

## CAPITULO III

# ESTUDIO SOBRE EL GRANATE

### 12. PROPIEDADES

La palabra granate proviene del latín *malum granatum* que significa granada (magnus). Cuando se dice granate, o como se decía hace tiempo "granada", el pensamiento nos lleva a una piedra rojo oscura, brillante y con tendencia al marrón o al púrpura. La mitología, la leyenda y los poderes ocultos del granate, como joya, se relaciona con la piedra de los nacidos en el mes de enero bajo el signo de Capricornio y con el significado de la fidelidad. Pero la realidad no es tan simple, desde el punto de vista químico, los granates se pueden considerar como silicatos que contienen calcio, aluminio, hierro y más raramente magnesio, manganeso y cromo, la fórmula general  $Y_3X_2(SiO_4)_3$ , donde Y es un metal bivalente (calcio, hierro en estado de oxidación +2, magnesio), y X uno trivalente (aluminio, hierro en el estado de oxidación +3 y cromo), con esta diversidad de composición química la naturaleza nos ofrece variedades mucho más raras y preciosas, como las de color rosa, naranja, marrón, amarilla e incluso de un brillante color verde amarillo o verde esmeralda; no faltando tampoco los ejemplares prácticamente incoloros. Por tanto, el granate no es un mineral, sino un término que comprende un complejo grupo de minerales.

También existen los falsos granates que se fabrican en vidrio con todos los colores poco frecuentes de este mineral. Para distinguir entre los diferentes granates (especialmente los rojos y los naranjas), los granates falsos y las numerosas piedras naturales que se le asemejan, es absolutamente imprescindible el refractómetro, la balanza para la determinación de pesos específicos, el polariscopio, el estereoscopio o al menos una buena lente de nueve o diez aumentos; para los apasionados de un cierto nivel, es necesario el espectroscopio para una mayor certeza.

La composición química de los granates es variable. Se forman amplias series isomorfas entre los elementos Mg, Fe, Ca, Al, Cr, V, Mn, Ti, Zr, etc. Según la cantidad dominante de los elementos, a continuación se mencionan algunas de las muchas especies de granates que se han encontrado en el mundo.

Tabla No. 3: Variedades de granate según el elemento químico principal.

<b>ELEMENTO QUÍMICO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>FORMULA QUÍMICA</b>
<b>AL</b>	<b>Piropo</b>	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$
	<b>Grosularia</b>	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$
	<b>Hessonita</b>	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$
	<b>Demantoide</b>	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$
	<b>Espesartina</b>	$Mn_3Al_2(SiO_4)_3$
	<b>Almandino</b>	$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$
<b>Fe</b>	<b>Andradita</b>	$Ca_3Fe_2^{+3}(SiO_4)_3$
	<b>Majorita</b>	$Mg_3(Fe, Si)_2(SiO_4)_3$
	<b>Calderita</b>	$Mn_3Fe_2(SiO_4)_3$
	<b>Eskiaigita</b>	$Fe_3^{+2}Fe_2^{+3}(SiO_4)_3$
<b>Cr</b>	<b>Uvarovita</b>	$Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$
	<b>Knorringita</b>	$(Ca, Mg)_3Cr_2(SiO_4)_3$
<b>V</b>	<b>Goldmanita</b>	$Ca_3V_2^{+3}(SiO_4)_3$
<b>Zr</b>	<b>Kimzeyita</b>	$Ca_3Zr_2(Al_2SiO_{12})$

## 12.1 El piropo

Se trata de un silicato de magnesio y aluminio de color rojo intenso, a menudo con tendencias al marrón. El significado etimológico del término es de hecho el de "ojo de fuego". Aunque transparente, al igual que todos los demás granates más importantes, el piropo es a menudo muy oscuro para pretender ser una joya verdaderamente atractiva. Estuvo muy de moda durante el siglo XVII y XIX, cuando se extraía de los grandes yacimientos de Checoslovaquia (era conocido como granate de Bohemia). Hoy en día se extrae también en Sudáfrica (en las zonas diamantíferas), en Madagascar, en Tanzania, en Arizona y en Australia. Esto se refiere, naturalmente, para el material de interés gemológico, porque piropos y otros granates en cristales no transparentes abundan en las rocas metamórficas de medio mundo, incluso en dimensiones que pueden alcanzar las de un puño cerrado con una densidad de 3.65 a 3.80 y dureza media alrededor de 7.25, por lo que esta gema es válida para cualquier uso con fines abrasivos y gemológicos.



El piropo puro, en el que se respeta rigurosamente la composición expresada por su fórmula química, debería de ser incoloro, pero esto no sucede ya sea por la citada facilidad de combinación o por la ocasional presencia de óxido de cromo. Las piedras que más se asemejan al piropo son, además del almandino, el rubí en la variedad un poco oscura y la espinela roja, ambos muy apreciados. Para la distinción basta normalmente el refractómetro, pero en el caso de especies fuertemente cromíferas es preciso la determinación de la densidad y eventualmente también del espectro de absorción. Las imitaciones son frecuentes en el caso del almandino. También válido para ambas especies podrían ser los poderes mágicos que la tradición popular les ha atribuido, como por ejemplo, infunden amor, pasión y hacen invulnerable a la persona que se adorna con ellos.

En Europa los yacimientos más famosos se encuentran junto a Trebnice, en Bohemia, donde durante siglos se han obtenido los famosos rubíes o granates de Bohemia, muy usados en la elaboración de las joyas. En Carolina del Norte, se encuentra una bella rodolita; en Arkansas, por el contrario, en las mismas localidades diamantíferas, se encuentran bellos gránulos de piropo semejantes a los de Bohemia, también otros buenos ejemplares se encuentran en los yacimientos de diamantes de Sudáfrica.

En la cadena alpina un yacimiento muy interesante está constituido por la roca peridotítica, en Suiza, en la cual se encuentran incluidas masas de este mineral de un bello color rojo rubí, pero sin forma. En España se encuentran yacimientos en la sierra de Segura (Jaén).

Sus usos son diversos, como por ejemplo, para instrumentos de corte, pulido, perforación y gema semipreciosa.

## 12.2 El almandino o almandina

Es el granate de mayor abundancia y con más usos en la industria de los abrasivos y las joyerías. El almandino, cuyo nombre se deriva de Alabanda, una antigua ciudad de Asia Menor, a menudo no se puede distinguir a simple vista del piropo, excepción hecha para los ejemplares que en vez de una cierta tendencia al marrón presentan una tonalidad dominante violeta púrpura. No muy frecuentes y, por tanto, ambicionados por los coleccionistas son los almandinos estrellados, que tallados adecuadamente, muestran una estrella luminosa de cuatro puntas o incluso seis, según la dirección en la cual se ha efectuado la talla. Hace algún tiempo se practicaba un corte en el material con el fin de aclarar el color, pero hoy en día ya no se practica esta técnica.



Los yacimientos de almandino son numerosos y muy productivos. Los más importantes son los asiáticos y los africanos (Madagascar, etc.), también existe abundancia en Brasil. Es poco abundante la producción de República Checa y aún menor la de Austria. Es importante mencionar que el principal consumidor y exportador es Estados Unidos de Norte América.

Las "piedras" semejantes al almandino son el piropo, rubí muy oscuro, espinela rojo-marrón o rojo - violáceo (mucho menos valioso que el rojo intenso) y alguna turmalina de la variedad siberita.

## 12.3 Combinación piropo - almandino

Entre los granates rojos que presentan valores de índice de refracción y de densidad intermedias entre los del piropo y del almandino, particularmente atractivo y de discreto valor es un material denominado rodolita. Esta es una combinación especial en la cual prevalece el piropo, presenta un índice de refracción superior a 1.75 pero inferior a 1.77, densidad 3.84 – 3.85. Con el polariscopio se puede notar a menudo una birrefringencia anómala debido a tensiones.

Los yacimientos clásicos de la rodolita (almandino de alta pureza), más clara y brillante que el almandino común, eran los de Estados Unidos (Carolina del Norte) y de Srilanka (Ceilán), donde el material extraído se presenta en un bello color rojo-rosa con una tendencia al violeta. Otros yacimientos se han explotado muchos años después en Africa Oriental (Madagascar, Rhodesia, Tanzania y Zambia), pero los cristales de estas localidades muestran tonalidades distintas de los primeros, más intensas en el rojo y con alguna desviación al marrón. Los granates rojos más comunes presentan inclusiones de pequeños gránulos de circonio y diminutas acículas de rutilo. Otra rodolita procedente de numerosos yacimientos del Brasil, bastante semejante a la rodolita de Ceilán, es la turmalina ruhelita.

#### 12.4 La espesartina

Se inicia con esta especie la serie de los granates que resultan prácticamente desconocidos al gran público, porque son raros y, por tanto, además de mayor valor, difícilmente encontrables en el mercado, por motivos evidentes no están amparados por leyendas ni pueden alardear de poderes sobrenaturales y ni siquiera se les considera válidos para falsificarlos o imitarlos. Estas gemas son de un brillante color naranja e incluso amarillo, con una ligera tonalidad rosa; la presencia de una cierta cantidad de almandino y, por tanto, de hierro en la combinación hacen más intensos los cristales, que aparecen entonces con un color rojo-aurora, rojo-marrón e incluso marrón completo. El nombre deriva de una localidad de Baviera, Spessart, pero los yacimientos más importantes están en Ceilán, Brasil, los Estados Unidos, Madagascar y Suecia.



Las inclusiones consisten en "velos", que observados al microscopio se revelan que están formados por fases líquidas "aplastadas", acompañadas o no por pequeñas burbujas de gas. Menos típicos son algunos cristales o inclusiones de tres fases que caracterizan la fluorita verde y la esmeralda colombiana. Semejantes a la espesartina pueden ser tanto los cuarzos "calentados" (falsos topacios) como los verdaderos topacios; es prácticamente idéntica a la hessonita una variedad del granate grosularia que se describirá en breve, pero la gran diferencia tanto de las inclusiones como de las constantes físicas, ayudan al experto a distinguir las dos piedras.

Para satisfacer a los apasionados recordamos como última cuestión la existencia de rarísimos ejemplares, provenientes de Tanzania y Birmania septentrional, que tienen calidad de gema y muestran coloraciones verde-azuladas a la luz natural y rojo-púrpuras con la luz artificial (luz de tungsteno). Se usa como gema.

#### 12.5 La grosularia:

A esta especie pertenecen numerosas variedades, unas más bellas que otras, transparentes, traslúcidas u opacas, y con una gama de colores difícilmente encontrados en otros granates. Se usa como gema.



### 12.5.a La grosularia "verdadera"

Las gemas son amarillo-claro, amarillo-oro brillante o amarillo-verdoso e incluso incoloras ("leucogranates") que se asemejan a cuarzos, berilos y topacios, pero muestran brillo y fuego más vivo. Los yacimientos se encuentran en Africa Oriental (en particular en Tanzania y en Kenya), Canadá y México.

### 12.5.b La hessonita

Es una bella variedad de color miel, amarillo-rosada, anaranjada aurora o naranja marrón claro ("piedra canela" de Ceylán). Excelentes cristalizaciones, brillantes y de bello color se encuentran en Italia, en las regiones de Piamonte y Liguria, pero no pueden utilizarse para la talla. Como ya se ha mencionado, el mineral más parecido en el aspecto es la espesartita, pero las inclusiones de hessonita son completamente distintas (vértices y estrías como las imitaciones en vidrio, y granulosidad debida a cristales diminutos individualizados o reagrupados). Otra variedad semejante es el jacinto de circón. Se usa como gema.

