansión), conductividad calorífica satisfactoria y alta resistividad eléctrica. Cualidades que la convierten en uno de los principales refractarios existentes en el mercado.

Aunque con menor importancia que la propiedad anterior se puede destacar también su dureza que varía entre los valores 5, 5 y 8 de la escala de Mohs y hace de estas sustancias unos abrasivos de calidad media.

Se da a continuación un estudio más detallado del proceso de calcinación.

2.1.- CALCINACION

Por calentamiento de estas sustancias a las temperaturas abajo indicadas, se

consigue un cambio en su estructura que viene dado por una mezcla de mulita (88 por ciento) y sílice (12 por ciento), según la ecuación:

| | | | |
|---|---|-------------------|-------------------|
| $3(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2)$ | $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$ | | |
| | <u>Cianita</u> | <u>Andalucita</u> | <u>Silimanita</u> |
| Inicio de descomposición: | 1.100°C | 1.140°C | 1.550°C |
| Descomposición completa: | 1.410°C | 1.500°C | 1.625°C |
| Máximo de la curva térmica: | 1.420°C | 1.510°C | 1.560°C |
| Densidad después de la calcinación: | 3,6-3,7 | 3,1-3,3 | 3,3 |

La temperatura de disociación de estas sustancias es variable y parece depender de la pureza del material con el que se efectúan las pruebas. En la práctica comercial se ha comprobado infinidad de veces, que el tamaño del producto a calcinar tiene un obvio efecto sobre la temperatura y tiempo requerido para la disociación.

Puede verse en la siguiente tabla una comparación entre las temperaturas a que comienzan a descomponerse estas sustancias en su forma comercial, y las temperaturas consideradas adecuadas en la práctica.

| | <u>Inicio de descomposición</u> | <u>Temperatura adecuada</u> |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Andalucita | 1.350° C | 1.450° C |
| Cianita | 1.100° C | 1.480° C |
| Silimanita | 1.550° C | 1.650° C |
| Dumortierita | 1.000° C | 1.250° C |
| Topacio | 1.000° C | 1.480° C |

Análisis sobre muestras de cianita procedente de Kenia, hechos por la East African Industrial Research Board revelan que después de 1 hora de calcinación a 1.400° C, y habiéndose transformado la cianita en mulita, su resistencia aumenta hasta 1.6000° C.

La descomposición de la cianita de Virginia comienza evidentemente a 1.400° C. (Cono 14) durante 1 hora y se completa con otra hora a 1.450° C (Cono 15).

La andalucita de Brasil se disocia a 1.460° C, la californiana a 1.600° C y la procedente de Sudafrica comienza la disociación a 1.320° C, completándola a 1.470° C.

No es posible hallar exactamente la densidad de la mezcla de mulita y sílice, pues se desconoce la proporción que hay de cada una de las variedades de esta última. Sin embargo suponiendo que el peso específico de la mulita es 3,03 y que

la sílice está en partes iguales en las formas de cristobalita y tridimita con un peso específico de 2,25 se obtiene un valor para la mezcla de 2,93 gr/cm³, y dando a la mulita 3,156 y 2,3 tenemos un valor teórico de 3,02. La densidad de la mulita producida por calcinación de andalucita, cianita y silimanita es inferior a la del material natural encontrado.

La temperatura produce en estas sustancias exfoliación y expansión. Esta última tiene un valor comprendido entre el 5 y el 6 por ciento en la andalucita y silimanita, mucho más pequeña en la dumortierita y bastante mayor, aproximadamente el 16 por ciento, en la cianita. Este hecho hace que las primeras puedan moldearse antes de la calcinación, mientras que la última necesite una precalcificación. En ocasiones cuando la cianita se añade a otros materiales refractarios para aumentar su contenido en Al₂O₃, puede aprovecharse esta última propiedad a fin de compensar la contracción de alguno de ellos.

Una vez que estos minerales han sido completamente multizados, bien sea por el uso, o por calcinación previa, no hay más cambios de volumen pues el cambio es irreversible.

Si se continua calentando la mulita, al alcanzar 1.850° C esta se convierte en un líquido rico en alúmina, recuperando su estado inicial al reducir de nuevo la temperatura.

Según sea la materia prima empleada así será la estructura de la mulita resultante y por consiguiente sus propiedades, teniendo por ejemplo, mucha más resistencia mecánica el producto resultante de la calcinación de agregados entrelazados de cianita que la mulita con cristales paralelos procedente de andalucita y silimanita. Sin embargo la resistencia es menor si el material empleado es cianita en su variedad hojosa.

La calcinación de la materia prima se lleva a cabo en hornos tubiformes de diferentes tipos y tamaños, siendo la producción más importante en Inglaterra, Bélgica, Alemania y sobre todo Estados Unidos, que posee la demanda mayor y más regular de todas.

A estos hornos el material se lleva en carretillas protegidas contra el calor que se introducen en él por medios hidráulicos o neumáticos y lo atraviesan a velocidades comprendidas entre 0,91 y 2,43 m/h, estando dentro del horno de 12 a 50 horas con temperaturas comprendidas entre 1.500° y 1.650° C.

Si el material es granulado, en su calcinación se usan hornos rotativos.

Para estudiar la calcinación del topacio se trataron 15 toneladas de mineral granulado con menos de 1 pulgada procedente de los depósitos de Chesterfield

Country, Carolina del Sur, en un horno giratorio de 25 pies de largo y 20 pulgadas de diámetro, calcinando entre 100 y 200 Kg/h a una temperatura comprendida entre 1.427° C y 1.621° C durante de 70 a 120 minutos, concluyendo el análisis que las condiciones óptimas son 1.482° C, 150 Kg/h, 0,9 r.p.m., inclinación de horno de 2 grados y contenido de fluorina del topacio del 13-14 por ciento, y de esta forma se obtiene un material con un contenido en espato fluor del 0,24 por ciento y porosidad aparente del 19 por ciento válido para la fabricación de refractarios de primera calidad capaces de sustituir a los de cianita importada por aquel país.

En el tratamiento de calcinación no se produce ninguna reducción importante en el tamaño de las partículas, a pesar de haber una pérdida del 11 por ciento en cenizas.

No se observa en el proceso de defluorización ninguna evidencia de deterioramiento en el horno.

