

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

BENEFICIO MINERAL DE LA MICA PRESENTE EN LA CANTERA CURA, SAN JOAQUÍN, ESTADO CARABOBO.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de
Ingeniero de Minas
Por la Br. Estrada R., Dityubet

Caracas, Agosto de 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

BENEFICIO MINERAL DE LA MICA PRESENTE EN LA CANTERA CURA, SAN JOAQUÍN, ESTADO CARABOBO.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Mónica Martíz

COTUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Simón Rodríguez

© Dityubet Estrada R., 2001.

Hecho el Depósito de Ley.

Depósito Legal N° Ift. 4872001620144

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO I	
1. GENERALIDADES.....	5
1.1. Planteamiento del Problema.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo General.....	6
1.2.2. Objetivos Específicos.....	6
1.2.3. Alcance.....	7
1.3. Localización de la Mena.....	7
1.4. Geología Regional.....	8
1.5. Geología Local.....	10
CAPÍTULO II	
2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS MICAS.....	13
2.1. Aspectos Fundamentales.....	13
2.2. Antecedentes.....	15
2.3. Clasificación de las Micas.....	16
2.4. Usos y Especificaciones de las Micas.....	19
2.4.1. Usos y Especificaciones de las Micas en Venezuela.....	23
2.4.1.1. Pinturas.....	24
2.4.1.2. Petróleo.....	27
2.5. Tipos de Depósitos.....	32
2.5.1. Depósitos de Mica en Venezuela.....	33
2.6. Países Productores de Mica.....	34
2.6.1. Importación de Mica en Venezuela.....	36

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PREPARACIÓN DE MINERALES.....	40
3.1. Preparación de los Minerales.....	40
3.2. Operaciones de Reducción de Tamaño (Conminución).....	42
3.2.1. Equipos de Trituración y Molienda de Minerales.....	46
3.3. Operaciones de Clasificación.....	58
3.3.1. Clasificación Dimensional.....	59
3.3.2. Clasificación Isodrómica.....	62
3.3.2.1. Clasificación Neumática.....	63
3.3.2.2. Ciclón Neumático.....	63
3.3.2.3. Clasificador Neumático de Laboratorio.....	69
3.4. Operaciones de Concentración.....	72
3.4.1. Concentración por Flotación.....	73
3.4.1.1. Reactivos de Flotación.....	74
3.4.1.2. Equipo de Flotación.....	79

CAPÍTULO IV

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	81
4.1. Metodología.....	81
4.2. Preparación de las Muestras.....	82
4.3. Caracterización de las Muestras.....	83
4.3.1. Descripción Macroscópica.....	83
4.3.2. Determinación del Contenido de Humedad.....	84
4.3.3. Análisis Granulométrico.....	85
4.3.4. Difracción de Rayos X.....	88
4.3.4.1. Estudio de Petrografía	91
4.3.5. Análisis de Liberación.....	92
4.3.6. Análisis Químicos.....	97
4.3.6.1. Fundamentos del método ICP.....	97
4.3.6.2. Procedimiento Analítico.....	105
4.3.6.3. Resultados de los Análisis Químicos.....	107
4.4. Ensayos Experimentales.....	107
4.4.1. Estudio de Moliendabilidad.....	108

4.4.2. Experimentos de Clasificación Isodrómica.....	113
4.4.2.1. Eficiencia del Ciclón Neumático.....	119
4.4.3. Ensayos Exploratorios de Concentración.....	124
4.4.4. Experimentos de Concentración.....	132
4.4.5. Resultados.....	133
4.4.6. Análisis de Resultados.....	136
CONCLUSIONES.....	140
RECOMENDACIONES.....	144
BIBLIOGRAFÍA.....	146

ANEXOS

1. Tipos de Mica de Uso Industrial y Producto Micáceo de la Mena en Estudio
2. Difractograma de la Muestra Cabeza de la Flotación
3. Descripción de la Petrología de la Muestra
4. Expresiones de Cálculo de Composición Porcentual
5. Diagrama de Proceso del Ciclón Neumático

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA

1. Especificaciones de Uso de la Mica.....	23
2. Países Productores de Mica.....	35
3. Análisis Granulométrico del producto de la Trituración Primaria.....	86
4. Análisis Granulométrico del producto de la Trituración Secundaria.....	86
5. Cuadro Resumen de los Resultados de las Intensidades Relativas del Material de Estudio.....	89
6. Características de los Minerales encontrados por Difracción de RX.....	90
7. Grado de Liberación de los productos de la Trituración Primaria y Secundaria....	94
8. Concentraciones de Elementos Mayoritarios presentes en la muestra cabeza del Ciclón.....	107
9. Concentraciones de Elementos Mayoritarios presentes en la Muestra Cabeza de la Flotación.....	107
10. Análisis Granulométrico de la Muestra Cabeza del Ciclón.....	109
11. Análisis Granulométrico del Producto de la Molienda de 3 Minutos.....	110
12. Análisis Granulométrico del producto de la Molienda de 6 minutos.....	110
13. Análisis Granulométrico del producto de la Molienda de 9 minutos.....	110
14. Análisis Granulométrico del producto de la Molienda de 12 minutos.....	111
15. Caudales de Aire en las Válvulas del Ciclón Neumático.....	115
16. Reporte de Combinaciones de Válvulas para los Experimentos de Clasificación	116
17. Análisis Granulométrico del producto del Ciclón Neumático. Combinación A5B4C1. P_A y P_B	125
18. Condiciones de los Ensayos Exploratorios de Flotación.....	128
19. Resultados de los productos de los Ensayos Exploratorios de Flotación.....	129
20. Reporte de Combinaciones de Variables.....	130
21. Condiciones de los Ensayos Experimentales de Flotación.....	132
22. Resultados de los productos de los Ensayos Experimentales de Flotación.....	134
23. Reporte de Combinaciones de Variables.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA

1. Ubicación Geográfica de la Zona de Toma de Muestras.....	8
2. Mapa Geológico aproximado del área de Canteras Cura, S.A.....	11
3. Afloramiento del Esquisto Cuarzo – Micáceo.....	12
4. Clasificación del Mineral de Mica.....	17
5. Relación entre los componentes del Sistema de Circulación de Lodos de Perforación.....	30
6. Cifras de Importación de Mica.....	37
7. Machacadora de Mandíbulas Tipo Blake.....	49
8. Cilindros Trituradores.....	53
9. Movimiento de la Carga en los Molinos.....	54
10. Mecanismos de Fractura en la Molienda.....	55
11. Molino de Barras.....	56
12. Equipo de Tamizado de Laboratorio.....	60
13. Corte Esquemático de un Ciclón.....	64
14. Fuerzas Actuantes sobre una Partícula en su Órbita dentro de un Ciclón.....	66
15. Distribución de las Componentes Vertical y Radial de la Velocidad en un Ciclón	67
16. Regiones de Distribución de Tamaños Similares en un Ciclón.....	68
17. Clasificador de Aire de Laboratorio, Marca Denver, Modelo C.....	70
18. Esquema del Clasificador de Aire de Laboratorio Marca Denver, Modelo C.....	71
19. Principio de la Flotación.....	74
20. Máquina de Flotación para Pruebas de Laboratorio Marca Denver.....	80
21. Esquema General del Desarrollo Experimental.....	81
22. Homogeneización de la Muestra.....	83
23. Curva Granulométrica del producto de la Trituración Primaria y Secundaria.....	87
24. Producto de la Trituración Primaria. Malla 30.....	95
25. Producto de la Trituración Secundaria. Malla 150.....	96
26. Representación Gráfica del Grado de Liberación en la Trituración Primaria y en la Trituración Secundaria.....	96
27. Equipo de ICP Marca Jobin Yvon, Modelo JY24.....	97
28. Conformación Física del Plasma ICP.....	101