### 12.5.c La grosularia verde

Hacia finales de 1965 se descubrió en Pakistán, junto a una variedad masiva que ya se conocía desde hace tiempo, una grosularia verde transparente, con tonalidades en amarillo o en los mejores casos semejantes a la esmeralda. El descubrimiento no tuvo gran resonancia hasta que casi cien años después, en una zona entre Tanzania y Kenya, se encontró en discretas cantidades un material idéntico al pakistaní y en algunos casos todavía de tonalidad más intensa. El color se atribuyó al cromo (cromogrosularia) y secundariamente a vestigios de vanadio. En el lugar de hallazgo los cristales se denominaron "tsavorita". Las inclusiones son "velos" de diminutas gotas líquidas aplanadas y en escamas de pequeños cristales. El material verde amarillento y verde claro se confunde un poco con el olivino, el granate demantoide y la turmalina, mientras que el verde intenso se asemeja mucho a la esmeralda, al granate uvarovita y a la cromoturmalina africana. La grosularia es efectivamente muy bella debido a su coloración y por su brillo intenso, y además porque es muy difícil encontrar ejemplares "correctos" de un peso superior a 7 u 8 quilates, por esta razón el valor comercial de esta nueva gema es de varios miles de dólares por quilate.

### 12.5.d La hidrogrosularia

Es una variedad compacta microcristalino de grosularia; siendo traslúcida u opaca se talla con superficies curvas tipo "cabujón" para collares o gargantillas. Los colores son blanco céreo, grisáceo, azulado, verde amarillo claro, verde jade más o menos intenso. De éstos el único que tiene una cierta importancia, comercialmente hablando, es el verde, a menudo punteado por gránulos oscuros de magnetita y cromita. La coloración se atribuye al cromo y el material se vende habitualmente con el engañoso epíteto de "jade de granate", pero la distinción es bastante fácil, puesto que el granate masivo, además de tener una densidad superior al del jade, aparece el rojo oscuro si se observa con el filtro de Chelsea.



## 12.6 La andradita:

De esta especie de granate en la que el metal bivalente es el calcio, mientras el aluminio deja su puesto al hierro trivalente, existen tres variedades: El melanito, la topazolita y el demantoide.



### 12.6.a El melanito

De color negro o marrón oscuro. Contiene titanio y se encuentra, sobre todo, en Francia; en los Alpes y en California. El material compacto servía, al igual que la turmalina negra, para confeccionar joyas de luto.

### 12.6.b La topazolita

Es una andradita de color amarillo-limón, que se encuentra casi siempre en cristales muy pequeños, por lo que es difícil que se utilice para la talla. Los pequeños cristales a disposición de los coleccionistas no son atractivos y proceden de la zona de los Alpes y de la ex Unión Soviética.

### 12.6.c El demantoide

Es el más bello y precioso de todos los granates. De color verde amarillento o verde prado e incluso verde esmeralda cuando están presentes trazas de cromo. La dureza no es excepcional (supera ligeramente el 6.5), la resistencia a los ácidos parece escasa, pero el índice de refracción está comprendido entre el 1.88 y el 1.89; la dispersión (0.057) supera sensiblemente al del diamante. El demantoide posee un brillo muy intenso, diamantino, de aquí nace el origen del nombre de este granate, cuya densidad varía entre 3.83 y 3.85.

Si los cristales son limpios y de bella coloración, la talla como la de un brillante, su espesor y proporciones son las ideales respecto al índice de refracción, entonces las gemas que se obtienen son verdaderamente espléndidas, brillantes y dotadas de una gama de colores verdaderamente extraordinaria. Los ejemplares que respondan a todos estos requisitos y de peso superior a 4 ó 5 quilates (muy raros e incluso muy difícil de encontrar), valen varios miles de dólares por quilate.

Los motivos de tal precio son múltiples, entre otros los yacimientos se encuentran únicamente en los Alpes italianos (Val Malenco) y en los Urales, pero se duda que sean productivos. Se excluyen debido a los muy escasos hallazgos y la poca transparencia de los cristales; otras zonas son el valle Zermatt y dos localidades del Congo. La escasez de cristales limpios y válidos para la talla (para lo cual no deben ser evidentes las inclusiones fibrosas de amianto) es tan baja que sólo se encuentran dos o tres ejemplares buenos sobre un millar.

Los cristales que presentan también una buena coloración son todavía menos numerosos, las gemas que se han admirado de esta variedad son rusas, que, además de cromo, contienen también titanio (sí se trata de viejos ejemplares). Una gran parte de las piedras de la producción italiana, más bien escasa hasta hace algunos decenios, mostraba, por el contrario, un componente amarillo o bien marrón, a veces tan marcado hasta para hacer dudar si se puede hablar todavía de demantoides o se debe llamar a estos ejemplares "demantoide – topazolitas", o todavía más simplemente andraditas. Con esto no se desprecia a los demantoides italianos, pero se debe reconocer la absoluta superioridad, sobre todo a la luz artificial de las gemas rusas de vieja producción.

Se dice que los más bellos demantoides se asemejan a las esmeraldas (y tanto más cuanto más cromíferas y cuanto más rojas aparecen al filtro Chelsea), pero en realidad ninguno de los granates verdes (ni siquiera la tsavolita o la uvarovita) pueden engañar fácilmente al ojo de un experto. De hecho muestran junto al verde una tonalidad azul como la de la esmeralda y un ligero componente amarillo, y esto se verifica también en las gemas de color intenso. Otras especies semejantes al demantoide son la titanita (por su intenso "fuego"), el olivino (por su coloración) y un poco la turmalina verde amarilla.

## 12.7 La uvarovita

También llamada el granate de los Urales, en esta variedad el calcio sigue siendo ion bivalente, y el cromo el trivalente. El color verde es quizá el más bello y el más parecido al de la esmeralda. La dureza es de 7,5, y la densidad, de 3,77; el índice de refracción puede variar entre 1,86 y 1,87. Tales valores, junto a su magnífica coloración, harían de la uvarovita un elemento muy válido para utilizarse como gema, si no fuese porque los cristales son muy pequeños o muy opacos.



El nombre de este único granate de cromo procede de un estadista ruso, y el material para ser tallado se encuentra únicamente en la ex Unión Soviética (Urales). El segundo yacimiento en orden de importancia se encuentra en Finlandia, pero también aquí se encuentra en cristales minúsculos, presentándose pocas porciones limpias de gruesos cristales opacos y de tinta oscura. También en Polonia, India, Estados Unidos y Canadá se dispone de este material, aunque en pequeña cantidad. Como rareza excepcional también se ha encontrado en algunos lugares, naturalmente en elementos muy diminutos y casi de exclusivo interés mineralógico. Semejantes a los pequeños cristales de uvarovita son la esmeralda y las piedras verdes como la cromograsularia y el demantoide.

Debido a la gran variedad química de la familia de los granates, muy frecuentes son los cristales mixtos, es decir, los que son intermedios para la composición de dos o más especies; por ejemplo, puede tenerse un cristal mixto de almandino  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  y piropo  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ; la combinación de estas especies se debe principalmente a la facilidad de intercambio de los iones de Fe y Mg, sus fórmulas químicas parecidas, sus cationes y aniones tienen respectivamente iguales tamaños relativos, presentan también estructuras cristalinas relacionadas entre sí. Estos compuestos forman sustancias isomorfas, es decir, que presentan estructuras internas similares, dichas sustancias cristalizan con formas externas parecidas y muestran la misma exfoliación.

## 13. USOS Y APLICACIONES

Dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas y cristalográficas el granate y en especial el almandino tiene dos tipos principales de aplicaciones:

- a. Usos industriales
- b. Usos en joyería fina y artesanal

### 13.1 Usos industriales

Los principales usos que posee el granate, como material abrasivo, radican principalmente en su alta dureza (7.5 de la escala de Mohs) y en las afiladas aristas que forma el cristal al ser molido. Es ampliamente usado en infinidad de industrias como material abrasivo en diferentes formas.

#### 13.1.1. Como material abrasivo, medio de filtración y otros

Los abrasivos son todos los materiales, productos químicos o naturales, cuya dureza es mayor que la del objeto a raspar; pueden ser en polvo, líquidos, mixtos (líquidos-polvo), aglutinados en materiales de cemento, resinas sintéticas, aleaciones metálicas y/o montados en soportes, flexibles, rígidos, oscilantes y giratorios. Pueden ser producidos para allanar, alisar, pulir mármol, piedra, granito, cerámica, vidrio, madera, acero y materiales varios que precisen un acabado de sus superficies.

Pueden servir para cortar, taladrar, alisar y pulir los antedichos materiales y todo cuanto se pueda imaginar. Las características principales de los abrasivos están definidas por la clasificación granulométrica y de la dureza correspondiente a la escala de Mohs.

Por más de un siglo, el granate ha sido utilizado principalmente para el pulido de lentes ópticos y placas de vidrio.

Los sectores industriales que usan el granate, incluyen a la industria petrolera (el más grande consumidor de granate de grado para explosivos), plantas de filtración, fabricantes de motores para vehículos y aviones; edificación y finos acabados en muebles de madera.

Es ampliamente usado como abrasivo en telas y papel, abrasivos encubridores; cortado hidráulico a alta presión y para trabajos de acabado en cuero, hule y plásticos. En el mercado de los polvos abrasivos, compite con el carburo de silicio, los diamantes industriales, y los óxidos de aluminio.

Las industrias de la edificación y de los aviones de aluminio usan el granate para la limpieza de toberas y el acabado de las superficies metálicas. Usos similares incluyen la limpieza y el acondicionamiento del aluminio y otros metales suaves.



El uso del granate para limpieza por chorro abrasivo (blast cleaning), ofrece excelentes resultados y bajos costos hasta el punto que ha sido un magnifico sustituto de la arena silíceo y escoria volcánica. El polvo de granate posee un alto peso específico, es decir, es fácil de limpiar por que no es arrastrado por corrientes de aire como la arena silíceo y de escoria, además se puede reutilizar o reciclar en el proceso hasta ocho veces obteniendo excelentes resultados.

A continuación se describe una formula matemática que puede usarse para calcular el costo total en el proceso de limpieza por chorro a presión<sup>1</sup>:

$$\text{Costo Total} = \frac{\text{abrasivo} + \text{mano de obra} + \text{equipo}}{\text{razón de producción}} + \text{otros costos}$$

Esta formula puede colocarse como:

$$\text{Costo Total} = \frac{(A \times B) + C + D}{Y} + \text{otros costos} \quad \text{Total en Q / Pie}^2$$

Donde:

A es el costo del abrasivo (granate, arena silíceo o escoria volcánica), en Q / ton

B es la razón o tasa de uso, manejo o empleo

C es el costo de la mano de obra en Q / hr

D es el gasto del equipo en Q / hr

Y es la razón o tasa de producción, usualmente en pie<sup>2</sup> / hr

Otros Costos pueden ser calculados y agregados como se desee

El costo total de la limpieza abrasiva a presión es la suma del material abrasivo, mano de obra, los costos incurridos por equipo entre la razón de producción y el cociente más otros costos que incluyen gastos contenidos en monitoreo medio ambiental, limpieza y eliminación de basura, entre otros.

Se plantea el siguiente ejemplo para comparar entre los costos incurridos al usar la arena silíceo y al usar el polvo abrasivo de granate en la limpieza por chorro a presión.