3.- CLASIFICACIONES INTERNACIONALES

3.1.- ESPECIFICACIONES GENERALES

No existe ninguna especificación ni clasificación comercial universalmente aceptada para estos productos, basándose las transacciones en acuerdos particulares entre comprador y vendedor en función de las características físicas y composición química de cada remesa de material.

Hay sin embargo especificaciones muy estrictas, tanto para la materia prima natural, como para la mulita sintética, en Estados Unidos (Especificación P-27-R del U.S. National Stockpile) y en Inglaterra.

En este último país las normas de la B.S.I. (British Standards Institution), más flexible que las del U.S.N.S., pueden resumirse en los siguientes términos:

El tamaño deberá ser superior, en el 10 por ciento al menos, de media pulgada, o en el 1 por ciento al tamaño 60 B.S.S.* siendo el contenido de alúmina por encima del 59 por ciento, el de Fe_2O_3 y TiO_2 menor del 2,0 por ciento, cada uno, no sobrepasando en ningún caso las impurezas totales el 3,5 por ciento del producto. El contenido en silice (SiO_2) debe ser inferior al 39 por ciento.

(*) British Standard Specification.

De cualquier forma estos mínimos pueden ser modificados en circunstancias especiales. Así por ejemplo, se puede aceptar un material con menor contenido en alúmina y de granulado más fino si el contenido en hierro es excepcionalmente bajo y el precio competitivo, o por el contrario en un material muy rico en alúmina se podría tolerar más hierro que en otro de bajo grado.

En base a esto se puede considerar conveniente realizar un estudio económico de cualquier nuevo depósito que tenga más del 55 por ciento de alúmina, menos del 2 por ciento de TiO_2 y Fe_2O_3 respectivamente y bajo contenido en CaO , MgO , Na_2O y K_2).

Para fijar el valor económico de estas sustancias hay que hacer un análisis de sus propiedades refractarias, expresadas por su cono pirométrico equivalente, densidad aparente por unidad de volumen, tamaño de las partículas, porosidad, etc., aunque en la práctica el método más seguido es tomar unas muestras del material, someterlas al proceso que normalmente deberá soportar y estudiar su comportamiento comparándolo con el de otros productos refractarios usados anteriormente.

De cualquier manera, esta prueba, aunque muy útil prácticamente, debe ser completa con análisis químicos, para determinar su contenido en alúmina, sílice y óxidos de hierro, titanio, sodio, potasio, magnesio, calcio, etc., análisis mineralógicos, peso específico, investigación de fluorescencia y cualquier otro que complete el conocimiento del material.

La posición de los Estados Unidos queda muy clara sin más que leer las siguientes especificaciones:

Especificaciones del U.S. National Stockpile:

P-27-R: Para la cianita, sustancias afines y mulita sintética (29 Febrero 1.960).

1. Descripción

Esta especificación alcanza al mineral de cianita o concentrados en su forma natural, originado en India y a la mulita sintética.

2. Requerimientos Químicos, Físicos y de Cono

Cada lote de mineral de cianita o concentrados, acogido bajo esta especificación, se ajustará a una de las listas de requerimientos químicos de los tipos A, B o C; y cada lote de mulita sintética se ajustará a los requerimientos del tipo D. A su vez cada lote tendrá las propiedades físicas y de cono pirométrico equivalente que siguen:

a. Requerimientos Químicos

| | | tanto por ciento en peso* | | | |
|---|--------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | Tipo | A | B | C | D |
| Alúmina (Al ₂ O ₃) | mínimo | 59,00 | 60,00 | 59,00 | 75,00 |
| Alúmina (Al ₂ O ₃) | máximo | — | — | — | 80,00 |
| Sílice (SiO ₂) | máximo | 39,00 | 37,50 | 38,00 | 25,00 |
| Sílice (SiO ₂) | mínimo | — | — | — | 20,00 |
| Oxido de hierro (Fe ₂ O ₃) | máximo | 0,75 | 1,50 | 1,25 | 0,25 |
| Oxido de titanio (TiO ₂) | máximo | 1,25 | 2,00 | 2,00 | 0,10 |
| CaO + MgO | máximo | 0,25 | 0,20 | 0,20 | 0,15 |
| Na ₂ O + K ₂ O | máximo | 0,20 | 0,20 | 0,50 | 0,50 |
| Impurezas totales | máximo | 2,00 | 3,50 | 3,50 | — |

(*) Después de ser sometidos a calcinación de 1.000°C durante 1 h.

b. Requerimientos Físicos

1. **Material en fragmentos:** Cianita natural o mulita sintética. Cada lote de fragmentos, como el que se carga en vagonetas en EE.UU., contendrá fragmentos no tan grandes que un hombre no pueda manejarlos convenientemente; menos del 10 por ciento en peso pasará por una criba de pulgada y media; y menos del 1 por ciento pasará a través de la criba. U.S. Standard N^o 60 (ASTM Designación E-11).
2. **Material refinado:** Cianita natural. Cada lote de mineral o concentrado en su condición natural, como el que se carga en vagonetas en los EE.UU., no contendrá más del 5 por ciento en peso que sea retenido por una criba de pulgada y media, y no más del 60 por ciento en peso que pase por la criba U.S. Standard N^o 16 (ASTM Designación E-11).
3. **Características del triturado después de la calcinación (no aplicable a mulita sintética):** Una muestra de cada lote después de calcinarse será triturada y cribada como se exige en la sección 4 (c) y contendrá no más del 60 por ciento en peso que pase a través de la criba U.S. Standard N^o 16 y no más del 20 por ciento en peso que atraviese la criba U.S. Standard N^o 100 (ASTM Designación E-11). Los granos de refractario calcinado serán resistentes y útiles para fabricar ladrillos refractarios y especialmente planchas. Estos productos refractarios sufrirán las pruebas exigidas en la sección 4 (a).

c. Cono pirométrico equivalente (P.C.E).