29. Configuración del Plasma de acuerdo a la Frecuencia Utilizada.....	101
30. Cámara de Nebulización del Equipo JY24.....	102
31. Dilución de Perla en HNO ₃ sobre Planchas Eléctricas con Calentamiento y Agitadores Magnéticos.....	106
32. Balones Aforados con la Perla Diluida.....	106
33. Representación Gaudin – Schuhman para Moliendabilidad.....	112
34. Anemómetro. Instrumento de Medición de Velocidad de Aire.....	115
35. Representación del producto Pc obtenido en el Ciclón Neumático de acuerdo a distintas Aberturas de Válvulas.....	118
36. Representación del producto Pc obtenido en el Ciclón Neumático de acuerdo a las 20 Combinaciones de Aberturas de Válvulas.....	118
37. Representación Gráfica del producto Pc obtenido en el Ciclón Neumático de acuerdo a las Aberturas de la Válvula “C”	119
38. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las condiciones de Aberturas de Válvulas A5B4C1.....	121
39. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las condiciones de Aberturas de Válvulas A5B6C1.....	121
40. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las condiciones de Aberturas de Válvulas A6B1C1.....	122
41. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las condiciones de Aberturas de Válvulas A6B4C1.....	122
42. Curva Granulométrica del producto del Ciclón Neumático. Combinación A5B4C1. P _A y P _B	125
43. Efecto de las Revoluciones por Minuto (RPM) de la Máquina de Flotación en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.....	131
44. Efecto de la Densidad de la Pulpa en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.....	131
45. Efecto del pH en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.....	135
46. Efecto de la Dosis de Amina en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.....	135
47. Efecto de la Dosis de Silicato en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.....	136

BENEFICIO MINERAL DE LA MICA PRESENTE EN LA CANTERA CURA, SAN JOAQUÍN, ESTADO CARABOBO.

Tutor Académico: Prof. Ing. Mónica Martíz. Cotutor Académico: Prof. Ing. Simón Rodríguez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2001, 154 pp.

Palabras Claves: Mena, Ganga, Conminución, Clasificación, Flotación

Resumen

Con el fin de obtener materia prima micácea de uso industrial, de la Cantera Cura en San Joaquín, Edo. Carabobo, se inició el estudio de factibilidad de beneficio mineral fundamentado en las teorías del proceso de preparación y concentración de menas, a partir de la trituración y molienda de 224 kg de roca esquisto – micácea, con un tenor promedio de 54,18% de cuarzo y 45,82% de mica, incluida en ésta, además de la muscovita, la clorita . Las operaciones de clasificación de las partículas minerales fueron ejecutadas a través de tamices de laboratorio, y de un clasificador neumático, con el cual se obtuvo un producto de 49,95% de cuarzo y 50,05% de mica, considerado como elemento de flotación. La operación de concentración, llevada a cabo por medio de la flotación con espuma, dio como resultado un concentrado de tamaño –30 mallas de 92,37% de mica a una recuperación de 68,57%, y un producto en las colas de 74,99% de cuarzo.

El concentrado obtenido indica la posibilidad de emplearlo como materia prima para la industria petrolera, específicamente para mica fina, ya que se encuentra en el rango de tamaños –20+100 mallas, aprovechando su hábito micáceo como propiedad física fundamental; igualmente, para la industria del caucho, donde, con una posterior trituración a –45+325 mallas, puede cumplirse con las especificaciones requeridas. La industria de la pintura bien puede beneficiarse de este concentrado, siempre y cuando se le utilice en pinturas especiales que no exijan la muscovita pura dentro de su composición. En la industria de los electrodos, este producto micáceo no cumple con los parámetros de elaboración de los mismos, por cuanto la mena objeto de estudio no está constituida por muscovita pura.

En general, se estima necesario, por el tipo de investigación exploratorio en que se basa el presente trabajo, realizar mayores pruebas tanto en laboratorio como en planta piloto, para evaluar el comportamiento de la mena al tratamiento continuo, con el fin de tener la seguridad de que el yacimiento ofrezca mayores perspectivas de rendimiento económico.

Por siempre a Dios,

a mis padres Betty y Francisco, y a mi

hermano Fran

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi agradecimiento a la Ilustre Universidad Central de Venezuela y a todos los profesores del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, por su aporte en mi formación como profesional de la minería; especialmente a la Ing. Mónica Martiz, por su confianza, colaboración y acertadas críticas como tutora académica; y al profesor Simón Rodríguez, por su respaldo como cotutor en la realización del presente trabajo.

Al Ing. Manuel García, por su amistad, paciencia y apoyo durante todo el proceso de ejecución del trabajo.

A Omar Goddeliet, por toda su colaboración y sus acertadas apreciaciones.

Al Ing. Ricardo Alezones, por su aporte en los análisis mineralógicos, así como por su tolerancia y sabias recomendaciones.

Al Prof. Alexis Lira por permitirme la realización de los análisis químicos; y a los técnicos Félix Monasterios y Felipe Quintero, por su valiosa ayuda incondicional.

A toda mi familia: mis padres Francisco y Betty, mi hermano Fran y mi cuñada Ana Karina, por su invaluable amparo, apoyo moral; y por el aporte oportuno y efectivo de sus conocimientos.

A Angel, que simplemente lo es todo para seguir avanzando.

A todos mis compañeros y amigos de la Escuela de GMYG, en especial a Vrotnesky Cediél, Livia Rodríguez, Oswaldo Fuenmayor, Natalia Valdivieso, Ronald Saya y Marianita Purroy que compartieron todas mis flaquezas y fortalezas durante mi carrera y, más aún, en la última etapa de ésta; así como mis amigas Carolina, Dreyalijs y Elizabeth, cuya amistad fuera de la escuela estuvo siempre presente.

Y al resto de las personas que, de alguna u otra forma, me prestaron su ayuda para la realización y culminación del presente trabajo.

INTRODUCCIÓN

El beneficio de los minerales es un procedimiento que juega un papel importante en los minerales industriales, particularmente en la producción de productos de alto valor económico. Los procesos de beneficio son de utilidad para proveer los recursos necesarios para desarrollar propiedades específicas de los minerales e introducir al mercado productos nuevos o mejorados, aumentando así su distribución y provecho. Nuevas tecnologías pueden utilizar recursos de minerales que anteriormente eran estériles, expandiendo de esta manera las reservas base de una compañía, o reducir el impacto ambiental.

El presente trabajo trata acerca del estudio de la factibilidad de beneficio mineral de la mica presente en la Cantera Cura, ubicada en San Joaquín, Estado Carabobo, empleando métodos de trituración, molienda, clasificación y concentración con la finalidad de obtener un producto útil para toda la industria de la Región Central con requerimientos de materia prima micácea.

La investigación parte de la necesidad de aprovechar el potencial económico que tiene la mica presente en la Región Central, específicamente la mena proveniente de la Hacienda Cura, la cual puede ser beneficiada para cubrir el amplio mercado que se ubica en dicha región, cuyas probabilidades de crecimiento la constituyen en el cordón industrial más importante de Venezuela donde se ubican numerosas industrias consumidoras de este importante mineral.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del Problema

La zona central del país, integrada esencialmente por los estados Aragua, Carabobo y Cojedes, conforma debido a su compleja geología, una de las más importantes áreas de América Latina con depósitos de minerales del tipo industrial. En la actualidad, depósitos de calizas, dolomitas, serpentinitas, entre otros, se encuentran bajo explotación suministrando materias primas a varias de industrias localizadas en los estados Aragua, Carabobo, Yaracuy, Portuguesa, Cojedes, Miranda y Lara. Se estima que la Región Central produce más del 70% de los minerales industriales del país.