	Arena silíceo	Granate
A Costo del abrasivo puesto en la empresa US\$ / ton	40.00	285.00
B Velocidad de operación del eyector en ton / hr	0.85	0.38
C Costo de la mano de obra en US\$ / hr	50.00	50.00
D Gasto del equipo en US\$ / hr	50.00	50.00
Y Rendimiento calculado en pie <sup>2</sup> / hr	<u>158.00</u>	<u>261.00</u>
<b>Costo total directo en US\$ / pie<sup>2</sup></b>	<b>0.85</b>	<b>0.80</b>

Si se analiza el rendimiento junto con el costo directo puede obtenerse el ahorro:

- ◆ Granate: 0.85US\$/ pie<sup>2</sup>x 158 pie<sup>2</sup>/hr = 134.30 US\$/hr
- ◆ Arena silíceo: 0.80US\$/ pie<sup>2</sup>x 261 pie<sup>2</sup>/hr = 208.80 US\$/hr

<sup>1</sup> Fuente: [www.Westerngarnet.com/emerald-fullcost.html](http://www.Westerngarnet.com/emerald-fullcost.html).

Además, debe tomarse en cuenta que el 85% del polvo de granate se puede reciclar hasta ocho veces, obteniéndose una reducción del costo arriba de US\$ 0.40 / pie<sup>2</sup>.

Tabla No. 4: Los principales usos de los granates en Estados Unidos de América y su estimado mercado compartido son:

Medio para explosivos en aire/agua	45 %
Filtración de agua	15 %
Polvos abrasivos	15 %
Corte con agua a alta presión	7 %

El mineral de granate almandino analizado proveniente de Pachalum y Joyabaj, resultó tener una dureza de 6.5 a 7.5; un peso específico promedio de 4.21; color rojo pardusco, translúcido en pequeñas secciones pulidas y en granulometrías finas menores a la malla 60, sub-translúcido u opaco y cristales rojizos traslucidos. Además de los resultados cuantitativos de la composición química que resultaron ser muy favorables, las aristas que formó el mineral al ser molido fueron filosas. El proceso de separación y concentración por gravedad resultó ser muy eficiente y sencillo como lo demuestra la formula del criterio de concentración<sup>2</sup>, debido a la gran diferencia de pesos específicos que existe entre los minerales componentes de la roca. Este mineral se recomienda para ser usado como material abrasivo, ya sea en polvo o montado sobre papel para lija.

#### 13.1.1.1 Lijas, abrasivos y lanas

Los abrasivos se clasifican por el tamaño del grano y van identificados en la parte posterior de la hoja: cuanto más pequeño es el número más basto es el abrasivo.

Para un correcto preparado de superficie suele bastar con tres pasos: comenzando con un abrasivo de grano 100, cambiando después a uno de 180 y terminando con uno de 240.

Entre los materiales más utilizados están los papeles de lija flexibles ideales para zonas curvas o perfiladas, papeles con autolubricantes de silicio para eliminar asperezas entre capas, grano de vidrio para lijado a fondo de madera, la lija con granate para el pulido entre distintas capas, el polvo de piedra pómez para deslustrar barnices, estropajos de alambre para deslustrados a la cera y, para finalizar, los papeles con óxido de aluminio (alox), muy utilizado en trabajos de preparación de sustrato.



También podemos encontrarnos con cepillos de cerda metálica útiles para decapar o abrir la veta cuando se aplican acabados enlacados.

<sup>2</sup> Este criterio se explica en la sección de Análisis de los resultados de las pruebas de separación por gravedad.

Actualmente también existe un amplio abanico de lijadoras eléctricas, promocionándonos la potencia necesaria para conseguir un desgaste rápido y un buen acabado.

#### 13.1.1.2 Corte de chapas de acero con chorro de agua y abrasivo (granate) a presión

El procedimiento consiste en que miles de partículas minerales, pequeñísimas, rojas y cristalinas, rodeadas de litros de agua bajo una presión altísima, explotan a una velocidad de miles de kilómetros por hora. En el movimiento, las partículas, parecidas a piedras preciosas, corroen el material, dejando algunas de las partículas más pequeñas al comienzo de su viaje. Estos granos pequeñísimos raspan las partículas del material corroído, dejando un túnel de espacio roído detrás de ellos. Las partículas raspadas caen, junto con el granate, dentro de un gran tanque de agua. El proceso de corrosión es violento, pero cualquier persona puede acercarse a observar este fenómeno sin recibir más daño que un vapor fino en sus gafas protectoras. Esta corrosión acelerada se controla con una máquina tecnológicamente avanzada con una memoria tremenda y habilidad para calcular. Quienes conozcan la cortadura del chorro de agua con abrasivo reconocen, seguramente, esta descripción.

Las máquinas cortadoras de agua pueden cortar casi cualquier material existente. Durante más de una década, las máquinas cortadoras de agua han cortado materiales tan diversos como plásticos, piedra, mármol, aluminio, acero y titanio. Las máquinas cortadoras de agua se controlan con una computadora llamada controlador, que usa programas especializados para cortar. La cabeza de la máquina que contiene el orificio y el tubo de enfoque se montan en un sistema cortador para una movilidad de hasta 6 ejes. Durante el corte con abrasivo, se usa entre 272.2 g y 2 Kg. por minuto de abrasivo (generalmente se trata del granate), dependiendo del tamaño de la bomba y de la velocidad de la cortadura. La presión del agua puede alcanzar hasta 4136.88 bar.

Las ventajas de la cortadura de la máquina cortadora de agua con abrasivo son numerosas. Este tipo de cortadura no deja una zona afectada por el fuego, no crea agujeros grandes del comienzo, no hay ninguna distorsión del fuego y no existe ningún peligro serio para el operador. Algunos materiales no se pueden cortar con el fuego, porque afectaría al material de una manera destructiva. Con la cortadura de abrasivo, las partes se pueden cortar en una línea común, guardando el material caro. Cuanto más lenta sea la velocidad de la cortadura, más fina será la calidad en los dos lados de la abertura. La computadora incluso puede ser programada para retardarse en las esquinas y asegurar así una cortadura de alta calidad. Los consumibles en la cortadura de fuego son los gases, los cuales se queman y no se los pueden recuperar ni recircular. Esto es lo que pasaba con el abrasivo en la cortadura del chorro de agua, de manera que las empresas gastaban miles de dólares estadounidenses cada mes para usar, alejar y desechar el granate.

### 13.1.1.3 La nueva era de cortadoras de agua con abrasivo recirculado

El Waterjet Abrasive Recycling Dispenser (WARD), desarrollado hace 2 años y medio, permite ahora quitar el lodo mineral del tanque de la máquina cortadora de agua y recircularlo. Los operadores de la máquina han alcanzado un 50% o más de recirculación del abrasivo para poder usarlo de nuevo. Este adelantamiento promete revolucionar toda la industria de máquinas cortadoras de agua. Las compañías que desechaban su abrasivo usado ahora pueden recircularlo, ahorrando miles de dólares cada mes. Este ahorro se puede aplicar a las ganancias de las compañías, puede servir para comprar equipo nuevo o puede transmitirse al cliente en forma de precios más bajos.

Pero, exactamente, ¿cómo se puede pasar del lodo mineral mojado y sucio al abrasivo seco y limpio para usarlo de nuevo?

El WARD utiliza una serie de tubos de enfoque patentados, todos encendidos automáticamente, para extraer el lodo del tanque y transportarlo a la máquina, donde se lava y se pasa por varias Cribas. El granate que resulta demasiado pequeño y los pedazos pequeños del material cortado se caen en la criba principal. A veces, este abrasivo corta más rápido que el abrasivo nuevo, debido a un porcentaje más bajo de partículas corrompidas. Durante los lavados, el agua del tanque de la máquina sólo usa 1.9 -3.8 l. de agua fresca por minuto durante el enjuague final. Toda el agua se devuelve al tanque. El abrasivo recirculado se puede usar de nuevo inmediatamente o mezclar con abrasivo nuevo, según la necesidad de cortar.



Máquina de corte de chapas de acero inoxidable por chorro de agua y abrasivos (Abrasive Waterjet Cutting)

Una empresa de máquinas cortadoras de agua con una bomba de 75 Kw. puede consumir 1.36 Kg. de abrasivo cada minuto. Si la compañía compra el granate a 0.35

dólares por libra, gastaría 63.00 dólares por hora en abrasivo, lo que costaría 630 dólares por cada 10 horas de operación. Con un WARD 24 y cortando materiales más suaves, esta misma empresa podría reclamar el 70% del abrasivo, ahorrando más de 9000 dólares cada mes. Con estos ejemplos de ahorros mensuales, la recirculación del abrasivo es clave para las oportunidades comerciales.

Aparte de los ahorros obvios del abrasivo asociado con el WARD, están los ahorros en los gastos disminuidos de la limpieza del tanque y del alejamiento del lodo mineral. En este momento, las compañías de máquinas cortadoras de agua tienen que parar su producción por un periodo suficiente para permitirles vaciar el tanque del lodo, lo que crea bastantes horas de malgasto. El alejamiento del lodo es otra expensa sufrida por la empresa, que se ve reducido gracias al WARD.

El número que sigue a la palabra WARD, simboliza la talla de la criba en pulgadas. Entonces, un WARD 24 usa una criba de 24 pulgadas/60.96 centímetros durante el proceso de lavar y separar. El WARD 24 es el primer sistema de recirculación en el mercado comercial, sin importar la clase de máquina cortadora de agua que se use.

13.1.1.4 Nuevos diseños y desarrollos para corte de chapas de acero con chorro de agua y abrasivo a presión

● **Compendio:** El proceso convencional de corte de chapas de acero inoxidable, es por medio de plasma. Este tipo de corte presenta los siguientes inconvenientes: a) Deja escoria. b) La zona de corte está sometida a calentamiento (zona afectada por el calor [ZAC]), lo cual origina cambios estructurales y c) En la ZAC aparece una aureola que perjudica su terminación estética.

El objetivo del diseño que aquí se explica es eliminar las dificultades apuntadas en el proceso anterior realizando el corte (de chapas de acero inoxidable austenítico hasta 2 Mm. de espesor) por medio de un chorro de fluido a elevada velocidad.

El proceso de corte solamente se puede llevar a cabo con el agregado, en el flujo de agua, de partículas de material abrasivo {M-K}. Se puede emplear como elemento elevador de la presión del agua, una bomba inyectora lineal (motor Diesel), para lo cual se debe realizar una serie de transformaciones para adaptarlo al uso específico. Con respecto al circuito: a) se debe realizar el correcto filtrado del agua para prolongar la vida útil de la tobera de agua {URI}. b) La válvula reguladora de presión protege al circuito de sobre presiones y c) El acumulador de gas mantiene la presión constante.

● **Introducción:** Para realizar el corte de un material determinado necesitamos de una cierta cantidad de energía. En el proceso de corte se produce lo que denominamos: transformación de la energía, la energía que se entrega se transforma en energía de deformación del material a cortar. Ahora, todo fluido en movimiento lleva asociado una determinada cantidad de energía (cinética). Por lo tanto este fluido deberá tener una energía mayor o igual a la necesaria para realizar el corte.

Como medio portador de energía en general, podemos utilizar casi todos los elementos líquidos: agua, aceites, alcoholes y hasta metales líquidos como por ejemplo el mercurio. Ahora, *el agua* presenta una serie de ventajas con respecto a los demás: a)

Existe en cantidad suficiente y en calidad requerida (potable), en casi todos los lugares. b) Ínfimo costo, en su empleo, con respecto a los demás fluidos. c) Fácilmente accesible. d) No genera fuego o incendio. e) Buenas condiciones de fluidez (baja viscosidad), de lo contrario sería muy dificultoso lograr la salida del chorro por un pequeño orificio a alta velocidad.