Cada lote tendrá su cono pirométrico equivalente determinado por la última revisión de la Designación ASTM C 24—56 sobre el P.C.E. de los materiales refractarios, o por cualquier otro método aprobado y será como sigue para los cuatro tipos:

3. Empaquetado y Marca

a. Empaquetado

El material en fragmentos será enviado a granel. El material refinado será enviado en sacos de cualquier tipo o tamaño acostumbrado en el mercado. Todas las bolsas comprendidas en un mismo lote serán del mismo tamaño nominal y modelo.

b. Marca

Documentos apropiados de identificación acompañarán a cada embarque, e incluirán el nombre del producto, nombre del suministrador, país de origen, peso núm. de licencia de importación, tipo de material, y en el caso de refinado referencias de las marcas de los sacos.

4. Pruebas, Inspecciones y Ensayos

Cada lote de refractarios comprado bajo esta especificación será sometido a pruebas, inspecciones y ensayos por el comprador o su delegado.

- a) Cada material refractario procedente de una nueva fuente pasará un ensayo preliminar consistente en la manufactura de un ladrillo tipo de 9 pulgadas. Este ladrillo muestra deberá ser analizado por un laboratorio con el utillaje necesario para hacer pruebas de precalentamiento y de resistencia a la rotura, de acuerdo con la última revisión de la especificación militar MIL—B—15606; el método de los ciclos de calentamiento de ladrillos y refractarios, excepto este análisis de termo—resistencia a la rotura, se harán según se indique en la última revisión de la designación ASTM C—122—52.

A elección del comprador, o persona designada, cualquier envío de material durante el cumplimiento del contrato está sujeto a las pruebas necesarias (como examen petrográfico microscópico) para asegurar el mantenimiento de la calidad, en el caso de cianita natural, y perfección de multización.

- b) Los análisis químicos deberán ser hechos por un laboratorio con experiencia en análisis de silicatos con gran contenido en alúmina y de acuerdo con la última revisión de la designación C-18-56T de la ASTM sobre análisis químicos de materiales refractarios, o por cualquier otro método aprobado por el comprador y el vendedor.

Para el fin de esta especificación la designación de la ASTM C-18-56T, deberá ser modificada como sigue:

1. Las muestras para los análisis químicos y de cono pirométricos equivalente serán limpiados magnéticamente para retirar el hierro introducido durante las operaciones de triturado.
 2. La última trituración para los análisis químicos será hecho con morteros y trituradores de mulita, corindón, carburo de boro y cualquier otro producto no contaminante, preferiblemente que de ágata.
- c) Muestras: Una muestra de cada lote de material comprendido bajo esta especificación será obtenida por el comprador o su designado por procedimiento aceptados por el comprador y vendedor. Y de acuerdo con esto la cianita natural, tanto en material refinado como en fragmentos, según requerimiento de la sección 2 (b) (3) será estudiada por el procedimiento siguiente:
1. En el caso de cianita natural la muestra será calcinada a un máximo de $1.500 \pm 10^{\circ}\text{C}$ y mantenida 2 horas a esa temperatura, siendo luego enfriada en el horno.
 2. Las muestras de mulita sintética serán deshidratadas, teniéndolas 12 horas a 120°C y entonces trituradas por el procedimiento siguiente:
 - a. Una pasada a través de una rueda dentada para un espacio de $3/4$ de pulgada. Cribándose con una criba de medida N^o 4.
 - b. El material mayor que la medida N^o 4 se muele por 3 pasadas sucesivas a través de un molino de rodillos Sturtevant, tamaño laboratorio con un paso de $3/8$ de pulgada. Después de cada paso de material se criba para retirar el refinado de tamaño inferior al 4.
 - c. El material restante es de nuevo triturado con el molino de rodillos y reducido a un tamaño de $1/8$ de pulgada. Pases

sucesivos seguidos de cribados dejarán todo el material con medida inferior a la 4.

3. Todas las porciones de la muestra triturada se recogen y junta, sacando de ellas 200 gr por procedimientos aceptados por el comprador y vendedor, para el análisis de cribado.
 - a. La muestra para el análisis de cribado será agitada durante 30 minutos en una criba oscilante rotativa de medidas 16 y 100, según la designación de cirbas standard de la ASTM E-11. Entonces se pesa para determinar los porcentajes totales menores del tamaño 16 y mayores del 100. El mineral mayor de 16 y el menor de 16 y mayor de 100, será reemplazado a sus cribas respectivas y se sacude por otros 10 minutos. El porcentaje total que pase por las cribas 16 y 100 será de nuevo determinado. Los períodos sucesivos de 10 minutos de agitación y cribado se continuarán hasta que la cantidad que no pase por la criba 16 o 100 sea inferior al 1 por ciento del peso total de la muestra.
 - b. El resultado de la prueba se da como el porcentaje total que pasa las cribas N° 16 y 100 la vez anterior a los últimos 10 minutos de agitación.

3.2.- COMPOSICION

Sobre la composición de estas sustancias en sus formas comerciales no existe tampoco ninguna especificación ni clasificación generalmente aceptada, variando ésta entre unos límites muy amplios, siendo fácil encontrar en el mercado material procedente de Sudáfrica con un contenido en alúmina del 84 por ciento junto con otro procedente de la India con el 70 por ciento o de Kenia con un 65 por ciento debido a la presencia de impurezas de minerales hiperaluminosos.

De la misma forma también es fácil encontrar ofertas de mineral con un contenido en alúmina inferior al teórico.

Como nota aclaratoria es interesante ver los resultados obtenidos analizando materiales comerciales procedentes de diferentes fuentes en la tabla siguiente.