Producto de la presencia de dichas minas, al país se le presenta la oportunidad económica de avanzar en la investigación en detalle, acerca de la factibilidad de producir insumos industriales de origen minero que son actualmente importados, tales como los utilizados por las industrias de cerámica, refractarios, pinturas, abrasivos, electrodos, barnices, etc., de manera de conocer la factibilidad de ser sustituidos por menas minerales venezolanas.

En este sentido, de acuerdo a estudios realizados por CORPOCENTRO en la Región Central, el estado Carabobo contiene muy probablemente la reserva más importante de mica desde el punto de vista volumétrico, cualitativo y geográfico del país. Esto significa que cualquier desarrollo minero de pequeñas dimensiones, tal y como el asociado con la extracción de mica, no acarreará la inversión de grandes

sumas para la construcción de vías de acceso, por encontrarse muy cerca de Valencia, la cual es una de las áreas industriales con mayor crecimiento en el país y donde se ubican numerosas industrias consumidoras de mica. La zona presenta energía eléctrica suficiente para cualquier desarrollo minero, un magnífico desarrollo urbano, mano de obra tecnificada y un excelente clima laboral.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar la factibilidad de beneficio mineral de la mica presente en la Cantera Cura en San Joaquín, Estado Carabobo, con la finalidad de obtener materia prima micácea de uso industrial.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características de la mena objeto de estudio: composición química, mineralogía, granulometría, liberación y humedad.
- Efectuar pruebas de reducción de tamaño por trituración y molienda de minerales.
- Clasificar por tamaños de partículas la mica objeto de estudio.

- Realizar pruebas de concentración mineral por flotación con espuma a la mica objeto de estudio.
- Potenciar el posible uso de la mica en Venezuela.

1.2.3. Alcance

En esta investigación se pretende determinar, de acuerdo a los resultados obtenidos, los parámetros idóneos de clasificación y concentración que permitan obtener altos porcentajes de mica, ubicando éstos últimos dentro de las especificaciones de mercado que mejor se adapten a los mismos.

1.3. Localización de la Mena

La zona en la cual se tomaron las muestras de mica, se encuentra ubicada en la propiedad perteneciente a la empresa Canteras Cura C.A. la cual, a su vez, se ubica en el flanco sur del segmento centro-occidental de la Cordillera de la Costa, perteneciendo al Distrito de San Joaquín, a unos 3 Km al norte del pueblo del mismo nombre en el Estado Carabobo (Figura 1).

En líneas generales, la zona se encuentra ubicada entre los meridianos $67^{\circ}50'$ y $67^{\circ}40'$ de longitud oeste y los paralelos $10^{\circ}20'$ y $10^{\circ}10'$ de latitud norte. El principal acceso a la zona se realiza mediante la autopista Caracas-Valencia, así como por la

carretera nacional. Ambas vías se ubican en la parte meridional de la zona con dirección aproximada este-oeste.

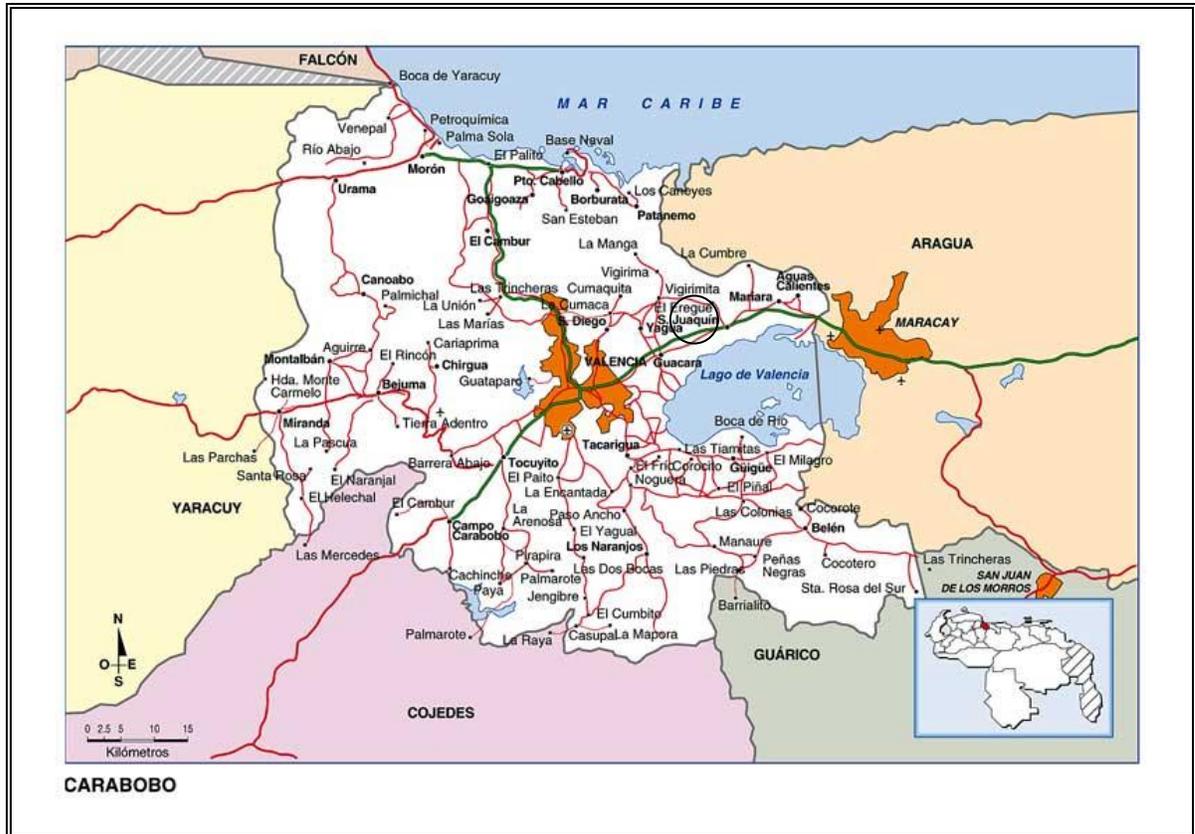


Fig. 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Toma de Muestras.

1.4. Geología Regional

Según DE TONI, B. (1983), el segmento centro-occidental de la Cordillera de la Costa, está constituido por una espesa secuencia de rocas de origen ígneo y sedimentario metamorfizadas de edad probablemente mesozoica.

Debido a la gran complejidad de las rocas de la Cordillera de la Costa, se establecieron cuatro fajas tectónicas de norte a sur y con rumbo aproximado este-oeste,

que son la de la Cordillera de la Costa, la de Caucagua-El Tinaco, la de Paracotos y la de Villa de Cura. La faja de la Cordillera de la Costa se ubica en la parte septentrional del Macizo Central, limita al norte con el sistema de fallas del Caribe, mientras que al sur coincide con la falla de La Victoria. Dentro de esta faja están representadas las rocas pertenecientes al Grupo Caracas, constituidas por las Formaciones de Sebastopol, Antímamo, Paracotos, Tucutunemo, Las Mercedes y Las Brisas, siendo en esta última donde se encuentra, a su vez, la mena esquistó-micácea que se estudia en el presente trabajo.

Según Morgan B. (1969), las Formaciones Las Mercedes y Las Brisas constituyen la parte más importante del Grupo Caracas. En la región de Valencia, la Formación Las Mercedes se reconoce en dos zonas diferentes en el flanco norte y el flanco sur de la Cordillera de la Costa. En el flanco sur, ésta consiste de una serie de unidades de mármol macizo de color gris oscuro, que alternan con mármoles en capas delgadas, esquistos calcáreos, esquistos grafiticos-muscovíticos y esquistos cuarzosos.