Por otro lado, el aire también está totalmente descartado como fluido portador de energía: a) Elevado costo para lograr altas velocidades en el fluido (túnel de viento). b) Muy baja energía cinética (Densidad del aire = Densidad del agua / 1000). c) Muy difícil de lograr un efecto puntual, por lo tanto alta dispersión al salir de la tobera.

El diseño está acotado al corte de chapas de acero inoxidable austenítico hasta 2 Mm. de espesor.

● **Desarrollo:** Para el corte de chapas de acero inoxidable austenítico (AISI 310) de 2 Mm. de espesor se necesita de un valor muy elevado de presión de agua, esto se debe a la baja densidad del fluido. Al agregar un elemento elevador de la densidad (partículas de metal) al flujo de agua, la presión necesaria de la bomba se ve reducida a un tercio del valor anterior. Pero la misma aun sigue siendo elevada.

La alternativa adecuada es agregar partículas de material abrasivo (alúmina, granate, etc.) al flujo de agua {M-K}, las cuales producen el microvirutamiento del material a cortar {E-M}. Ahora la presión necesaria de la bomba de agua se sitúa en 400 atmósferas.

Con respecto al sistema de mezclado del agua y del abrasivo se puede decir: la succión del abrasivo, desde la tolva que lo contiene, se efectúa por vacío (efecto Venturi) a través de una placa orificio calibrada, siendo necesario una depresión de una décima de atmósfera para obtener el caudal adecuado (3,4 gr. /s).

El material de construcción más adecuado para el tubo mezclador, con alúmina como abrasivo, es el carburo de boro con carbono 5 % ( $B_4C-C$  5 %). El perfil interior del tubo debe ser suavemente convergente desde la boca de entrada (diámetro 4 Mm.) hasta la boca de salida (diámetro 0,8 Mm.). Una mayor longitud del tubo (76 Mm.) trae aparejado una mejor aceleración de las partículas de abrasivo.

Se puede emplear como elemento elevador de la presión del agua una bomba inyectora lineal (motor Diesel), a la misma se le debe realizar las siguientes transformaciones: a) Cambiar el material de construcción de los émbolos, cilindros, válvulas, asientos de válvula y racores por acero inoxidable martensítico (AISI 440). b) Se omite el sistema de variación del caudal. c) Se modifica el perfil de cada leva (árbol de levas) para que el caudal de agua sea continuo y no pulsante (propio de la inyección Diesel). d) Se talla en cada émbolo una ranura circunferencial con lo cual se logra un sello hidrodinámico para evitar la caída del rendimiento con la elevación de la presión.

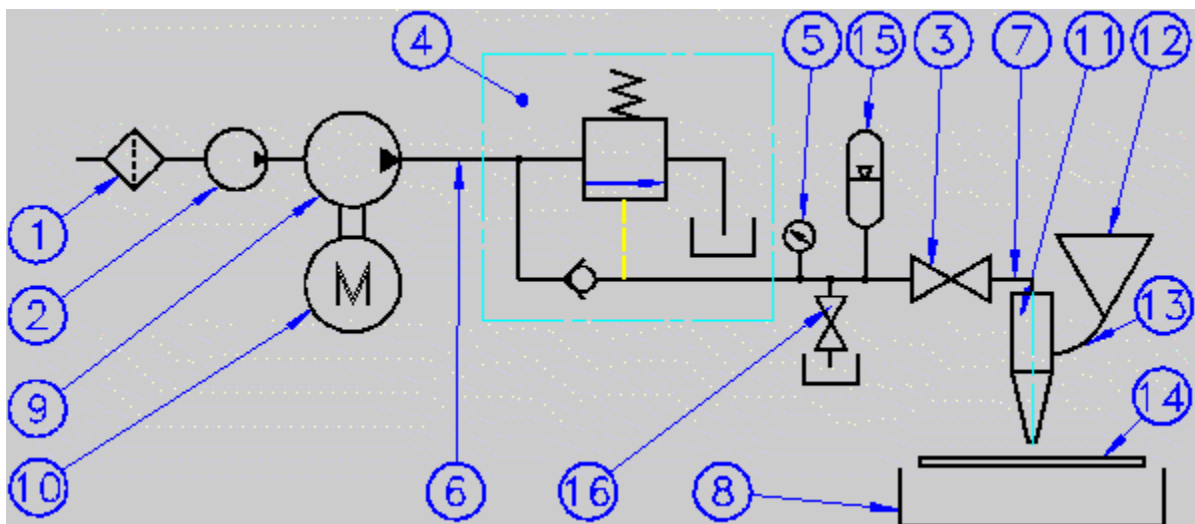
Es fundamental realizar el correcto filtrado del agua {URI} para prolongar la vida útil de la tobera de agua.

Se coloca una válvula reguladora de presión en el circuito de alta presión para:

- Proteger al circuito de la sobre presión en el momento de cerrar (momentáneamente) la válvula solenoide de bloqueo.
- Que la bomba trabaje a baja presión durante ese período.

Se coloca un acumulador de gas (tipo membrana) para: a) Absorber la pequeñas variaciones de presión, consecuencia del caudal discontinuo que entrega la bomba principal, haciéndola más constante. b) Absorber los picos de presión debida al cierre brusco de la válvula solenoide de bloqueo y c) Mantener el circuito (entre la válvula de anti-retorno y la válvula solenoide de bloqueo) a la presión de trabajo (400 atmósferas), mientras la bomba principal trabaja a baja presión (cierre momentáneo de la válvula solenoide de bloqueo).

En el diagrama adjunto se puede observar los componentes principales del circuito.



Referencias:

- Filtro de agua (diámetro de partícula = 0,45 a 0,5 micrones).
- Bomba auxiliar de la bomba de alta presión.
- Válvula solenoide de bloqueo (primaria).
- Válvula de seguridad y descarga.
- Manómetro.
- y 7) Tubo de acero inoxidable sin costura.
- Unidad colectora.
- Bomba de alta presión de émbolos (400 Kg. /cm<sup>2</sup>).
- Motor eléctrico de accionamiento de la bomba de alta presión.
- Cabezal abrasivo compuesto por:
  - Tobera de agua a presión. Diámetro = 0,254 Mm., material = zafiro (o diamante).
  - Cámara de mezcla del agua y el abrasivo (por succión = efecto Venturi).
  - Tubo mezclador o de aceleración de partículas abrasivas. Diámetro (de salida) = 0,8 Mm.
- Tolva con abrasivo (para una capacidad de 24 kg).
- Tubo flexible, vínculo entre la tolva y la cámara de mezcla (Diámetro Nominal = 6

Mm.).

**14)** Chapa a cortar (acero inoxidable austenítico, hasta un espesor de 2 Mm.).

**15)** Acumulador de gas.

**16)** Válvula solenoide (secundaria).

●**Resultados:** Para realizar el corte de chapas de acero inoxidable austenítico (hasta 2 Mm. de espesor) por medio de chorro de agua, se debe agregar al fluido un caudal determinado de partículas de abrasivo produciendo lo que denominamos microvirutamiento del material, ya que dichas partículas inciden sobre el material a una elevada velocidad (460 Km. /h).

Se puede emplear una bomba inyectora lineal (motor Diesel) como elemento elevador de la presión del agua, para ello se debe realizar ciertos cambios para garantizar su adecuado desempeño.

Un correcto filtrado del agua prolonga la vida útil de la tobera de agua. Al incluir en el circuito hidráulico una válvula reguladora de presión: a) se protege al mismo de sobre presiones, b) se ahorra energía y c) disminuye el desgaste de la bomba.

Por otro lado, el acumulador de gas ayuda a mantener constante la presión del agua.

●**Libro informático AWJ:** Si está interesado en este proyecto, puede adquirir el Libro informático sobre Máquina de corte de chapas de acero inoxidable por chorro de agua y abrasivos (Abrasive Waterjet Cutting). Aquí encontrará, en 88 temas distribuidos en 94 páginas (A4), toda la información sobre este novedoso sistema de corte.

### 13.2 Usos en joyería fina y artesanal

El granate almandino se forma en la naturaleza dando lugar a un rombododecaédro o a un trapezoedro con tonalidades que van del vino tinto hasta un rojo intenso, además posee cierta facilidad para ser tallado, pulido y lustrado, obteniéndose con estos procesos piezas de finos acabados y lustrosas superficies listas para ser montadas en oro o plata, para luego ser expuestas en las vitrinas de reconocidas joyerías.



Muchas variedades se tallan para joyería, con nombres especiales como granate de bohemia, rubí del cabo, carbunclo y piedra canela, entre otros nombres que ha recibido el almandino como piedra preciosa.

Este mineral es utilizado en Guatemala por empresas que trabajan la jadeíta, como un complemento en collares y pulseras; algunas de las empresas que se dedican al tallado y venta de gemas lo utilizan para elaborar aretes, anillos y collares. Existe una joyería en la Antigua Guatemala que vende únicamente diseños exclusivos, en lo que a joyas se refiere, en esta empresa se venden diseños exclusivos hechos solamente de granate, los cuales pueden llegar a valer hasta US\$ 700.00.

























En el mercado de artesanías de Antigua Guatemala se encuentran collares, aretes, pulseras, etc. elaboradas con cristales de granate de una alta pureza aunque el tipo de tallado y pulido varía de tal manera que puede clasificarse como granate trabajado de mediano costo y granate quebrado de bajo costo, y este es utilizado en la joyería artesanal de la región.

Según lo observado en los resultados fisicoquímicos y mineralógicos, el mineral de granate almandino de la zona de Pachalum y Joyabaj, puede ser utilizado como gema semipreciosa, ya que se analizaron cristales trapezoédricos y rombododecaédricos, de colores que varían de rojo oscuro y vino tinto hasta rojo intenso traslúcido en secciones pequeñas, algunas piezas debido a las fracturas expuestas presentaron tonalidades

únicas y muy atractivas. Las piezas se tallan, pulen y lustran muy bien con un proceso relativamente sencillo y de bajo costo.

## 14. ANÁLISIS DEL GRANATE DE GUATEMALA

Los resultados obtenidos en el laboratorio respecto al análisis de las muestras procedentes del área de estudio, revelaron que la variedad de granate que se encuentra en el área es almandino, por tal razón se tomará especial interés en la descripción de las propiedades físicas, químicas y cristalográficas de esta variedad de granate, y luego con el apoyo de esta información se recomendarán las aplicaciones artesanales y posibles usos industriales que pueda dársele.

### 14.1 Propiedades del granate almandino

La etimología del granate almandino proviene de la localidad de Alabanda, en Asia Menor. El almandino es el granate de mayor abundancia sobre la corteza terrestre y es un mineral típico de rocas metamórficas, se encuentra especialmente en esquistos y gneis micáceos acompañados de moscovita, cuarzo y en menor porcentaje de biotita y clorita.

Figura No.1: Gneis granatífero ubicado en el río Saltan (Pachalum, Quiché).



El almandino es un granate de aluminio y hierro, cuya fórmula química es  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ . Sus propiedades físicas y químicas son las responsables de su gran

variedad de usos industriales a nivel mundial y las propiedades cristalográficas son las responsables de sus usos como gema en joyería.

#### 14.1.1. Propiedades químicas del almandino

El almandino es un granate formado por un silicato de aluminio y hierro, cuya fórmula química es  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ , la cual para efectos de análisis químico puede expresarse como  $3(\text{FeO})\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3(\text{SiO}_2)$ ; la composición química cuantitativa del granate almandino es:

Tabla No. 5: Composición química cuantitativa del granate almandino.