ANALISIS DE MATERIALES COMERCIALES DE LAS SUSTANCIAS DE ESTE GRUPO

| | Composición teórica | Silimanita | | | Cianita | | Andalucita |
|--------------------------------|------------------------|---------------|--------------|------------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | | Sudáfrica* | Assam | Nuevo Gales del Sur | India | Virginia USA ** | Transvaal |
| SiO ₂ | 37,07 | 35,18 | 34,70 | 34,48 | 34,66 | 37,70 | 41,19 |
| Al ₂ O ₃ | 62,93 | 58,58 | 61,18 | 58,78 | 60,84 | 58,77 | 53,09 |
| Fe ₂ O ₃ | | 0,61 | 0,50 | 2,40 | 0,07 | 1,17 | 2,26 |
| TiO ₂ | | 1,20 | 0,10 | 1,45 | 1,18 | 1,30 | 0,46 |
| ZrO ₂ | | — | — | — | — | — | tr. |
| MnO | | — | 0,05 | 0,07 | — | — | tr. |
| CaO | | — | 0,35 | 0,80 | n. d. | — | 0,61 |
| MgO | | — | 0,16 | 0,12 | n. d. | tr. | 0,28 |
| Na ₂ O | | — | tr. | — | n. d. | 0,59 | 0,88 |
| K ₂ O | | — | tr. | 0,39 | n. d. | | tr. |
| Pérdidas en calcinción | | 4,48 | 2,93 | 1,36 | 0,90 | 0,38 | 1,20 |
| TOTAL | 100 | 100,05 | 99,97 | 99,85 | 97,65 | 99,91 | 99,97 |

— = no determinado

n. d. = no detectado

tr = trazas

* roca de silimanita

** concentrados de cianita

El productor de cianita de la mina de Ghatsila en Sighbhum, India, divide el producto extraído en tres calidades según su contenido en alúmina; éstas son: de alto grado (62—64 por ciento Al_2O_3), de grado medio (58—62 por ciento) y de bajo grado (54—58 por ciento), que analizadas posteriormente dan una composición media de:

| | (a) | (b) | (c) |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| SiO_2 | 33,31 | 35,84 | 37,22 |
| Al_2O_3 | 64,17 | 60,84 | 56,17 |
| Fe_2O_3 | 0,31 | 0,72 | 1,77 |
| TiO_2 | 0,69 | 0,94 | 1,17 |

El producto de las canteras de Kharsawan tiene hasta un 70 por ciento de alúmina debido a la presencia de corindón y contenido medio del 60 por ciento con un máximo de 2 por ciento de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ a partes iguales.

Sin embargo los análisis químicos no son siempre suficientes para determinar la calidad del producto, pues revelan la cantidad de impureza presentes, pero no la forma en que están. Así en la andalucita de Sudáfrica se encuentra gran cantidad de hierro, pero por encontrarse fuera de la estructura cristalina de esta sustancia, en forma de partículas discretas de limonita y hematites, es fácilmente separable por medio de triturado y cribado, y, por tanto, no debe considerarse como producto penalizable.

3.3.— COMPOSICION MINERALOGICA

Generalmente no se suelen hacer estudios muy profundos sobre la estructura mineralógica de estas sustancias cuando provienen de yacimientos ya conocidos, pues es poco probable que varíe mucho su composición, sin embargo es muy conveniente realizar rigurosos controles en el material procedente de nuevos, o desconocidos depósitos.

Las impurezas más corrientes en el producto comercial, suelen ser corindón, rutilo, óxidos de hierro, topacio, mica cuarzo y diversas arcillas, siendo el corindón y el topacio en la mayoría de los casos considerados beneficiosos, pues incrementan el contenido total en alúmina. Sin embargo, tampoco es conveniente un exceso de ellos debido a que hacen más difícil la manufactura del material.

En una materia prima con un contenido en alúmina del 59 por ciento se pueden tolerar por separado impurezas del 53 por ciento de topacio, 13 por ciento de muscovita—caolín (aunque en los Estados Unidos el máximo de 1 por ciento de $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ obliga a no admitirse más del 8,5 por

ciento de muscovita) y 5,5 por ciento de cuarzo, rutilo y óxidos de hierro.

3.4.— TAMAÑO DE LAS PARTICULAS

A pesar de ser este un factor muy importante, prácticamente, especialmente en materiales en los que sean necesarios trituración o flotación, en la calcinación y en el uso a que se destine, y a estar incluido en las especificaciones americanas, no se suele en el resto del mundo especificarlo nunca. Así, mientras en los Estados Unidos se venden en cuatro grados distintos correspondientes a 35, 48, 100 y 200 mesh, en la India no se especifican y en Inglaterra se comercializan desde tamaños de 1/2 pulgadas (menor que la medida 100), a cualquier otro necesario para algún fin particular.

4.— USOS

4.1.— VISION GENERAL

La mayor parte de la producción mundial de estas sustancias se dedica a la fabricación de productos refractarios, basándose en su principal propiedad, varias veces reseñada, de convertirse en mulita a altas temperaturas, y aprovechando la gran resistencia y estabilidad de este silicato ante el calor.

En pequeña cantidad también se utilizan estos minerales como abrasivos, (con fuerte competencia por parte de otros productos), como fuente de alúmina y en cerámica no refractaria.

Se explican a continuación estos usos de una forma más detallada.

4.2.— PRODUCTOS REFRACTARIOS

Los refractarios de mulita se usan principalmente en las industrias metalúrgica, del vidrio, cerámica, esmaltado, química, eléctrica, gas y cemento, representando las dos primeras el consumo mayor.

Hasta no hace mucho tiempo estos refractarios se usaban en la metalúrgia de minerales no ferreos, estando sus usos en las plantas de acero limitados a las temperaturas en que la alúmina permanecía sin alterarse. Sin embargo, posteriormente el consumo se fué incrementando debido al mejor conocimiento de las temperaturas que soportan y a su larga vida.

La composición, obtenida del análisis de los ladrillos refractarios, fabricados a partir de estas sustancias, aunque variable, se puede sintetizar en: 25 al 35 por ciento de SiO_2 , 55—65 por ciento de Al_2O_3 , 0,5—1,5 por ciento Fe_2O_3 , del 0,5 al 1,00 por ciento de TiO_2 , 0,5—0,8 de MgO , 0,5—1,0 por ciento de CaO y entre el 0,5 y el 1,0 por ciento de $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.

Cuando se necesitan refractarios con un contenido en alúmina superior al usual se utiliza como materia prima mineral con impurezas de corindón, como el procedente de Sudáfrica, encontrándose en el mercado bajo el nombre de refractarios hiper—aluminosos ladrillos con un contenido superior a 70 por ciento de Al_2O_3 que soportan temperaturas superiores a 1.600°C .

Los métodos de fabricación de los refractarios de este tipo no presentan características especiales, incluyendo aglomeración con arcillas y materias orgánicas, moldeo con barbotina, colada en cámara de vacío, etc., para lo cual se tritura el material calcinado, se clasifica y se mezcla en las proporciones adecuadas a fin de obtener la mayor densidad. Esta mezcla puede ser 455 por ciento de material de las medidas 7 a 25, 10 por ciento de la 27 a la 42 y el 45 por ciento más pequeño que el tamaño 72, según la clasificación para medidas de la ASTM (American Standard for Testing and Materials).