Igualmente, en el flanco sur de la Cordillera afloran tres masas de serpentinita: Dos de estas unidades se presentan en forma de sills en la parte inferior de Las Mercedes, y otra mayor aflora a unos 3 Kilómetros al norte de San Joaquín. Este cuerpo tiene unos dos kilómetros de longitud por uno de anchura y se encuentra en contacto de falla con las rocas de Las Mercedes. La mayor parte de la roca es dunita o peridotita serpentinizada; la masa está cruzada por dos importantes zonas de cizallamiento de dirección este-oeste que forman pronunciadas depresiones topográficas.

En términos generales, la Formación Las Brisas consiste de conglomerados delgados, cuarcitas, esquistos cuarzo-micáceos y gneises cuarzo-microclínicos. Por encima de estas rocas feldespáticas se presenta una unidad maciza y espesa de carbonato, en lentes discontinuos. La parte superior de la Formación Las Brisas es un esquisto cuarzo-muscovítico-clorítico, de mineralogía variable según la composición de masa y el grado metamórfico.

Según DE TONI B. (1983), se expone claramente en el área alrededor de San Joaquín, parte de la unidad de esquistos cuarzo-muscovíticos y cuarcitas muscovíticas (Uecm) del Grupo Caracas, cuyos contactos al sur son concordantes y transicionales con la unidad de mármoles (Um), en donde se observa intercalación de ambas rocas, mientras que al norte presenta un contacto de falla con la unidad de gneises porfidoblásticos (Ugf). Los afloramientos mejor representados se encuentran en la Fila El Horno y en el flanco norte del Cerro El Diablo.

1.5. Geología Local

Según RODRÍGUEZ S. (1998), la geología que se presenta en la Hacienda Cura está caracterizada por una masa de serpentinita, que constituye parte del rosario de rocas ultrabásicas que se encuentran a lo largo de la faja metamórfica de la Cordillera de la Costa, desde Yaracuy al oeste hasta Sucre en el este. Estos cuerpos de serpentinita normalmente se ubican en áreas sumamente cizalladas regionalmente y en contacto discordante con rocas metamórficas del Grupo Caracas.

Mapa Geológico Aproximado de Canteras Cura, S.A.

El cuerpo de serpentinita de la Hacienda Cura ha intrusado rocas metamórficas, esencialmente esquistos cuarzo-micáceos y micáceo-calcáreo de las Formaciones Las Brisas y las Mercedes. La intrusión ha ocurrido a lo largo de zonas de notable fallamiento regional. En este sentido, como puede observarse en la Figura 2, se ha originado lateralmente a dicha zona fallada, una importante faja de micacita, con un volumen aproximado de 6180 metros cúbicos banco, lo que representa unas 17304 toneladas de material, suponiendo un peso específico de la mica de 2.8 t/m^3 .

Cabe destacar, que este volumen corresponde al cálculo sobre reservas probables, medidas directamente en campo y hasta las áreas que permitía la vegetación existente (Figura 3). Sin embargo, puede considerarse como un dato preliminar que hay que confirmar para una futura explotación comercial de la mica, objeto de estudio del presente trabajo.



Fig. 3. Afloramiento del Esquisto Cuarzo-Micáceo

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS MICAS

2.1. Aspectos Fundamentales

“Mica” es un término genérico que se aplica a un grupo de minerales complejos de silicatos de aluminio y potasio hidratados y los más comunes son: la muscovita, la lepidolita, la biotita y la flogopita. Las diferencias entre las cuatro radica en la proporción de hierro, magnesio y aluminio contenido dentro de su estructura cristalina. La muscovita, rica en aluminio y la flogopita, rica en magnesio, son las variedades más comunes usadas industrialmente.

La muscovita, cuya fórmula típica es $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$, se llama “mica blanca” para distinguirla de la flogopita $(AlSi_3O_{10})KMg_3(OH)_2$ o “mica ambarina”. Sin embargo, los colores de la muscovita, en láminas gruesas y en cristales, fluctúan entre diversos matices del rojo y del verde. Por el color se clasifica industrialmente la muscovita en blanca (incluyendo en ella la amarilla), encarnada (ambarina, ron, roja, parda) y verde; pero todas las micas son transparentes e incoloras en hojas delgadas. Las manchas, que igualmente afectan a la clasificación industrial, son producidas por tenues películas de óxido férrico que se extienden entre las laminillas.

A este grupo de filosilicatos puede agregarse el grupo de las cloritas, el cual comprende un número de minerales que tienen propiedades químicas, cristalográficas y físicas, similares a los del grupo de las micas. Los mismos son silicatos alumínicos magnésicos de hierro hidratados y están caracterizados por su color verde, hábito

micáceo y exfoliación perfecta; aunque la misma es flexible, pero no es elástica, única diferencia de importancia con el grupo de las micas.

En general, la característica más resaltante de todas las micas es su alta estructura en placas, lo que las hace únicas. Su dureza es de 2 – 3 en la Escala de Mohs; su clivaje es perfecto y su peso específico es de 2.76 – 3.10. Además, poseen una de las más sobresalientes combinaciones de propiedades químicas, físicas, eléctricas, térmicas y mecánicas, las cuales no son encontradas en ningún otro producto.

Desde el punto de vista físico la mica es transparente, ópticamente plana, fácil de partir en películas delgadas a lo largo de su clivaje, incolora en hojas delgadas, elástica, flexible e incompresible.

Químicamente es un complejo hidrosilicato de aluminio, conteniendo potasio, magnesio, hierro, fluoruro de sodio y/o litio y también cantidades de otros elementos. Es estable y completamente inerte a la acción del agua, ácidos (excepto el fluorhídrico y sulfúrico concentrado), álcalis, solventes convencionales, aceite y virtualmente inafectado por la acción atmosférica.

En cuanto a sus propiedades eléctricas la mica tiene una extremada baja conductividad, la que determina la mayoría de sus aplicaciones comerciales. La resistencia dieléctrica de la mica es su capacidad para resistir sin rotura altos voltajes o fuertes intensidades de campo eléctrico y se prueba haciendo saltar chispas de alto voltaje.

Térmicamente, la mica es a prueba de fuego, incombustible y no inflamable y puede resistir temperaturas de 600°C a 900°C, dependiendo del tipo de mica. Tiene baja conductividad del calor, excelente estabilidad térmica y puede ser expuesta a altas temperaturas sin efecto apreciable.

Sus bondades mecánicas están representadas por la suavidad de sus hojas, así como por la facilidad con que puede ser cortada manualmente, triturada o punzonada. Las hojas del grupo de las micas son flexibles, elásticas y resistentes, teniendo alta resistencia a la tensión; en las del grupo de la clorita, los cristales no llegan a ser tan buenos como los del grupo de las micas, sino más bien se presentan en masas exfoliables o en agregados de escamas diminutas flexibles, pero no elásticas.

2.2. Antecedentes

Dentro de los trabajos previos al presente trabajo, puede mencionarse los desarrollados por el U.S. Bureau of Mines, utilizando procesos neumáticos en seco para extraer mica de una de sus minas, reportándose similares procesos operados en Europa y Canadá. Aunque se ha intentado establecer estos procesos en seco en Estados Unidos, ninguno de ellos ha resultado satisfactorio, debido a que la calidad de la mica ha sido pobre, y la economía prohibitiva.