$\text{SiO}_2$	36.2 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20.5 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	43.3 %

El almandino, con frecuencia, no se puede distinguir a simple vista del piropo, ya que tienen un gran parecido; sin embargo, al practicar un análisis químico se encuentra que el almandino posee Fe y Al en los porcentajes ya mencionados, a diferencia del piropo cuya composición es:

Tabla No. 6: Composición química cuantitativa del granate piropo.

$\text{SiO}_2$	44.8 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	25.4 %
MgO	29.8 %

Según, Evans (Referencia No. 5), “ciertas sustancias de fórmulas parecidas, y cuyos cationes y aniones tienen respectivamente iguales tamaños relativos, presentan también estructuras cristalinas relacionadas entre sí, y se dice que tales sustancias son isomorfas, es decir, presentan estructuras internas similares. Dichas sustancias cristalizan con formas externas parecidas y muestran la misma exfoliación”. Si se analizan las fórmulas químicas del almandino y el piropo ( $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  y  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  respectivamente), se tiene que el tamaño atómico de sus componentes es muy parecido, es decir, sus aniones y cationes son muy semejantes en tamaño y presentan estructuras cristalinas semejantes, además, el hierro y el magnesio trabajan ambos con número de oxidación 2, estas propiedades químicas son las responsables de la facilidad de intercambio de los iones de Fe y Mg y de la formación de cristales mixtos de piropo - almandino.

Por ser un silicato, es inerte a la gran mayoría de compuestos químicos, por tal razón en condiciones ambientales normales o extremas, no se descompone, sin embargo puede ser atacado con ácido fluorhídrico. El almandino no es combustible, ya que no funde con la llama del mechero Bunsen, debido a que su punto de fusión es de  $1050^\circ\text{C}$ .

### 14.1.2. Propiedades físicas del almandino

Según Dana (Referencia No. 3), “las propiedades físicas, por las cuales puede identificarse un mineral, son numerosas, y varían desde las simples y naturales como por ejemplo la raya, hasta aquellas que pueden ser descubiertas únicamente por equipo sofisticado como el microscopio electrónico”.

Tabla No.7: Propiedades físicas del granate almandino.

Raya	de color blanca y polvo de color blanco
Brillo	en general es opaco pero puede ser transparente con brillo adamantino
Dureza	de 6.5 a 7.5 en la escala de Mohs
Gravedad específica	4.25
Exfoliación	Sin exfoliación aparente
Crucero	no posee crucero
Fractura	en astillas
Solubilidad	es insoluble en ácidos y agua.
Fusión	funde en un glóbulo magnético a 1050°C.

### 14.1.3. Cristalografía del almandino

El sistema cristalino es cúbico o isométrico; y respecto a su hábito, los cristales se presentan como rombododecaédricos y trapezoedros perfectamente formados, esto se aprecia en la figura No. 2. El Color del granate común se presenta de color rojo pardusco, translúcido, sub-translúcido u opaco; el granate noble, se presenta en las variedades de color rojo oscuro y transparentes.

Figura No.2: Cristal trapezoédrico de granate almandino.



Según, Rutley (Referencia No. 17), refiriéndose a las características micrográficas, en secciones delgadas, los granates se observan como cristales redondeados atravesados por grietas ramificadas y sin exfoliación.

## 15. RESULTADOS

### 15.1 Técnicas analíticas utilizadas para la caracterización fisicoquímica y mineralógica.

Parte fundamental de un proyecto minero es conocer las características físicas, químicas y mineralógicas, puesto que a partir de las mismas se puede establecer cual es la aplicación en la que se podrá utilizar el recurso a aprovechar. A continuación se listan las técnicas más usuales para caracterizar minerales o rocas.

- a. Observación macroscópica.
- b. Análisis mineralógico.
- c. Análisis químico cualitativo y cuantitativo por fluorescencia de rayos X.
- d. Solubilidad en agua y ácido.
- e. Reactividad.
- f. Inflamabilidad.
- g. Peso específico.
- h. Capacidad de pulir y tomar lustre.
- i. Dureza.
- j. Raya.

A continuación se detalla en que consiste cada una de estas pruebas y se comenta en los casos que corresponda, los resultados generales que se obtuvieron en las pruebas realizadas a las muestras recolectadas en el área de estudio.

#### 15.1.1. Observación macroscópica

Esta prueba consiste en observar la muestra sin lentes de aumento, es decir, observarla a simple vista. El material se observó principalmente de tres formas, una laminada o esquistosa con incrustaciones de granates, bastante frágil y con intemperismo predominante en la roca encajante formada principalmente por moscovita de color dorado. En la segunda forma se observó una consistencia más compacta, es decir, se refiere a un gneis conformado principalmente por moscovita y un bajo porcentaje observado de cuarzo y feldespato en la roca encajante, con incrustaciones de granate y muy poco intemperismo en la roca encajante. En la tercera forma se observó una consistencia compacta, se refiere a un gneis, conformado principalmente por biotita, ausencia de granate y un porcentaje observado bajo de cuarzo y feldespato.



De las ocho zonas de interés, en seis se confirmó la presencia de granate. Cinco de las seis zonas de granate presentan variaciones de tamaño desde 2 mm hasta 10 mm. En la zona de Palibatz se confirmó la presencia de los granates más grandes, que miden desde 3 mm hasta 150 mm de diámetro.



En la zona de Suchipup se analizó una muestra de color gris oscuro con incrustaciones de partículas finas plateadas, los resultados del análisis químico de esta muestra se presentan en la tabla No. 11 de la ilmenita de la zona Suchipup.

En la zona de Tres Cruces se analizaron muestras de color negro parecido al carbón con partes de tonalidad violeta oscuro, este material deja una huella de color negro, los resultados del análisis químico de esta muestra se presentan en la tabla No. 21.

#### 15.1.2. Análisis mineralógico

Éste se realizó utilizando un estereoscopio y un microscopio petrográfico con luz transmitida y luz reflejada.

Con respecto a los granates, se observó un sistema cristalino cúbico o isométrico. El hábito de los cristales se presenta rombododecaédrico y trapezoédrico perfectamente formado.

El granate se presenta de color rojo pardusco, translúcido en pequeñas secciones pulidas y granulometrías finas menores a la malla 60, sub-translúcido u opaco en otras y en muestras de buena pureza química y con presencia de fracturas. Se observaron varias tonalidades con colores que varían de rojo oscuro y vino tinto hasta rojo intenso translúcido.

Refiriéndose a las características micrográficas, en secciones delgadas, los granates se observaron como cristales redondeados atravesados por grietas ramificadas y sin exfoliación.

La moscovita se caracterizó por su exfoliación básica perfecta, merced a la cual es posible separar hojas muy delgadas y elásticas, y también por su brillo perlado intenso, a veces metálico. Poseen estructura en hojas de  $\text{Si}_4\text{O}_{10}$  y la exfoliación se efectúa paralelamente a estas hojas.

La moscovita presentó un sistema cristalino monoclinico y aspecto de laminillas con el contorno hexagonal o triangular. Cambió de color celeste, amarillo y verde pálido a transparente y viceversa, al rotar la platina del microscopio petrográfico.

El cuarzo se observó con forma cristalina hexagonal, fractura concoidea, brillo vítreo, incoloro y transparente, no cambia de tonalidad al rotar la platina del microscopio petrográfico.

Los resultados del análisis químico, solubilidad, reactividad, inflamabilidad y peso específico se tabulan en las tablas de la 8 a la 21 y se mencionan la dureza y raya. A continuación se describen según la información bibliográfica cada una de estas propiedades, como una pequeña introducción antes de presentar las tablas de resultados.

#### 15.1.3. Análisis químico cualitativo y cuantitativo por fluorescencia de rayos X

Esta técnica analítica se realiza en una cámara al vacío donde se coloca la muestra y luego es bombardeada por rayos X. Al impactar los rayos X sobre la muestra, ésta absorbe una cantidad y rebota otra provocando un índice de fluorescencia el cual es captado por un detector calibrado, de tal manera que existe un espectro registrado para cada uno de los elementos de la tabla periódica. Los resultados se muestran en la sección 15.2.

#### 15.1.4. Solubilidad en agua y ácido

Para este ensayo se trató de disolver la muestra tanto de granate como de mica y cuarzo en diferentes soluciones de ácido sulfúrico y agua a temperatura ambiente. Debido a que estos son compuestos de sílice, no se disolvieron. A 25°C los silicatos únicamente se disuelven en ácido fluorhídrico.

#### 15.1.5. Reactividad

La reactividad se refiere a la inestabilidad o facilidad de reaccionar de los compuestos y/o sustancias. Normalmente los minerales conformados por silicatos son estables a temperatura y presión ambiente, de tal manera que no reaccionan con facilidad con otras moléculas. Parte del material mineral se almacenó por dos años, tiempo durante el cual se tuvo en observación bajo condiciones variantes de temperatura y humedad. Debido a que los compuestos de silicatos, como el granate, son muy estables no se requirió hacer la prueba de calorimetría diferencial de barrido o calorimetría de reacción para determinar su reactividad.

#### 15.1.6. Inflamabilidad

Se refiere a la capacidad de combustión que poseen los materiales. Tanto el granate como la moscovita, la biotita y cuarzo no son inflamables y poseen puntos de fusión sobre los 800° C (por ejemplo el granate funde a 1050°C y el cuarzo funde a 1710°C).

Por punto de fusión o fusibilidad se entiende la mayor o menor facilidad que posee un mineral para alcanzar la fusión o estado de libertad de las partículas de sus posiciones en la red. La fusión es una rotura del orden reticular, es decir, la temperatura a la que fundirá un mineral dependerá directamente de la energía reticular del sólido.



Según la escala de fusibilidad de Kobell, el granate es infusible a la llama del mechero Bunsen, pero fácilmente fusible utilizando el soplete; el cuarzo es infusible tanto a la llama del mechero Bunsen como a la llama del soplete.

#### 15.1.7. Peso específico

La densidad absoluta o peso específico cuando se expresa con relación a la densidad del agua, es la masa de un mineral correspondiente a la unidad de volumen. El peso específico es una constante para cada compuesto homogéneo y puro. Esta variable se determina por el principio de Arquímedes: se pesa el mineral en el aire y luego se pesa dentro del agua, con estas dos mediciones se obtiene la fuerza de empuje, la cual es igual al peso del volumen de agua desplazado; haciendo el cociente del peso del mineral en el aire dentro del diferencial de peso en el aire menos peso en el agua del mineral y multiplicando el resultado de este cociente por la densidad del agua a la temperatura que se realizó la medición, se obtiene el peso específico del mineral. Las mediciones se realizan en una balanza especial.

#### 15.1.8. Capacidad de pulir y tomar lustre

Esta propiedad se refiere a capacidad del mineral de poder adquirir lustre al ser sometido a un proceso de pulido con diferentes tamaños de grano de lija de carburo de silicio y frote con óxido de cromo o polvo de zafiro con un trozo de cuero montado sobre un disco que gira entre 2,800 y 3,500 revoluciones por minuto.

#### 15.1.9. Dureza

La dureza se define como la resistencia que opone un cristal, según sus caras y dirección, al deterioro mecánico de su superficie. Esta lesión mecánica puede ser ocasionada por cualquier método dinámico: rayado, pulido, corte y perforación. Especial importancia tiene la prueba de rayado, y define a la dureza como a la resistencia que opone un cristal a ser rayado.