Como aglomerantes se puede usar arcilla plástica, poniendo sulfito bórico para dar consistencia antes de la cocción.

Otros aglomerantes pueden ser melazas, dextrina, bentonita, fosfato de aluminio, ácido fosfórico, laca. etc. En algunas variedades de andalucita la presencia de impurezas de pirofilita hace que sea auto-aglomerantes.

Un importante avance técnico se produjo, en los últimos años, en el campo de los ladrillos y moldes refractarios con la introducción de silicato etílico como medio aglomerante. Este material se caracteriza por su gran volubilidad, su poder reductor de tensiones superficiales, paso a gel fácilmente controlable, naturaleza altamente adhesiva de sus geles, y el desprendimiento de dióxido de silicio al calentarse. Su uso ha permitido aumentar los porcentajes de agrupados primarios y a la vez una mínima reducción de volumen.

Los productos obtenidos con rocas de este grupo son principalmente ladrillos y moldes, pero además se fabrican cajas, planchas, retortas, crisoles, bloques de

| Propiedades de los refractarios americanos | 50 ^o /o Al ₂ O ₃ | 60 ^o /o | 70 ^o /o | 80 ^o /o |
|---|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| Contenido en sílice (°/o) | 46 | 36 | 22 | — |
| Contenido en alúmina (°/o) | 50 | 58 | 72 | — |
| C. P. E. | 35 | 36 – 37 | 38 | — |
| equivale a °C | 1.785 | 1.815 | 1.835 | — |
| Densidad (gr/c.c.) | 2.339 | 2.178 | 2.082 | 2.659 |
| Porosidad (°/o) | 16 | 25 | 35 | 23 |
| Pérdida por variación de temp. (°/o) | | | | |
| con trabajo normal | 2 | 1 | — | 0 |
| Prueba de cambio lineal con el calentamiento: | | | | |
| 5 horas a 1.600 °C | ± 0,5 | ± 0,1 | ± 0,6 | 0 |
| 5 horas a 1.650 °C | — | — 0,4 | — | ± 1,0 |
| Prueba de carga — | | | | |
| 25 lb/p ² en 1,1/2 hora | | | | |
| a 1.350 °C | — | — | — | 0,1 |
| a 1.450 °C | 4,0 | — | — | — |

C. P. E. como pirométrico equivalente.

PROPIEDADES DE LADRILLOS REFRACTARIOS INGLESSES

| Tipo | 42 ^o /o Alúmina F. 22 | Silimanita (62 ^o /o Al ₂ O ₃) F. 14 | 70 ^o /o Alúmina X. 15 | 95 ^o /o Alúmina F. 7 |
|---|-------------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|
| Porosidad aparente (°/o) | 16,4 | 23,8 | 24,9 | 26,2 |
| Densidad (gr/ml) | 2,08 | 2,33 | 2,62 | 2,90 |
| Resistencia al aplastamiento en frío lb/p ² | 6.050 | 3.380 | más de 8.300 | 7.380 |
| Permeabilidad | 0,071 | 0,005 | 0,023 | 0,01 |
| Cambio lineal permanente en recalentamiento (°/o) | | | | |
| 2 horas a 1.410 °C | ± 0,3 | - | - | - |
| 2 horas a 1.500 °C | - | ± 0,1 | - 0,2 | - 0,3 |
| Refractariedad °C | 1.750 | - | - | - |
| Resistencia a los cambios térmicos bruscos | 30 ± | 30 ± | 30 ± | 30 ± |
| Refractariedad en carga térmica (50 lb/p ²) | | | | |
| Comienza la deformación | 1.300 | 1.500 | 1.560 | 1.340 |
| Deformación rápida | 1.540 | 1.580 | 1.580 | 1.560 |
| Colapso | 1.610 | 1.760 | 1.690 | 1.700 |
| Más propiedades pueden ser: | | | | |
| Punto de reblandecimiento | | | | |
| Cono Seger 35 | 1.770°C | | | |
| Refractariedad bajo carga | | | | |
| Cono Seger ± 29 | 1.659°C | | | |
| Densidad | 2,0 – 2,2 | | | |
| Peso de los ladrillos lb/pie ³ | 125 – 135 | | | |

mampostería, tubos de pirómetros, boquillas de toberas, material de laboratorio y muchos otros artículos; mezclados con plásticos y caucho se preparan cementos plásticos, cubiertas protectoras, masillas, etc.

En algunas mezclas se utilizan crudos de cianita para aprovechar sus propiedades expansivas.

Refractarios ligeros se consiguen añadiendo a la mezcla materiales combustibles como antracita, serrín o coque de petróleo. Al someter el producto a calcinación estos se queman obteniéndose así un material poroso del que un ladrillo de 9 pulgadas, con satisfactorias propiedades refractarias, pesa entre 2 y 3 Kg. En caso de ser necesario un producto muy poroso, se añade a la mezcla un cuerpo fácilmente gasificable, o un agente espumógeno.

Estos refractarios se usan en la industria metalúrgica para recubrir los hornos eléctricos de inducción empleados en el esmaltado de latón, bronce, cupro-niquel, ciertas aleaciones de hierro y cinc, aceros especiales, etc., y en el refinado de metales preciosos.

En la industria del acero, el uso de estos refractarios ha experimentado un aumento sustancial, formando parte hoy en día de casi todos los procesos, principalmente como techo de los hornos de fosa.

La adición del 5 por ciento de óxido crómico a la mulita, producto en el que se convierte todas las sustancias de este grupo por calcinación incrementa la resistencia a las escorias ferruginosas, con solo una pequeña reducción de sus propiedades refractarias. Este mismo efecto se obtiene con cromo, o alguno de sus concentrados, pero no se suele encontrar en el mercado.

En la siguiente tabla se pueden ver las propiedades de estos ladrillos refractarios estudiadas sobre muestras procedentes de Inglaterra y de EE.UU.