Hasta la fecha se han realizado varios trabajos de beneficio mineral de micas a escala nacional, pero sólo en la Universidad Central de Venezuela se cuenta como tesis de grado, dos investigaciones, realizadas por los bachilleres Miguel González y José Benvenega. Al primero corresponde el trabajo denominado "Concentración del

Feldespatos y de la Mica del Páramo de Peñas Blancas. Edo. Mérida” en agosto de 1970 y el segundo, el trabajo del año 1990 denominado “Concentración de Muscovita – Biotita por el Ciclón Neumático a partir de la mena Esquisto – Micácea del Páramo Peñas Blancas, Estado Mérida”.

Sin embargo, como se puede observar, las mencionadas tesis de grado están referidas a las micas de la región andina, no existiendo ningún antecedente sobre las micas de la Región Central, objeto de este estudio. En este ámbito, sólo se pueden mencionar los estudios geológicos realizados por Corpocentro, afianzándose el interés por esta región a partir del Primer Congreso de Desarrollo Minero de la Región Central, celebrado en Valencia, Estado Carabobo, en 1991.

Del mismo modo, la revista anual *Industrial Minerals* (1999), reporta algunas tecnologías de procesos para beneficiar mica y otros minerales industriales, y los datos de investigación reportados en el capítulo de “Mica” publicado por el *Industrial Mineral Handbook* de 1994, sirvieron de base para los ensayos de flotación que se llevaron a cabo para concentrar la mica objeto de estudio.

2.3. Clasificación de las Micas

Existen diversas clasificaciones de varios autores, sin embargo, una de las más recientes y que se toma en cuenta para este trabajo, es la publicada por la revista *Industrial Minerals*, en su edición de Enero de 1997, y que se adapta muy bien al resto de las clasificaciones que se emplean en varios países del mundo productores de mica. La misma se encuentra traducida en forma de esquema en la Figura 4.

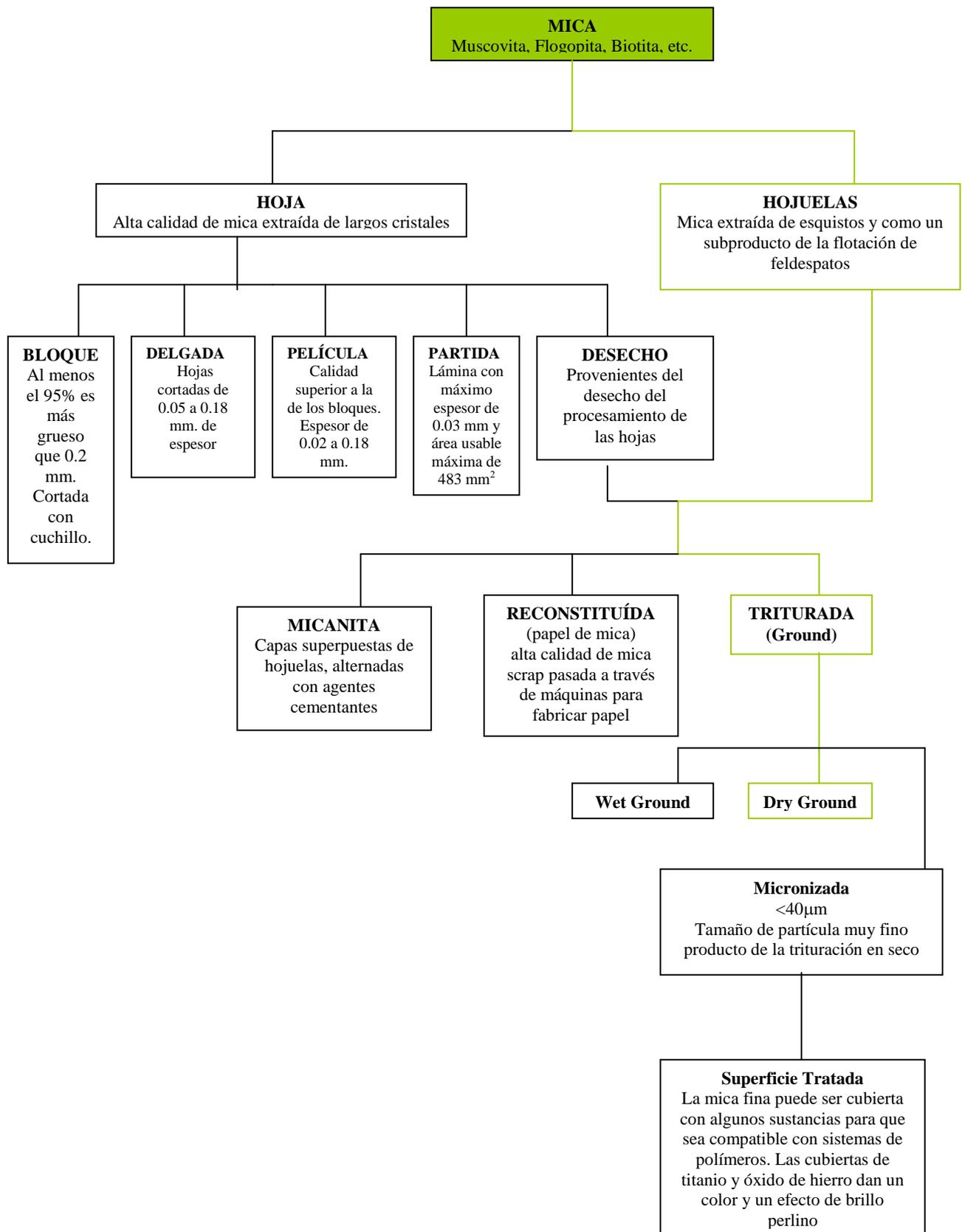


Fig. 4. Clasificación del Mineral de Mica.
Fuente: Industrial Minerals, 1997.

Comercialmente, la mica está disponible en un gran número de formas; mica en hojas, en hojuelas, desecho y micas procesadas. La mica en hojas es de la más alta calidad y se deriva de largos cristales que pueden ser cortados, perforados o estampados para aplicaciones industriales. Las hojas de muscovita, son extraídas generalmente de pegmatitas y sus cristales individuales pueden medir desde 2.5 cm hasta varios metros. Las hojas de mica flogopita, son menos comunes y principalmente, se originan en depósitos de venas con piroxenita. La mica en hoja, puede ser subdividida en cuatro principales grados: bloque, delgada, película y partida.

Las micas de desechos y en hojuelas son de menor calidad, teniendo un rango amplio de aplicaciones. La mica de desecho, inicialmente provenía del desbaste y los desechos del procesamiento de la mica de hoja; sin embargo, como la demanda de la mica fue incrementándose, se han desarrollado otros métodos para extracción de mica.

Así, las de desecho y las hojuelas, son ahora extraídas de pegmatitas, esquistos y como un subproducto de la flotación de espodumena y feldespatos.

Las micas de desechos y en hojuelas, son procesadas en un gran número de maneras para producir una variedad de productos de mica. Estos productos finalmente, pueden ser triturados para producir materiales en seco o en húmedo, así como mica micronizada. Desde 1892, la mica partida ha sido reconstituida para imitar las propiedades físicas y eléctricas de la buena calidad de las micas de hojas.

La micanita, es construida con pequeñas hojuelas de mica, superpuestas en capas uniformes, alternándose éstas con un agente cementante (epoxy, silicon u otros)

de acuerdo a características particulares para usos específicos. Una vez logrado el espesor requerido, se secan calentándolas bajo presión.

La mica reconstituida es producida por la exfoliación parcial de mica de desecho de alta calidad, la cual es entonces procesada en forma de pulpa e introducida en una máquina modificada para fabricar papel, con la finalidad de producir papel de mica.

2.4. Usos y Especificaciones de las Micas

En virtud de sus propiedades físicas y químicas, la mica históricamente ha encontrado un nicho en un gran número de industrias. Existe evidencia que ha sido usada desde el año 2000 A.C, cuando los Hindúes explotaron la mica en hojas para ser utilizada en medicinas, vidriado de ventanas y en decoración. Es sólo en los últimos dos o tres siglos que este rango de usos se ha incrementado.