#### 15.1.10. Raya

En mineralogía se le llama raya al mineral que se pulveriza al rozarlo sobre una placa de porcelana sin barnizar, es decir, al color de la marca o polvo que éste deja al ser frotado sobre otro material más duro.

### **15.2 Caracterización físico, química y mineralógica de las muestras recolectadas en las zonas identificadas.**

A continuación se indican las diferentes zonas de muestreo ubicados en el área de interés que presentan perspectivas mineras, tanto de granates como evidencias de ilmenita (titanio), encontradas en el área incrustadas dentro de una matriz de esquistos y gneises; además los resultados químicos indican la presencia de otros minerales de interés como la distena y manganeso.

## 15.2.1. Zona Tanilar - Palibatz

Tabla No.8: Caracterización fisicoquímica del granate de la zona TANILAR-PALIBATZ.

Elementos	Composición química en (%)	P.E.	*Solubilidad en H <sup>+</sup> y H <sub>2</sub> O	Apariencia y Olor	Reactividad	Cristalografía del mineral
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.27	4.11	En H <sup>+</sup> menos del 1%	Color rojo oscuro no tiene olor	Inerte y estable, no inflamable	Cúbico isométrico, con doce caras
SiO <sub>2</sub>	35.86					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.26					
CaO	2.31					
MnO	0.3		En H <sub>2</sub> O insoluble			

La dureza del mineral se encuentra en un rango de 6.5 a 7.5 en la escala de Mohs y la raya del granate es blanca.

**Comentarios:** Las muestras superficiales de los granates de esta zona, según los resultados de la inspección visual y de laboratorio, se encuentran poco intemperizados y se estima que a unos metros de profundidad se encuentran con mayor pureza.

Con las muestras superficiales se realizaron pruebas de tallado, pulido y lustrado lográndose tallar y pulir las muestras. En esta zona se encuentran los granates de mayor tamaño los cuales varían desde 2 mm hasta 150 mm de diámetro; se observaron buenos ejemplares de tamaño intermedio y grande.

## 15.2.2. Zona quebrada Suchipup

TablaNo.9: Caracterización fisicoquímica del granate de la zona SUCHIPUP.

Elementos	Composición Química (%)	PE	Solubilidad en H <sup>+</sup> y H <sub>2</sub> O	Apariencia y Olor	Reactividad	Cristalografía del mineral
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.12	4.01	en H <sup>+</sup> menos del 1%	Color rojo oscuro No tiene olor	Inerte y estable, no inflamable	Cúbico isométrico, con doce caras
SiO <sub>2</sub>	36.11					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.98					
CaO	1.79		En H <sub>2</sub> O insoluble			

La dureza del mineral se encuentra en un rango de 6 a 7 en la escala de Mohs. La raya del granate es blanca.

Tabla No.10: Análisis químico de muestras de granate que indican presencia de TITANIO. Zona SUCHIPUP.

Muestras	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>
SA	37.50	36.41	24.48	0.19	1.42		
SB	17.63	49.84	24.47	3.94	2.14	1.98	
SC	56.03	39.70		2.57	1.61		0.09

**Comentarios:** Las muestras superficiales de los granates de esta zona, según los resultados de la inspección visual y de laboratorio, se encuentran poco intemperizados. Con las muestras superficiales se realizaron pruebas de tallado, pulido y lustrado lográndose tallar y pulir las muestras. En esta zona se observaron buenos ejemplares de granate los cuales varían desde 4 mm hasta 20 mm de diámetro. Llama la atención la presencia de titanio en algunas de las muestras de granate.

Tabla No. 11: Análisis químico de ILMENITA. Zona SUCHIPUP.

Elementos Muestra SIA	Concentración (%)	Elementos Muestra SIB	Concentración (%)	Elementos Muestra SIC	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.209	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48.174	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.520
SiO <sub>2</sub>	7.313	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.061	SiO <sub>2</sub>	8.200
Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.051	MnO	0.397	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.124
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.103	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>51.367</b>	CaO	0.245
MnO	0.370			MgO	0.532
MgO	0.412			MnO	0.398
CaO	0.242			<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>54.981</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>54.30</b>				

### 15.2.3. Zona del mojón

Tabla No. 12: Caracterización fisicoquímica granate zona DEL MOJÓN.

Elementos	Concentración (%)	P.E.	Solubilidad en H <sup>+</sup> y H <sub>2</sub> O	Apariencia y Olor	Reactividad	Cristalografía del mineral
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.27	4.44	En H <sup>+</sup> menos del 1%	color rojo oscuro no tiene olor	Inerte y estable, no inflamable	Cúbico isométrico, con doce caras
SiO <sub>2</sub>	36.50					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.12		En H <sub>2</sub> O insoluble			
TiO <sub>2</sub>	0.11					

La dureza del mineral se encuentra en un rango de 6 a 7 en la escala de Mohs. La raya del granate es blanca.

Tabla No: 13: Análisis químico de muestras de granate que indican presencia de TITANIO. Zona DEL MOJÓN

Elementos Muestra MA	Concentración (%)	Elementos Muestra MB	Concentración (%)	Elementos Muestra MC	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47.24	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	65.35	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46.92
SiO <sub>2</sub>	34.54	SiO <sub>2</sub>	32.17	SiO <sub>2</sub>	35.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.68
CaO	2.32	CaO	1.12	CaO	2.18
ZnO <sub>2</sub>	0.06	ZrO <sub>2</sub>	0.15	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0.66</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0.72</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>1.21</b>		

**Comentarios:** Las muestras superficiales de los granates de esta zona, según los resultados de la inspección visual y de laboratorio, se encuentran poco intemperizados.

Con las muestras superficiales se realizaron pruebas de tallado, pulido y lustrado lográndose tallar y pulir las muestras. En esta zona se encuentran granates que varían desde 4 mm hasta 15 mm. También se detectó presencia de titanio en los granates y minerales de silicato ferromagnésico.

Tabla No.14: Análisis químico de muestras de silicato ferromagnésico zona DEL MOJÓN.

Elementos Muestra FMA	Concentración (%)	Elementos Muestra FMB	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.17	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.86
TiO <sub>2</sub>	2.18	SiO <sub>2</sub>	78.74
MgO	22.77	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27
SiO <sub>2</sub>	61.26	MnO	3.18
MnO	0.27	Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.38
Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35	TiO <sub>2</sub>	1.57

#### 15.2.4. Zona Moritas

Tabla No.15: Caracterización fisicoquímica granate de MORITAS.

Elementos	Concentración (%)	P.E.	Solubilidad en H <sup>+</sup> y H <sub>2</sub> O	Apariencia y Olor	Reactividad	Cristalografía del mineral
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.10	4.30	En H <sup>+</sup> menos del 1%	Color rojo oscuro no tiene olor	Inerte y estable, no inflamable	Cúbico isométrico, con doce caras
SiO <sub>2</sub>	35.30					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.72					
TiO <sub>2</sub>	0.65					
MnO	0.23		En H <sub>2</sub> O insoluble			

La dureza del mineral se encuentra en un rango de 6 a 7.5 en la escala de Mohs y la raya del granate es blanca.

Tabla No. 16: Análisis químico de muestras de granate que indican presencia de TITANIO

Elementos Muestra RA	Concentración (%)	Elementos Muestra RB	Concentración (%)	Elementos Muestra RC	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.48	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.92	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.40
SiO <sub>2</sub>	37.09	SiO <sub>2</sub>	55.14	SiO <sub>2</sub>	49.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.65	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.03	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.92
MnO	1.05	MnO	0.59	CaO	5.33
CaO	3.87	CaO	4.8	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>2.54</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>3.63</b>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>2.35</b>		

**Comentarios:** Las muestras superficiales de los granates de esta zona, según los resultados de la inspección visual y de laboratorio, se encuentran muestras intemperizadas y muestras bastante puras sin intemperismo las cuales a pesar de presentar fracturas, poseen tonalidades muy atractivas; se estima que a unos metros de profundidad se encuentren granates tipo gema. Con las muestras superficiales se realizaron pruebas de tallado, pulido y lustrado lográndose tallar y pulir las muestras. En

esta zona los granates varían en tamaño desde 2 mm hasta 25 mm de diámetro; se observaron buenos ejemplares en todos tamaños. También se detectó presencia de titanio en las muestras de granate.

#### 15.2.5. Zona Poza de Saltán

Tabla No.17: Caracterización fisicoquímica del granate POZA DE SALTÁN.

Elementos	Concentración (%)	P.E.	Solubilidad en H <sup>+</sup> y H <sub>2</sub> O	Apariencia y Olor	Reactividad	Cristalografía del mineral
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.12	4.20	En H <sup>+</sup> menos del 1%	Color rojo oscuro No tiene olor	Inerte y estable, no inflamable	Cúbico isométrico, con doce caras
SiO <sub>2</sub>	36.11					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.92					
CaO	0.79					
ZrO <sub>2</sub>	0.06		En H <sub>2</sub> O insoluble			

La dureza del mineral se encuentra en un rango de 6.5 a 7 en la escala de Mohs y la raya del granate es blanca.

Tabla No. 18: Caracterización física - química de granate en la zona Poza de Saltán.

Elementos Muestra S1A	Concentración (%)	Elementos Muestra S1B	Concentración (%)	Elementos Muestra S1C	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.12	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60.52	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.42
SiO <sub>2</sub>	36.11	SiO <sub>2</sub>	34.98	SiO <sub>2</sub>	36.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.84	CaO	2.56	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.86
ZrO <sub>2</sub>	0.06	MnO	0.48	CaO	1.01
CaO	1.79	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>1.46</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>1.30</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>1.08</b>				

**Comentarios:** Las muestras superficiales de los granates de esta zona, según los resultados de la inspección visual y de laboratorio, se encuentran poco intemperizados y se estima que a unos metros de profundidad se encuentren con mayor pureza. Con las muestras superficiales se realizaron pruebas de tallado, pulido y lustrado lográndose tallar y pulir las muestras. También se detectó presencia de titanio en las muestras superficiales de granate y cuarzo.

#### 15.2.6. Zona Quebrada Grande

Tabla No. 19: Resultados químicos de ILMENITA zona QUEBRADA GRANDE.

Elementos	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.38
SiO <sub>2</sub>	45.29
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.29
K <sub>2</sub> O	7.38
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>21.66</b>

Nota: La técnica de análisis químico usada fue fluorescencia de rayos X.

Tabla No.20: Resultados químicos de DISTENA de la zona QUEBRADA GRANDE.

Elementos	Concentración (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.03
SiO <sub>2</sub>	61.91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.39
K <sub>2</sub> O	3.01
TiO <sub>2</sub>	5.64

Nota: La técnica de análisis químico usada fue por fluorescencia de rayos X.

**Comentarios:** en esta zona se tomaron muestras superficiales las cuales corresponden según resultados de laboratorio a muestras de ilmenita y distena. Las muestras superficiales de granate correspondientes a esta zona se encuentran demasiado intemperizadas, por tal razón no se analizaron.

#### 15.2.7. Zona Las Tres Cruces

Tabla No. 21: Análisis químico de muestras que presentan evidencia de MANGANESO en el punto de Las Tres Cruces.

Elemento Muestra t1	Concentración (%)	Elemento Muestra t2	Concentración (%)	Elemento Muestra t3	Concentración (%)
<b>MnO</b>	<b>78.149</b>	<b>MnO</b>	<b>59.8950</b>	<b>MnO</b>	<b>95.569</b>
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.344	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.4440	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.38
K <sub>2</sub> O	1.252	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.0370	ZnO	0.049
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.822	SiO <sub>2</sub>	2.1040		
<b>CuO</b>	<b>0.212</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.4570		
Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	0.708	<b>CuO</b>	<b>0.0611</b>		
BaO	0.420				
SrO	0.054				
Br	0.037				

Nota: La técnica de análisis químico usada fue fluorescencia de rayos X.