En la industria del vidrio los principales usos de los productos refractarios de mulita son en la superestructura y suelo de los tanques de cristal, así como grandes cantidades de mineral de cianita para aumentar el contenido del vidrio, y en casos para dar opacidad.

4.3.— ABRASIVOS

Estas sustancias no son, evidentemente, los mejores abrasivos existentes en el mercado, razón por la que no se consume grandes cantidades de las mismas para este fin, pero de acuerdo con sus propiedades de dureza se emplea en la fabri-

cación de morteros, bolas para molinos y en algunos casos para pulir especímenes metalográficos de hierro—grafito esferoidal.

Sin embargo en el campo de los troqueles de extrusión la silimanita resulta muy competitiva frente al bronce y aceros no especiales, debido a su mejor poder de penetración, y superior vida. Su uso resulta muy ventajoso, en particular cuando interese evitar chispas.

También el topacio tiene cualidad abrasivas, aprovechadas en el mercado, pero al encontrarse mejores productos cayo en desuso.

Es curioso hacer notar que durante varios años toda la producción de silimanita de Assam se empleó como abrasivo por haberla confundido con corindón.

4.4.— PIEDRAS PRECIOSAS

En algunos casos la andalucita, cianita, silimanita y topacio se encuentran en formas que por su coloración o cristalización reúnen las suficientes cualidades para ser consideradas gemas, pero ni en volumen ni en inversión, presentan una parte importante del uso industrial de estas sustancias.

Material de este tipo se ha encontrado en Brasil, donde en Minas Novas aparece andalucita con colores y van desde el verde al amarillo—marrón, Kenia, Tanganica y en las gravas gemíferas de Ceilan. Hay piezas de chiastolita capaces de ser talladas en el distrito de Transbaikalia en Siberia, en las minas de rubíes de Mogok en Birmania, y en Ceilán.

Aparecen gemas de cianita en Kashmir, Patiala, Punjab, Suiza y EE.UU.

4.5.— OTROS USOS

En caso de escasez de otras fuentes se pueden convertir estas sustancias en mena de aluminio como ocurrió en Suecia durante la segunda guerra mundial con la andalucita.

El topacio se aprovecha en los Estados Unidos como fuente de fluorita en la industria del acero para sustituir al espato fluor.

Las arenas de las playas de Florida se usan en la industria del cemento como fuente de hierro y alúmina.

La mulita mezclada con alúmina dá excelentes fibras de cerámica usadas

como aislante, o como filtros en medias y altas temperaturas o en atmósferas muy corrosivas.

5.— ESPECIFICACIONES PROPIAS DE CADA UNO DE ESTOS USOS

Los controles de calidad y especificaciones de los productos manufacturados son diferentes en cada país, estando regulados por disposiciones legales emitidas por los organismos oficiales de normalización y racionalización.

En Inglaterra el centro encargado es el British Standards Institution que en sus disposiciones B.S. 1902: 1952 (Adendum I. 1957: Adendum II. 1959) regula y archiva todas las disposiciones referentes a materiales refractarios.

Estas especificaciones cubren la clasificación y definición de materiales refractarios, muestras, métodos tipo de análisis químicos y pruebas físicas. Estas últimas comprenden: porosidad, densidad, peso específico, permeabilidad al aire, refractariedad, temperatura de trabajo, cambio lineal permanente con el calentamiento, expansión térmica reversible, resistencia a los efectos del CO y a los cambios bruscos de temperatura.

Los métodos americanos son fijados por la A.S.T.M (American Society for Testing Materials y varios organismos más regulados todos ellos por la A.S.A. (American Standards Association).

En España controla todas las disposiciones el Instituto Nacional de Racionalización y Normalización.

5.1.— GENERALIDADES

Los refractarios fabricados por calcinación de estas sustancias, pueden considerarse como un grupo intermedio de silicatos de aluminio de una serie continua, cuyos extremos son sílice y alúmina.

Se consideran refractarios de sílice los que tienen más del 92 por ciento de SiO_2 casi enteramente libre, o sea sin combinar.

Los refractarios silíceos, o semisilíceos, contienen del 78 al 92 por ciento de sílice, la mitad de la cual está libre y la otra mitad combinada en forma de silicatos de aluminio.

Refractarios aluminicos son los que tienen entre el 38 y 45 por ciento de alúmina combinada.

Los refractarios con un contenido en Al_2O_3 superior al 45 por ciento se conocen por el nombre de refractarios de alto contenido en alúmina, o hiperaluminosos.

Los productos hechos con mulita procedente de calcinación de silimanita son generalmente más densos y resistentes a la abrasión y al choque térmico que los manufacturados con las otras sustancias del grupo.

6.— PORCENTAJES DE UTILIZACION POR LA INDUSTRIA

Tanto en el campo de los productos refractarios como en el de los abrasivos o cualquier otro, estas sustancias forman sólo un pequeño grupo de las que se emplean en ellos, factor que junto con la especial estructura del mercado, generalmente de venta directa de productor al usuario, sin fiscalización de ningún organismo oficial salvo en el comercio exterior, hace que no haya estadísticas precisas sobre estas sustancias.

De cualquier forma, y como avance de más profundos estudios, se puede adelantar que la manufactura de refractarios absorbe un mínimo del 80 por ciento de la producción total, al 90 por ciento del cual lo consumen en partes iguales las industrias metalurgica y del vidrio; la mayor parte del 10 por ciento restante es absorbido por la de productos cerámicos.

7.- PRODUCTOS SUSTITUTIVOS

7.1.- MATERIALES NATURALES

La mayoría de los productos refractarios hechos con cualquiera de las sustancias de este grupo, pueden ser sustituidos por diversos materiales naturales como arcillas refractarias con puntos de fusión superiores a 1.760°C, productos con gran contenido en alúmina o hiperaluminosos, silicatos de alúmina fundida, magnesio-alúmina, sílice, etc. No obstante, y debido a que el uso de cualquiera de ellos suele representar una pérdida de eficacia, no es corriente emplearlos en aquellos sitios en que se recomienda el uso de cualquiera de las sustancias aquí estudiadas. Por otra parte estos sustitutos naturales son difíciles de obtener, de manejar, de instalar y en muchos casos representan un coste superior.