La introducción de los diferentes tipos de mica mencionados en el punto anterior, han expandido los mercados que previamente sólo eran cubiertos por la mica en hojas. Estos principales mercados, son el de la construcción; pinturas; plásticos; electrónica; papel y fluidos de perforación. El de las pinturas y el de fluidos de perforación se tratará con detalle más adelante.

Construcción. La adición de 4 – 20% de mica dentro del cemento y los rellenos compuestos de morteros, en los rellenos de paneles acústicos, en los fieltros asfálticos, placas de fibrocemento y en los materiales aislantes entre otros, brinda un número de ventajas como las siguientes:

- Incremento de los esfuerzos a tracción y compresión, tenacidad y estabilidad de la estructura.
- Incremento en la resistencia a la corrosión de ácidos sulfúrico y clorhídrico.
- Mejora del aislamiento al calor.

La mica triturada en seco, tiene su principal uso en las juntas de cemento de las placas de concreto prefabricadas y en los “wallboard”, que son materiales estructurales, a base de un mortero de yeso, utilizados para cubrir el interior de las paredes en forma de paneles y en donde el aislamiento térmico y acústico son de consideración. De esta manera, la mica de 70 – 80% menor a 45μ , es usada como un relleno y extendedor en la mezcla del cemento, la cual es usada para rellenar las grietas entre las paneles individuales. La forma de las partículas de la mica, reduce la contracción y el agrietamiento, mejora las características del flujo, ayuda a moldear la estructura y provee de una superficie lisa y no absorbente. Asimismo, la mica triturada en húmedo es utilizada para la fabricación de papel para el interior de las paredes ya que el brillo de las partículas aporta un lustre perlino cuando es aplicado al papel.

La mica pulverizada sirve para revestir techados asfálticos, porque posee gran capacidad de cubrimiento, no es absorbida por el papel recién impregnado, no absorbe el asfalto y resiste bien el ataque de la intemperie y el ácido del asfalto. Su función principal consiste en evitar que las piezas preparadas de la techumbre se peguen unas a otras.

Plásticos. Con relativamente bajo costo, la mica en los plásticos mejora la estabilidad del tamaño, la estabilidad al calor, el aislamiento del calor, el módulo de compresión, las características de resistencia al agua y a gases, los hace más inertes a la radiación UV, mejora la resistencia a la abrasión, la constante dieléctrica y la corrosión. Todo esto lo proporciona la mica gracias a su estructura laminar, la cual provee de refuerzo a lo largo de un plano, mejor que el eje único ofrecido por la fibra de vidrio.

El uso de los plásticos en los vehículos está en crecimiento; en un carro ahora se incluye un promedio de 1000 componentes de plásticos, en un intento para reducir el sobrepeso del mismo. Las calidades específicas requeridas son para amortiguar vibraciones y sonidos, resistir a la corrosión y ataques químicos, tener flexibilidad, lubricar los moldes y obtener bajos costos de elaboración. De allí que el Polipropileno (PP) haya surgido como el plástico preferido para el diseño de dichos componentes, y como para la elaboración del mismo se utiliza mica triturada en seco o en húmedo, se puede notar el gran crecimiento de este mineral en este sector. En Venezuela, las industrias del caucho consultadas, como Pirelli y Firestone, utilizan la mica para la lubricación de sus moldes y como agente contra la fricción y el punzonado en un tamaño de partícula $-45 +325$ mallas.

Eléctrica y Electrónica: La industria eléctrica y electrónica utilizan la mica casi enteramente en forma de hojas, aunque es frecuentemente sustituida por la mica reconstituida cuando el requerimiento primario es el aislamiento.

Como se dijo anteriormente, por sus excelentes propiedades y por su poder dieléctrico, la mica es el mejor relleno para aisladores eléctricos moldeados. Los aislantes eléctricos deben ser capaces de mantener las fuerzas térmicas, eléctricas y mecánicas bajo condiciones de operación variables y proteger contra la acción de elementos corrosivos. A nivel mundial, la industria eléctrica está en continuo crecimiento y es por ello que los aislantes tienen un papel vital en la protección de los equipo eléctricos, circuitos y estructuras.

La mica es un componente esencial en la producción de electrodos para soldaduras. Ésta crea una superficie aislante sobre los alambres de metal y ayuda a producir una escoria fundible y previene el agrietamiento. No hay sustitutos para la mica en esta aplicación; de hecho, la cubierta de mica es la que determina la calidad de los electrodos para soldaduras. En Venezuela, la industria que mayormente importa mica para sus productos en este campo es Arcometal de Venezuela (anteriormente AGA) y el material usado es de tamaño 250μ (malla 60).

Otros Usos: La mica también es usada, aunque en menores cantidades, en otras industrias importantes. Por ejemplo, la industria de los cosméticos utiliza mica calcinada en esmaltes para uñas, pinturas de labios, sombras para los ojos y cremas en barras, donde la mica muestra sus ventajas adhiriéndose a la piel y teniendo una alta estabilidad a la luz ultravioleta, así como también aporta efectos brillantes y perlinos. En la industria del papel se utiliza mica primariamente para efectos decorativos y añadir lustre y endurecimiento al papel grueso. La mica fina también es utilizada para barnizar las cerámicas. Asimismo es utilizada para reóstatos, teléfonos, lámparas eléctricas, hornos de petróleo, gafas de mica, en las empaquetaduras en los tubos medidores de

nivel de las calderas de alta presión, las mirillas de observación de los hornos metalúrgicos y los diafragmas de los aparatos para respirar oxígeno.

En la tabla 1, se muestra un resumen de las especificaciones granulométricas requeridas por diversas industrias para los usos antes mencionados.

Tamaño del Tamiz	Usos
2 mallas	Perforación de pozos petroleros Aportar brillo perlino Pigmentos Nieve artificial
10 mallas	Adornos de navidad y otros materiales de automóviles.
16 mallas	Relleno de bloques de concreto, ladrillos refractarios, placas de yeso, losas y tejas y fieltros asfálticos.
30 mallas	Metales, explosivo, desinfectantes y componentes de automóviles.
60 mallas	Electrodos para soldadura, cables y alambres. Trabajos de fundición, tuberías, esmaltes, masillas asfálticas, lubricantes y adhesivos.
100 mallas	Textura de pinturas, morteros acústicos, techos cielorrasos.
325 mallas	Pintura, plásticos, productos de caucho y papel.

Tabla 1. Especificaciones de Uso de la Mica.
Fuente: www.icrmica.com

2.4.1. Usos y Especificaciones de las Micas en Venezuela

Como se logró apreciar en el punto anterior, las aplicaciones de la mica en diversas industrias a nivel mundial es muy extensa. Sin embargo, en Venezuela, sólo

una parte de este gran número de industrias se dedican a la importación y utilización de este mineral en sus operaciones, sin dejar por ello de ser importante el consumo de la misma a nivel nacional. En este sentido, el presente trabajo trata de relacionar los resultados de los ensayos experimentales, con las especificaciones de uso requeridas por las industrias venezolanas dedicadas a la pintura y las perforaciones petroleras, consideradas entre las de mayor importancia del mercado.

2.4.1.1. PINTURAS

Con el objeto de determinar todos los datos técnicos en que el mineral de mica es necesitado por las industrias nacionales, se hizo necesario viajar a la Región Central del país, específicamente al Estado Carabobo, para sostener varias entrevistas personales con cuatro (4) de las principales empresas venezolanas de pinturas como lo son: a) Flamuko Pinturas; b) Couttenye & Co; c) Corimón Pinturas y d) Venezolana de Pinturas.