**Comentarios:** se detectó presencia de mineral de manganeso, la muestra analizada fue obtenida de una matriz de cuarzo, también se detectó cobre en la muestra analizada.

#### 15.2.8. Análisis de los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica.

Dentro de las muestras analizadas, en el área de Caracterización y Procesamiento de Minerales, predominaron los esquistos con moscovita dorada y los gneis algunos con moscovita y otros con pequeños porcentajes de biotita las tres con incrustaciones de granate.

De las ocho zonas de interés, en seis se confirmó la presencia de granate. Cuatro de las seis zonas de granate presentan variaciones de tamaño desde 2 mm hasta 7 mm; En la zona de Palibatz y Tanilar se confirmó la presencia de los granates más grandes, que miden desde 4 mm hasta 150 mm de diámetro.

Las zonas que presentan mejores ejemplares, según los resultados experimentales practicados a las muestras superficiales, son: Palibatz, Tanilar, Suchipup, Saltán y Moritas.

En los resultados tabulados en las tablas 8, 9, 12, 15, 17, se observa que la composición química promedio es  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 44.57\%$ ;  $\text{SiO}_2 = 35.97\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 18.20\%$ ; el peso específico promedio es 4.21; la cristalografía predominante es cúbico isométrico con doce caras, es decir, trapezoédrico y/o rombododecaedro; la raya fue siempre blanca y la dureza varía entre 6 y 7.5.

Los expertos mencionan en la bibliografía la siguiente información: composición química del granate almandino es:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 43.3\%$ ;  $\text{SiO}_2 = 36.2\%$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20.5\%$ ; el peso específico del almandino: 4.25; la cristalografía y el hábito: cúbico isométrico, rombododecaédrico y trapezoédrico; la raya del almandino es blanca y su dureza debe ser entre 6.5 y 7.5 en la escala de Mohs.

Si comparamos los datos teóricos con los experimentales, se concluye que la variedad del granate del cual estamos hablando es el almandino o almandina.

### 15.3 Pruebas en el laboratorio de procesamiento de minerales

En el Laboratorio de Procesamiento de Minerales, de la Dirección General de Minería, se realizaron pruebas de separación y concentración de moscovita y granate a nivel de planta piloto, con la finalidad de definir el proceso óptimo de concentración para su posterior aplicación a nivel industrial como material abrasivo. Los dos procesos importantes desarrollados se detallan a continuación.

#### 15.3.1. Separación y concentración de la moscovita por flotación de espuma

##### 15.3.1.1 Metodología

El material a ser tratado se recolectó en las zonas de interés mencionadas en la sección 5 de este documento. El material se trituró en una quebrantadora de quijadas que lo redujo hasta un tamaño de 3 mm y luego fue molido en un molino de rodillos hasta obtener un tamaño de partícula menor a 0.8 mm. El objetivo principal del proceso de reducción de tamaño en la flotación, es obtener una mayor área superficial de reacción química para optimizar el uso de los reactivos químicos a usar y aumentar tanto la pureza como el porcentaje de recuperación del mineral.

El material quebrado y molido fue clasificado en diversos tamaños de partícula, para lo cual se tamizó a las siguientes mallas; 28 (0.589mm), 35 (0.471mm), 48 (0.295mm), 65 (0.208mm), 80 (0.177mm), 100 (0.147mm) esto según la serie de establecida por Tyler.

Después de haber clasificado el material, se realizó un análisis petrográfico para verificar que tipo de minerales están contenidos en la muestra y un análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar los elementos químicos presentes.

De los distintos tamaños de partículas se tomaron tres muestras, luego se prepararon soluciones al 25% en peso de mineral con cada tamaño de partícula, con la cual se alimentó la celda de flotación tipo Denver. Estando la celda alimentada se procedió a agregar los distintos tipos de reactivos a utilizar en el proceso, estos reactivos se variaron en distintas corridas para así determinar cual de ellos es el más apropiado para el proceso mencionado.

Tanto los productos como las colas se les realizó un análisis mineralógico para determinar porcentajes de los minerales incluidos.

Una vez teniendo los reactivos óptimos a utilizar, se realizaron corridas con todos los tamaños de partículas mencionadas, para poder determinar el tamaño óptimo de partícula en el proceso; se realizaron cuatro corridas por cada tamaño de partícula y se analizaron dichas muestras.

Debe tomarse en cuenta en el futuro la dureza del agua con la cual se trabaje, esto debido a que los diferentes compuestos que le dan la dureza al agua pueden intervenir en la acción de los reactivos químicos. Las condiciones deben establecerse para no tener dificultad en el manejo, se trabajó en condiciones normales de temperatura y presión (25° C y 640 mm de Hg de presión atmosférica). Los reactivos usados fueron: ácido sulfúrico, acetato de amonio, aceite de pino, etanol, fenol y aceite vegetal.

#### 15.3.1.2 Resultados de las pruebas de flotación

Tabla No. 22: Resultados del análisis mineralógico del mineral antes de procesar mineral de alimentación al proceso.

Tamaño de partícula	Porcentaje granate almandino	Porcentaje cuarzo	Porcentaje mica biotita	Porcentaje mica moscovita	Porcentaje clorita
28 (0.589 mm)	12.10	7.21	5.54	73.92	1.23
35 (0.471 mm)	13.71	9.52	5.32	71.13	0.31
48 (0.295 mm)	14.56	12.62	2.43	69.90	0.49
65 (0.208 mm)	15.96	12.68	2.14	65.81	3.42
80 (0.177 mm)	18.07	11.34	3.36	63.87	3.36
100 (0.147 mm)	18.75	10.94	3.13	63.02	4.17



Tabla No.23: Resultados obtenidos en la flotación, utilizando como espumante aceite de pino. Variable respuesta de rendimiento.

Tamaño de partícula	Rendimiento			
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
28 (0.589 mm)	0.4548	0.4060	0.3894	0.3394
35 (0.471 mm)	0.4276	0.3759	0.3338	0.3223
48 (0.295 mm)	<b>0.7796</b>	<b>0.4774</b>	0.4045	0.4345
65 (0.208 mm)	0.7008	0.4141	<b>0.4500</b>	0.4201
80 (0.177 mm)	0.6129	0.4356	0.4345	<b>0.4671</b>
100 (0.147 mm)	0.2899	0.2827	0.2889	0.2480

Tabla No.24: Resultados obtenidos en la flotación, utilizando como espumante fenol (Variable de respuesta se determina como porcentaje de rendimiento).

Tamaño de partícula	Porcentaje de Rendimiento			
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
28 (0.589 mm)	0.2245	0.2122	0.2218	0.3178
35 (0.471 mm)	<b>0.4012</b>	0.3506	0.2505	0.2136
48 (0.295 mm)	0.2806	0.3695	<b>0.3458</b>	0.2854
65 (0.208 mm)	0.3676	0.3514	0.3083	0.3793
80 (0.177 mm)	0.3762	<b>0.4990</b>	0.3329	<b>0.4497</b>
100 (0.147 mm)	0.2331	0.1917	0.2631	0.2920

Tabla No.25: Resultados del análisis mineralógico del concentrado obtenido de la flotación, utilizando como espumante aceite de pino.

Tamaño de partícula	Composición del producto de flotación			
	Porcentaje Impurezas	Porcentaje mica biotita	Porcentaje mica moscovita	Porcentaje total mica
28 (0.589 mm)	0.77	7.34	91.89	99.23
35 (0.471 mm)	0.58	5.74	93.68	<b>99.42</b>
48 (0.295 mm)	<b>0.90</b>	4.48	<b>94.63</b>	99.10
65 (0.208 mm)	0.78	5.75	93.47	99.22
80 (0.177 mm)	0.82	7.25	91.93	99.18
100 (0.147 mm)	0.72	<b>7.50</b>	91.78	99.28

Tabla No. 26: Resultados del análisis mineralógico del concentrado obtenido de la flotación, utilizando como espumante fenol.

Tamaño de partícula	Composición del producto de flotación			
	Porcentaje impurezas	Porcentaje mica biotita	Porcentaje mica moscovita	Porcentaje total mica
28 (0.589 mm)	0.50	3.45	<b>96.05</b>	<b>99.50</b>
35 (0.471 mm)	0.50	4.92	94.58	<b>99.50</b>
48 (0.295 mm)	<b>0.80</b>	4.65	94.65	99.30
65 (0.208 mm)	0.72	<b>5.48</b>	93.80	99.28
80 (0.177 mm)	0.67	5.28	94.05	99.33
100 (0.147 mm)	0.60	4.98	94.42	99.40

Tabla No.27: Resultados de la prueba de media Tukey, para la variable reactivo y tamaño de partículas.

Tamaño de partícula	Media	Número	Descripción
80 (0.177 mm)	0.45099	8	<b>A</b>
65 (0.208 mm)	0.42395	8	B A
48 (0.295 mm)	0.42093	8	B A
35 (0.471 mm)	0.33444	8	B A
28 (0.589 mm)	0.32074	8	B A
100 (0.147 mm)	0.26118	8	<b>B</b>

El reactivo A indica al espumante aceite de pino y tamaño de partícula malla 80 (0.177 mm) como la de mejor rendimiento, y la de menor rendimiento al reactivo B (fenol), y tamaño de partícula malla 100 (0.147 mm).

Tabla No. 28: Resultados de la prueba de media de Tukey para la variable reactivo.

Tratamiento	Media	Número	Descripción
1	0.42458	24	A
2	0.31283	24	B

A = Aceite de pino

B = Fenol

Tabla No.29: Resultados del análisis químico, del concentrado obtenido de la flotación, utilizando como carburante el aceite de pino.

Porcentaje concentración	Tamaño de partícula (número de mesh)					
	28	35	48	65	80	100
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.3731	6.8280	11.0342	5.7825	6.3667	5.0133
SiO <sub>2</sub>	69.2489	51.9574	71.8055	55.0938	52.7473	44.6147
K <sub>2</sub> O	16.8306	9.0513	14.2725	7.8262	7.0619	4.8017
SrO	0.1744	0.0717	0.1882	0.0826	0.0704	0.0496
Rb <sub>2</sub> O	0.2022	0.0808	0.1814	0.0747	0.0528	-----
ZrO <sub>2</sub>	0.0702	-----	0.0697	-----	-----	0.0328
MnO	0.1003	-----	0.0099	-----	-----	0.0396
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	30.1008	-----	29.8132	31.5181	27.0177
TiO <sub>2</sub>	-----	0.9826	2.4383	0.7568	1.4382	0.9293
CaO	-----	0.9016	-----	0.5386	0.7419	0.0001
BaO	-----	0.0247	-----	-----	-----	-----
Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	-----	-----	0.0313	-----	-----
CuO	-----	-----	-----	-----	0.0015	-----
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-----	-----	-----	-----	0.0009	-----
PbO	-----	-----	-----	-----	-----	0.0489
Na <sub>2</sub> O	-----	-----	-----	-----	-----	17.4521

El análisis químico se realizó con el método de fluorescencia de rayos X, en el equipo SEA 2010.

Tabla No. 30: Resultados del análisis químico del concentrado obtenido de la flotación, utilizando como espumante fenol.