7.2.- MATERIALES SINTETICOS

Consecuentemente en el punto anterior, en aquellos países donde hay una producción deficitaria de estas sustancias en su forma natural se ha prestado mayor importancia a los estudios de técnicas encaminadas a obtener mulita sintética que al uso de sustitutos naturales, métodos que han tenido gran desarrollo en Estados Unidos, Alemania, Rusia, Francia e Inglaterra, viéndose reforzada esta

tendencia por la importancia estratégica de estas sustancias, junto con la irregularidad de su mercado.

La producción de mulita sintética, aunque aún sin llegar a reducir la extracción de material natural, representa hoy en día una parte muy importante del mercado, siendo sólo en EE.UU. muy superior a las 20.000 toneladas anuales.

Hay una extensa gama de productos a partir de los cuales se puede sintetizar mulita, prácticamente todos aquellos en los que se consiga hacer reaccionar sílice con alúmina a altas temperaturas, como bauxita, diasporita, gibbsita, caolín y sobre todo de silimanita, andalucita o cianita de baja calidad.

Ninguna de estas materias primas contiene la proporción correcta de sílice y alúmina para dar un producto formado completamente por mulita, y entonces la relación adecuada habrá de ser alcanzada añadiendo tanto alúmina a los aluminosilicatos deficientes en ella, como sílice en caso contrario, sin descartar la fusión conjunta de Al_2O_3 y SiO_2 puros en la proporción de 3 a 2.

Aunque en menor cantidad, también hay que considerar el tamaño de granulación de la materia prima, temperatura, presencia de líquidos y todos aquellos factores de cualquier naturaleza que influyan más o menos directamente en la calidad del producto final.

En la planta de sintetización de mulita de Belvedere, Kenk en Inglaterra, se usan varias materias primas, tanto en polvo como en trozos, que se trituran hasta un tamaño inferior a los 3/16 de pulgada y se mezclan. De la tolva de mezclado el material pasa mediante una cinta sinfin a un nuevo molino, cuyos engranajes son de acero al manganeso, con lo que cualquier contaminación posible se extrae magnéticamente.

El producto así obtenido se prensa y dá forma de ladrillos que pasan a un horno de deshidratación y luego al de calcinación.

El análisis de la mulita sintética así obtenida variará según los métodos, pero se puede resumir en los tipos núm. 3 y 4 sintetizados a 1.720 y 1.730°C. que figuran en el cuadro siguiente, siendo las columnas 1 y 2 resultados del análisis de productos sintetizados en plantas de U.S.A. teniendo fines comparativos.

En Estados Unidos y Francia se sintetiza mulita en hornos eléctricos a unos 1.900°C a partir de mezclas de arcillas, bauxita y diasporita.

Parece ser que en Rusia se ha puesto a punto un método nuevo que elimina el uso de hornos. Consiste en añadir a la mezcla aluminio metal y magnesio en proporciones desconocidas, autocalcinándose el producto sin más que quemar al

Mg consiguiéndose temperaturas del orden de los 2.000° C.

La multización del caolín puede acelerarse y realizarse a inferiores temperaturas por la acción catalítica de algunos materiales como los óxidos de Zn, Li, Mg, Fe, Mn, Mo que resultan ser muy buenos; con los de Na, K, Ti, Sn se obtienen resultados regulares. En el caso del corindón y arcilla sólo se obtienen buenos resultados usando como catalizadores óxidos de cromo y tungstenato de sodio.

ANALISIS DE MULITA SINTETICA

| | Basada en alúmina Bayer | | | Basada en Bauxita |
|----------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------------------|
| | Nº 1 | Nº 2 | Nº3 | Nº 4 |
| Composición química: | | | | |
| SiO ₂ | 30,95 | 24,02 | 25,30 | 23,05 |
| Al ₂ O ₃ | 67,27 | 74,35 | 73,00 | 72,70 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,23 | 0,34 | 0,54 | 1,80 |
| TiO ₂ | 0,79 | 0,45 | 0,15 | 0,61 |
| CaO | 0,11 | 0,024 | 0,10 | 0,09 |
| MgO | 0,36 | 0,21 | 0,13 | 0,08 |
| K ₂ O | | | 0,33 | 0,11 |
| Na ₂ O | 0,29 | 0,41 | 0,45 | 0,42 |
| P.C.E. | 39 | 39-40 | 39-40 | 38-39 |
| Porosidad aparente (°/o) | 8,6 | 13,8 | 11-13 | 8-11 |
| Análisis petrográfico (°/o) | | | | |
| Mulita | 87,4 | 93,5 | 92,8 | 95,5 |
| α Al ₂ O ₃ | 3,2 | 4,1 | 4,4 | 2,3 |
| Vidrio | 9,4 | 2,4 | 2,8 | 2,2 |

Al igual que en los refractarios manufacturados a partir de materiales naturales, en los sintéticos tienen también gran importancia el conocimiento de las impurezas presentes para predecir su comportamiento en las condiciones de trabajo. Estudios hechos por el U.S. Bureau of Mines para conocer el efecto de las impurezas de TiO₂, Fe₂O₃ y álcalis en los refractarios de mulita sintética dan como resultado que con un máximo del 5 por ciento de impurezas (aproximadamente 3 por ciento TiO₂, 11 por ciento Fe₂O₃ y 1 por ciento de óxidos alcalinos) aún se mantiene el volumen constante del refractario a las temperaturas de trabajo. Una tolerancia máxima del 0,5 por ciento de cada impureza, daba al producto una calidad igual a la de los refractarios hechos con material natural. Y Por fin la proporción (5 por ciento) de impurezas totales máximas para mantener el volumen constante puede aumentar sin más que variar la relación sílice-alúmina.

En Estados Unidos se fabrican 3 tipos diferentes de mulita sintética llamados:

Mulita sintética fundida: Preparada mediante el proceso Bayer con alúmina y sílice o bauxita y caolín en hornos eléctricos.

Mulita sintética de alta temperatura: Se prepara con mezclas de alúmina y caolín; alúmina, caolín y cianita; o bauxita y caolín, a temperaturas del orden de 1.750° C.

Mulita sintetizada a baja temperatura: A partir de bauxita sílicea, bauxita y caolín sobre 1.550° C.