De la información recabada, todos coinciden que la mica debe ser muscovita pasante en un 90% de la malla 325 (ver anexo N°1) y la misma es utilizada como una importante adición para un número de pinturas especiales.

Es usada como extendedor de pigmentos, es decir, darle a la pintura esa característica de mayor poder de recubrimiento del principal pigmento que es el dióxido de titanio, reduciendo a su vez, el cuarteo de la pintura. Los productos de la pintura, tales como emulsiones, pinturas exteriores, pinturas anticorrosivas, pinturas para el

área marina, entre otros, necesitan de la mica para controlar los excesos de grasa, y para impermeabilizar o reducir la penetración y colaborar en la adhesión.

La lista de beneficios del uso de la mica en pinturas es considerable. Su estructura laminar se dispersa fácilmente dentro de las soluciones de pinturas, reforzándola mecánicamente para reducir el hundimiento y el escurrimiento de la misma, mientras provee de una capa resistente. Ayuda a mejorar las propiedades anticorrosivas, extendiendo su tiempo de efecto; asimismo, protege contra el deterioro por la luz solar, aporta un brillo atractivo a la superficie y su alta resistencia térmica la ha hecho adecuada para su uso en pinturas resistentes a altas temperaturas.

En pinturas aluminizadas, la mica triturada en seco es usada como un sustituto del aluminio por encima de un 25%, de manera que los costos disminuyan. Por una razón similar, la mica es incluida en pinturas para tráfico y texturizadas, mejorando a su vez, la resistencia a la abrasión de las mismas. Asimismo, se utiliza en imprimaciones para disminuir la tendencia a formar ampollas en medios húmedos y como un potencial sustituto del asbesto en recubrimientos para terrazas.

Por lo tanto, el creciente empleo de la mica en las pinturas no se debe simplemente a sus propiedades como lubricante y extendedor, sino también a que las escamas transparentes de mica ligan entre sí las películas de pintura, mejoran su adherencia y evitan que se agrieten. Al adaptarse en las capas de pintura como las escamas al cuerpo de los peces, crean superficies resistentes al desgaste, a la acción de la atmósfera, a la penetración de agua, oxígeno y electrolitos.

Otras de las características utilizadas por estas industrias venezolanas como requisito para adquirir esta materia prima, son las siguientes:

- **Apariencia:** Polvo ligeramente amarillo.
- **Absorción de Aceite (%):** 29-45
- **Retención de malla:** Máximo 15.5% en la malla 325 y 0.2% en la malla 100.
- **Humedad:** 1%
- **Análisis químico:**

SiO ₂	49%
Al ₂ O ₃	29%
CaO	1%
Fe ₂ O ₃	5%
K ₂ O	10%
Na ₂ O	1%

- **Características Físicas:**

Densidad Específica	2.80 – 2.85 gr/cm ³
Material soluble en agua	Máx 0.5%
PH	8 - 9
Dureza	2.5 Mohs

Desde un punto de vista químico, los minerales micáceos del grupo de la mica son los de preferencia como materia prima para la elaboración de sus pinturas; sin embargo, para la elaboración de las de color para exteriores, también puede ser empleado otro tipo de mineral micáceo, que mezclado con el óxido de titanio, le aporte opacidad a la pintura y capacidad de absorber el aceite. La composición química es de importancia secundaria.

Tal es el caso de la clorita, que puede emplearse para exteriores o directamente como color mineral natural, en conjunto con limonitas y hematitas, para formar el tipo de pinturas especiales para el pintado de aceros, hierro, graneros y vagones de carga, puesto que están constituidas por minerales cuyos colores no se pierden. Así, los distintos colores y la intensidad de los mismos dependen de las proporciones en que figuren los constituyentes esenciales. Los verdes, tales como la tierra verde, el ocre verde, el verde celadón y veronés, son colores de matiz bajo derivados de silicatos ferromagnésicos como las rocas ricas en cloritas.

2.4.1.2. PETRÓLEO

En relación con el área del petróleo, a pesar de la problemática para encontrar la información, se logró contactar con el Laboratorio de Fluidos de Perforación de la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería, quienes suministraron muestras de la mica que es utilizada en la industria petrolera (ver anexo N°1) y que, a su vez, es enviada por “MI Drilling and Fluids de Venezuela” desde Anzoátegui.

Por comunicación personal con las empresas Baroid de Venezuela, S.A.; B.J. Services de Venezuela, C.A.; Mudco, S.A.; Baker Hughes Inteq y Pérez Compans, S.A. respectivamente, se obtuvo el conocimiento de que la mica es mezclada con el lodo de perforación a base de agua o de aceite para prevenir la pérdida de circulación y separar las rocas sueltas de las formaciones en las operaciones de perforación de pozos petroleros.

La mica, mezclada con aditivos del lodo, actúa como un sellador de secciones porosas en el barreno de perforación debido a su estructura laminar. Asimismo, ayuda a mantener los otros sólidos del lodo en suspensión. Se utilizan diferentes distribuciones de tamaños de partículas para prevenir tipos específicos de pérdidas de circulación que son asociados con particulares formaciones de rocas.

Para comprender mejor el proceso, se hace necesario definir ciertos conceptos. Como es sabido, “el fluido de perforación (lodo) es una mezcla de agua, barro, material para darle peso a la mezcla y unos cuantos agentes químicos. Algunas veces se utiliza aceite en vez de agua o se le añade un poco de aceite al agua para darle ciertas propiedades deseables.

El lodo de perforación tiene varias funciones importantes; se utiliza para arrastrar los desperdicios hasta la superficie para desecharlos y mantener la presión de las formaciones bajo control, ya que un hoyo lleno de lodo ejerce presión sobre las formaciones que forman sus paredes y por lo tanto iguala la presión de las formaciones. Mientras más pesado el lodo, más presión ejerce. Es por esto que se usan materiales para darle peso al lodo. Entre estos materiales, la baritina es el más usado para añadirle peso al lodo hasta que se iguale las presiones del hoyo. El barro se le añade al lodo para mantener los desperdicios en suspensión mientras van saliendo del hoyo. El lodo también sirve para cubrir las paredes del hoyo para que no se derrumben.

Por otra parte, el equipo del sistema de circulación consiste de un gran número de piezas (Figura 5). La *bomba de lodo* recoge lodo de los tanques y lo envía a través de una línea de descarga hasta un tubo. Este tubo va conectado verticalmente a un

extremo del mástil o torre. El lodo sube por este tubo y pasa a una manguera flexible, pero sumamente fuerte. Hecha de goma reforzada esta manguera se conoce como la *manguera del cuadrante, manguera de lodo o manguera de inyección*. La manguera de lodo está conectada a la cabeza de inyección. El lodo entra a la cabeza de inyección, baja por el cuadrante, llega a la tubería de perforación y los portamechas y sale por la barrena. Cuando llega al fondo del hoyo, vira y sube hacia la superficie por el *espacio anular*. Este espacio anular no es más que el espacio que queda entre el hoyo y la sarta de perforación.

Finalmente, el lodo sale a la superficie a través de la *línea de descarga* y cae sobre un cedazo vibratorio llamado el *tamiz separador* o *vibratorio* o la *zaranda separadora* o *vibratoria*.

En operaciones en tierra, esta zaranda deposita los ripios en una de las fosas de reserva que fue cavada mientras se preparaba el lugar para la perforación. En plataformas marinas, la zaranda también separa los desperdicios del lodo, pero los vierte en un lanchón que los transportará a tierra para desecharlos. En cualquier caso, el lodo vuelve a los tanques de lodo y repite el ciclo de circulación.