Porcentaje concentración	Tamaño de partícula (número de mesh)					
	28	35	48	65	80	100
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.1338	8.2869	18.5305	6.6661	7.0011	7.3071
SiO <sub>2</sub>	51.8436	54.2507	69.8471	54.9099	54.3852	54.6165
K <sub>2</sub> O	10.1932	8.5194	9.5327	7.5050	5.9532	6.1958
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.7191	27.6347	-----	29.7553	30.7862	30.4806
Rb <sub>2</sub> O	0.0907	-----	0.1267	0.0576	0.0760	0.0557
SrO	0.0666	0.0667	0.1592	0.0868	0.0928	0.1053
TiO <sub>2</sub>	0.9028	3.1409	1.2616	0.9931	0.7135	0.7434
Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0500	0.0413	0.3344	-----	-----	0.0259
ZrO <sub>2</sub>	-----	0.0569	-----	0.0258	0.0179	-----
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-----	0.0001	0.1989	-----	-----	-----
Se <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	-----	0.0022	-----	-----	-----	-----
MnO	-----	-----	0.0086	-----	-----	-----
CaO	-----	-----	-----	-----	0.9735	0.4528
BaO	-----	-----	-----	-----	-----	0.0163

### 15.3.2. Concentración del granate almandino aplicando la separación por gravedad

#### 15.3.2.1. Metodología

El proceso de reducción de tamaño se realizó igual que con el mineral de moscovita. Luego el mineral quebrantado y molido se tamizó a las mallas 32 (0.500 mm.), 48 (0.297 mm.), 65 (0.210 mm.), 80 (0.177 mm.), 100 (0.149 mm.) y 150 (0.105 mm.) según la serie Tyler.

El material fue colocado en bolsas de plástico debidamente rotuladas, luego se tomó una muestra de cada uno de los tamaños de partícula y se evaluó su concentración de granate y esquistos micáceos, por el método de análisis mineralógico.

El siguiente procedimiento se realizó con cada uno de los tamaños de partícula. Se preparó una solución al 25% en peso de mineral, para luego ser alimentada a la mesa de separación por gravedad; en la mesa se obtuvo básicamente dos tipos de material: el esquistos micáceo que salió por un costado, es decir el área de las colas o área de mineral de bajo peso específico, y el concentrado de granate que salió por el frente o área de alto peso específico.

Se realizaron tres corridas con cada tamaño de partícula, luego tanto los concentrados como las colas fueron evaluados por análisis mineralógico, tomando en cuenta básicamente el aspecto de los cristales y el cambio de colores que sufren con la aplicación de la luz polarizada, al colocarlos en el microscopio petrográfico, al igual como se realizó el análisis para la moscovita.

#### 15.3.2.2 Resultados de las pruebas de separación por gravedad

Tabla No. 31: Resultados del análisis mineralógico del mineral sin procesar (mineral de alimentación al proceso).

Tamaño de partícula	% Granate almandino	% Mica moscovita	% Ganga material no útil
32 (0.500 mm)	15.73 %	73.26 %	11.01 %
48 (0.297 mm)	24.07 %	61.54 %	14.39 %
65 (0.210 mm)	19.49 %	68.82 %	11.69 %
80 (0.177 mm)	21.63 %	65.56 %	12.81 %
100 (0.149 mm)	14.24 %	74.02 %	11.74 %
150 (0.105 mm)	13.12 %	74.18 %	12.70 %

Tabla No. 32: Resultados del análisis mineralógico del concentrado obtenido aplicando la separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wifley No.13.

Tamaño de partícula	% Granate almandino	% Mica moscovita	% Ganga material no útil
32 (0.500 mm)	70.69 %	9.90 %	19.41 %
48 (0.297 mm)	72.82 %	20.97 %	6.21 %
65 (0.210 mm)	82.89 %	6.27 %	10.84 %

<b>80 (0.177 mm)</b>	<b>95.14 %</b>	<b>1.16 %</b>	<b>3.70 %</b>
100 (0.149 mm)	85.14 %	4.15 %	10.71 %
150 (0.105 mm)	54.39 %	25.07 %	20.54 %

Tabla No. 33: Resultados del análisis mineralógico de las colas obtenidas aplicando la separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wifley No. 13.

Tamaño de partícula	% Granate almandino	% Mica moscovita	% Ganga material no útil
<b>32 (0.500 mm)</b>	<b>1.85 %</b>	<b>94.44 %</b>	<b>3.71 %</b>
48 (0.297 mm)	3.49 %	85.30 %	11.21 %
65 (0.210 mm)	2.65 %	87.78 %	9.57 %
<b>80 (0.177 mm)</b>	<b>1.18 %</b>	<b>92.72 %</b>	<b>6.10 %</b>
100 (0.149 mm)	2.07 %	88.05 %	9.88 %
150 (0.105 mm)	10.80 %	81.09 %	8.11 %

Tabla No. 34: Porcentajes de recuperación de granate almandino en los concentrados obtenidos aplicando la separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wilfley No. 13.

Tamaño de partícula (en milímetros)	Recuperación de granate almandino en el concentrado
<b>32 (0.500 mm)</b>	<b>90.64 %</b>
48 (0.297 mm)	89.80 %
65 (0.210 mm)	89.26 %
<b>80 (0.177 mm)</b>	<b>95.73 %</b>
100 (0.149 mm)	87.59 %
150 (0.105 mm)	22.06 %

Tabla No. 35: Porcentajes de recuperación para la mica de variedad moscovita en las colas obtenidas aplicando la separación gravimétrica en la mesa vibratoria Wilfley No. 13.

Tamaño de partícula (en milímetros)	Recuperación de moscovita en las colas
<b>32 (0.500 mm)</b>	<b>96.61 %</b>
48 (0.297 mm)	87.41 %
65 (0.210 mm)	97.88 %
<b>80 (0.177 mm)</b>	<b>99.48 %</b>
100 (0.149 mm)	99.06 %
150 (0.105 mm)	95.83 %

### 15.3.3. Análisis de los resultados de las pruebas de separación por gravedad

En los últimos años muchas compañías han revaluado los sistemas gravimétricos, debido al incremento en los costos de los reactivos de flotación, la relativa simplicidad de los procesos gravimétricos, y por el hecho de que producen relativamente poca contaminación ambiental.

En muchos casos, una alta proporción del mineral en un cuerpo de mena puede, al menos, ser preconcentrado efectivamente por los sistemas gravimétricos económicos, ecológicamente aceptables; la cantidad de reactivos y combustibles que se usan se pueden reducir significativamente, cuando los métodos más costosos se restringen al procesamiento de concentrados, los cuales se obtienen en forma gravimétrica.

Según la teoría de concentración, para una separación gravimétrica efectiva es necesario que exista una marcada diferencia entre las densidades relativas del mineral de interés y la ganga. A partir del criterio de concentración, se tendrá idea sobre el tipo de separación posible; este criterio se aplica a través de la ecuación,

$$\frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

Donde:

$D_h$  = densidad relativa del mineral pesado; para este caso, en particular, sería la densidad relativa del granate 4.3.

$D_l$  = densidad relativa del mineral ligero; para este caso, en particular, sería la densidad relativa de la moscovita 2.7.

$D_f$  = densidad relativa del medio fluido; para este caso, en particular, sería la densidad relativa del agua 1.

En términos muy generales, cuando el cociente es mayor de 2.5, ya sea positivo o negativo, entonces la separación gravimétrica es relativamente fácil. A medida que el valor del cociente disminuye, la eficiencia de la separación disminuye; a menos de 1.25 la concentración por gravedad, por lo general, no es comercialmente posible.

El cociente en la ecuación del criterio de concentración, para el granate almandino y la moscovita es de 1.94, ya que es mucho mayor que 1.25 y cercano de 2.5, se justifica una buena separación por el método gravimétrico, es decir, que los resultados obtenidos en las pruebas de planta piloto concuerdan con los lineamientos de la teoría.

La importancia de clasificar el mineral por tamaños radica en que es necesario un estrecho control del tamaño de las partículas en la alimentación a la mesa vibratoria, con el fin de reducir el efecto que se produce, debido a la heterogeneidad en el tamaño de las partículas en la capa fluyente, lo que hace que el movimiento de las partículas dependa en mayor grado de la densidad relativa del mineral.

Si se introduce una gama variada de tamaños de partícula a la mesa vibratoria, en el interior de la capa fluyente de agua, las partículas pequeñas no se moverán tan rápidamente como las partículas grandes, porque estarán sumergidas en la porción de la capa de movimiento más lento. Las partículas de alta densidad relativa se mueven más

lentamente que las partículas más ligeras, y en esa forma se produce un desplazamiento lateral del material, con dirección en el sentido de la pendiente de la mesa.

Los concentrados con altos porcentajes de pureza y recuperación, obtenidos en el proceso de separación gravimétrica, se deben principalmente a los factores expuestos a continuación: el alto cociente obtenido en la ecuación del criterio de concentración; la previa clasificación de partículas hecha en tamices, y el estricto control en la alimentación a la mesa vibratoria.

La uniformidad en el tamaño de las partículas también favorece la sedimentación diferencial, de conformidad con la densidad relativa y no por el tamaño; así también favorece la estratificación diferencial, que ayuda a mantener el concentrado fino fuera del alcance del agua de lavado, hasta que se haya separado la mayor parte de los estériles, que en este caso son las partículas de moscovita.

La forma de las partículas es otro factor importante en las separaciones por gravedad hechas sobre mesas vibratorias. Las partículas planas, de tamaños mayores que la malla 65 (0.210 mm), tales como la mica, aunque ligeras, no ruedan fácilmente a través de la cubierta en la capa de agua; éstas se adhieren a la cubierta y son llevadas hacia abajo hasta la descarga del concentrado; además interfieren con el movimiento de las partículas esféricas (partículas de granate) hacia las colas; esta es la razón por la que en la malla No. 32 (0.500 mm) se obtuvo la cola más limpia y pura con alto concentrado de moscovita (variedad de mica).

Los resultados obtenidos para la malla No. 150 (0.104 mm), en la separación gravimétrica, resaltan concentrados de baja ley; esto se debe a que la mesa Wilfley No. 13 sólo procesa eficientemente partículas con tamaños comprendidos entre la malla No. 32 (0.500 mm) y la malla No. 100 (0.100 mm); al alimentar la mesa con material igual o menor que la malla No. 150 (0.104 mm), la capa fluyente, prácticamente lava todo el material, porque son partículas muy pequeñas y fáciles de ser arrastradas hacia el área de los estériles, que hace que se obtengan concentrados pobres.

Al alimentar material con tamaño mayor que la malla 32 (0.500 mm), el material se sedimenta sobre la superficie de la mesa y provoca interrupción del flujo de mineral, ya que las partículas son demasiado grandes y ni siquiera la acción conjunta del flujo de agua con el movimiento oscilatorio de la mesa hacen que éstas se muevan con la velocidad suficiente para no provocar la sedimentación y aglomeración del material.

En el procesamiento de minerales, la molienda es un punto crítico, ya que más del 70 % del gasto energético total del proceso se debe a ella; por esta razón, el tamaño de partícula es una variable crítica en la gran mayoría de los procesos de concentración de minerales. El diseño propuesto al nivel de planta piloto, se basa en el manejo eficiente de los tamaños de las partículas; se tratan de obtener principalmente las mallas óptimas del proceso para lograr concentrados de alta ley de granate almandino, y los productos de cola con concentrados de alta ley de moscovita.

En el Anexo No. 3, se propone un ejemplo de una planta de procesamiento de granate a escala industrial para su posterior aplicación como material abrasivo.