En Alemania, durante la segunda guerra mundial, hubo dos firmas, la Koppers G.m.b.H. en Düsseldorf y Dr. Carl Otto G.m.b.H. en Bochum, que se dedicaran a la producción industrial de mulita sintética.

Koppers empleó un proceso discontinuo con una mezcla típica de 310 Kg, de arcilla, 140 Kg, de $\text{Al}(\text{OH})_3$, 50 Kg, de alúmina fundida y 15 Kg de feldespato, siendo la arcilla caolín procedente de Schnaittenbach de Baviera con una composición después de calcinado del 40,71 por ciento Al_2O_3 , 46,84 por ciento de SiO_2 ; 0,35 por ciento de TiO_2 y 1,34 por ciento de K_2O .

El hidróxido de aluminio se obtenía de una planta de proceso Bayer y daba una composición después de la calcinación del 97 por ciento al Al_2O_3 , 0,1 por ciento Fe_2O_3 , 1,1 por ciento SiO_2 y 0,5 por ciento de Na_2O .

La alúmina fundida, añadida para reducir la contracción de volumen, tenía una composición variable entre el 0,96 y 0,38 por ciento de sílice, 98,45 y 98,96 por ciento de alúmina, 0,23 y 0,30 por ciento de óxido férrico y 0,12—0,18 por ciento de óxido potásico.

La composición del feldespato era aproximadamente del 20,64 por ciento Al_2O_3 , 66,02 por ciento de SiO_2 , 0,18 por ciento Fe_2O_3 , 0,11 por ciento MgO , 0,58 por ciento CaO y 11,07 por ciento de $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, perdiendo en la calcinación el 1,53 por ciento.

Después de triturado y mezclado todo el material, se prensaba y cortaba en bloques que se deshidrataban por calentamiento, pasando luego a un horno tuneiforme en el que estaban 36 horas en un proceso de calentamiento, 22—24 horas a temperatura máxima de 1.600° C, y 48 horas de enfriamiento. El resultado obtenido eran unos bloques de mulita con una composición aproximada del 61,93 por ciento de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, 35,61 por ciento SiO_2 , 0,3 por ciento Fe_2O_3 , 0,36 por ciento CaO , 0,47 por ciento MgO y 1,32 por ciento de $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.

En la planta del Dr. Carl Otto se utilizaba una mezcla de sílice y alúmina junto con un producto intermedio del proceso Goldschmit para fabricar alúmina a

partir de arcilla con una composición del 70 por ciento de Al_2O_3 y 30 por ciento SiO_2 .

La mezcla consistía en 100 partes del producto Goldschmidt, 20 partes de caolín calcinado y 10 partes de caolín crudo procedente de Kemmlitz o Halle, que se prensaba hidráulicamente en bloques y se calcinaban a 1.650°C .

El producto obtenido no fué suficientemente satisfactorio para empezar su producción comercial con garantía, y no hubo tiempo de perfeccionarlo, por lo que hoy en día no se usa.

8.— CLASIFICACION EN FUNCION DE SUS USOS

No es posible establecer una clasificación de las rocas industriales, basada en sus usos, mientras no se haya efectuado el estudio completo de todas y cada una de ellas.

De cualquier forma las sustancias señaladas en el presente informe parecen fácilmente clasificables como una parte de las rocas refractarias, grupo que se irá completando a medida vaya avanzando el estudio.

Como se indica en el capítulo primero, apartado 1.1., en la nomenclatura de este grupo de sustancias existe un gran desacuerdo, pues es llamado de diferentes formas en cada país, basándose esta terminología en conceptos erróneos, históricos o caprichosos. En vista de lo cual parece conveniente establecer un nuevo nombre para designar estas sustancias que tenga base científica e industrial. Este término podría ser un principio "sustancias multitógenas".

Esta nomenclatura tiene la ventaja sobre la usada hasta ahora de grupo de la silimanita, cianita (EE.UU.) o andalucita (U.R.S.S.) de estar basada en la propiedad más característica de todas estas sustancias, además de evitar el desconcierto que produce usar un mismo término para designar el desconcierto que produce usar un mismo término para designar una sustancias y a la vez un grupo de ellas. Por otro lado es imposible considerar al topacio, dumortierita y pinita como

190 10

pertencientes al grupo de la silimanita pues su composición química es diferente, mientras que industrialmente es evidente que son similares, contrasentido fácilmente evitable si se usa el término propuesto pues en él tiene cabida perfecta tanto la andalucita, cianita, silimanita y mulita como el topacio, pinita y dumortierita.

Sin embargo este término no se considerará definitivamente establecido hasta que no se haya completo este estudio.

BIBLIOGRAFIA

- Industrial Minerals and Rocks de Seeley W. Mudd, Editado por The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (A.I.M.E.).
- Mineral Facts and Problems del Bureau of Mines. Editado por United States Department of the Interior.
- Minerals for the Chemical and Allied Industries. Escrito por Sydney J. Johnstone, Editado por Barnes & Noble.
- Minerals Yearbook, de la Oficina de Minas del Departamento del Interior de Estados Unidos.
- Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico, de Alan M. Bateman. Editado por Ediciones Omega.
- Tratado de Mineralogía de F. Klockmann y F. Romdahr. Editado por Gustavo Gili, S.A.
- Sillimanite. E.R. Varley. Overseas Geological Surveys.
- Les minéraux du groupe de la sillimanite. J. Lougnon. París.
- The nomenclature of high alumina refractories. J. Soc. Glass.
- Kyanite. A materials survey T.A. Klinefelter and J.D. Cooper.
- Formation of mullite from cyanite, andalusite and sillimanite. J.W. Greig. J. Amer. Ceram Soc.
- Metamorphism around the Lochnagar granite. Aberdenshire. A. G. Macgregor.
- Geology of kyanite deposits at Henry Knob, South Carolina. L. Smith and R. Newcome, Jr. Econ. Geol.
- Sillimanite refractories. W.L. German, Ceramics.
- The Chemical analysis of sillimanite in the form of a firebrick. Analysis Committee of the Society of Glass Technology. J. Soc. Glass Technol.
- Ceramics and refractories. L.R. Barret. (London: Society of Chemical Ind.).
- Synthetic sillimanite in ceramic bodies. T.A. Curtis. J. Amer. Ceram. Soc.