El sistema de circulación esencialmente es un sistema cerrado. El mismo lodo circula una y otra vez durante la perforación. De hecho, de vez en cuando se le añade agua, barro u otros agentes químicos para reemplazar lodo perdido o para ajustar las cualidades del lodo a las necesidades de la formación que está siendo perforada.” (BAKER, R. 1979).

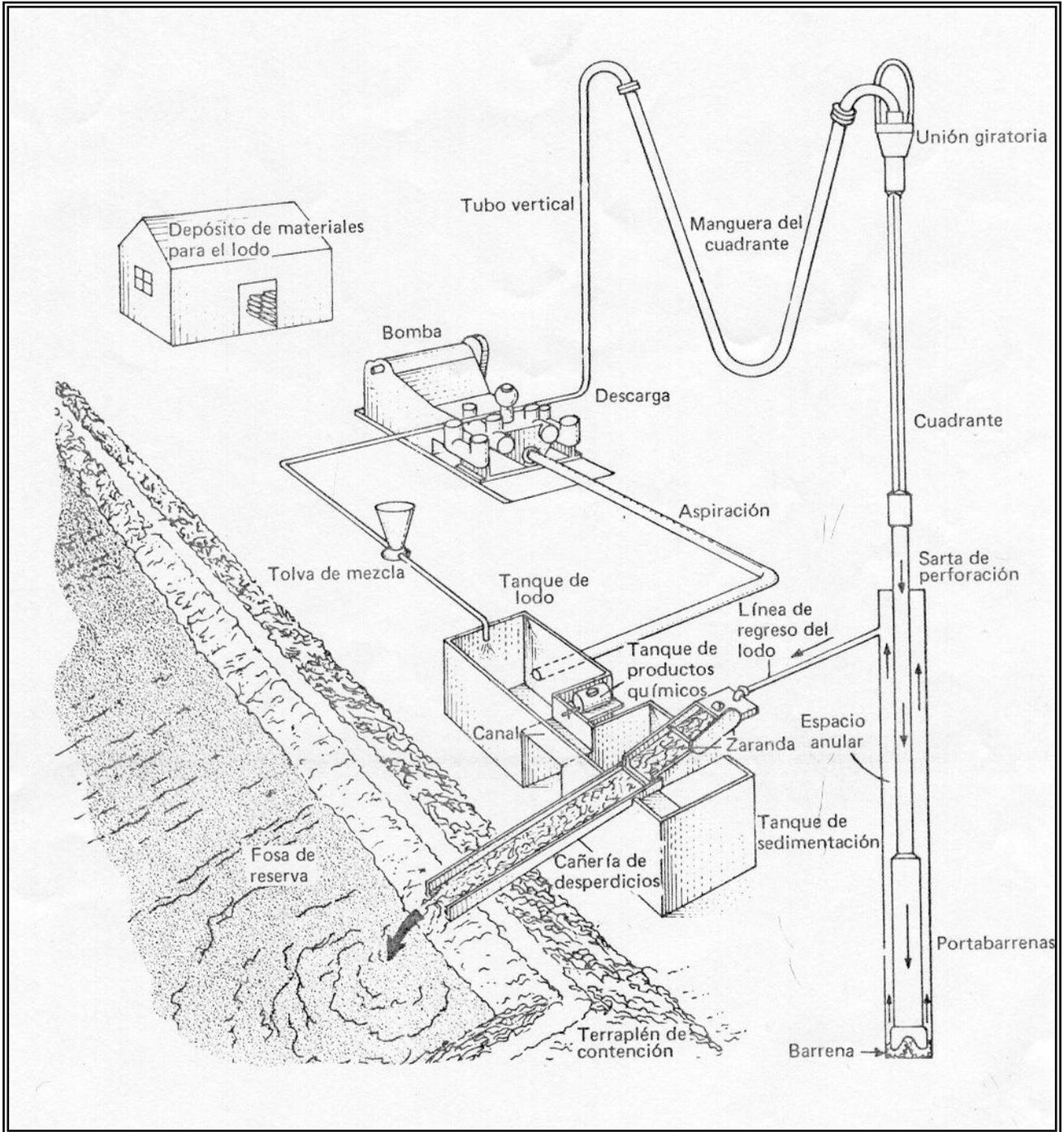


Fig. 5. Relación entre los Componentes del Sistema de Circulación de Lodos de Perforación.
Fuente: Baker, R. (1979)

Es en este momento, cuando es añadida la mica al lodo a través de la tolva de mezcla mostrada en la figura 5, ya que los tanques poseen sensores que indican las disminuciones violentas de volumen en los mismos, señalando con ello la pérdida de fluido por las grietas de las formaciones rocosas dentro del barreno. Estas grietas, fracturas o fisuras, son debidas principalmente a la acción de una mayor presión hidrostática en la columna de lodo que la permisible por las capas de roca, debilitándose estas últimas en diversos puntos.

De acuerdo al tipo de fisura, es decir, las dimensiones de separación, puede utilizarse mica gruesa, intermedia o fina. Según el boletín de productos de la compañía Baker Hughes Inteq, empresa dedicada al servicio técnico en fluidos de perforación para Venezuela, se dispone de dos tipos de su producto llamado Milmica®; Fine – grade MILMICA o mica fina y Coarse – ground MILMICA o mica gruesa, las cuales son efectivas para soportar severas pérdidas de circulación en porosidades o formaciones fracturadas.

En cuanto a las especificaciones químicas, puede indicarse que son similares a las que se requieren para la industria de la pintura mencionadas anteriormente y la granulometría empleada puede considerarse de dos tipos; para mica gruesa el tamaño de partícula debe estar comprendido entre las mallas 6 y 100 (-6 +100), mientras que para mica fina, el tamaño de partículas debe estar comprendido entre las mallas 20 y 100 (-20 +100). La mica debe ser del tipo muscovita preferiblemente; sin embargo, esta característica suele ser empleada por tradición, pudiéndose emplear otros tipos de mica con iguales efectos satisfactorios; entre ellas, la clorita, ya que lo que se aprovecha en esta oportunidad es la propiedad física que poseen estos minerales.

2.5. Tipos de Depósitos

La mica está extensamente distribuida. La muscovita y la biotita son componentes esenciales de los granitos y otras rocas ígneas cristalinas y generalmente se encuentran como minerales secundarios en rocas metamórficas. En muchas rocas comunes, la mica se presenta en forma de laminillas que hacen pequeño porcentaje de la masa total; sin embargo, algunos esquistos que se utilizan como fuente comercial para producir la mica finamente pulverizada contienen 20% de mica o, a veces, porcentajes más elevados.

Las principales fuentes de mica son las pegmatitas graníticas (ácidas), únicas que proporcionan cristales de muscovita capaces de rendir hojas de más de 25 mm de longitud y anchura. La flogopita se presenta en las pegmatitas básicas o en las rocas calizas subyacentes a las ígneas básicas. La clorita es un mineral común y corriente, generalmente de origen secundario, producto de la alteración de los silicatos que contienen aluminio, hierro ferroso y magnesio; y se presentan en su mayoría, en los esquistos. (DANA, 1956).

En cuanto a las micas de desecho, su fuente principal provenía de las operaciones de tratamiento de la mica en hojas en épocas pasadas. Más tarde, como la demanda por este tipo de mica se incrementó, fueron desarrollados métodos para extraer micas de desecho y en hojuelas de los cuerpos mineralizados de pegmatitas y alaskitas, donde éstas son encontradas en abundancia. Asimismo, se encontró que los depósitos de esquistos micáceos eran también una excelente fuente, con mayor porcentaje de mica. (Industrial Minerals and Rocks, 1994).

2.5.1. Depósitos de Mica en Venezuela

Aún cuando Venezuela contiene numerosas formaciones metamórficas presentando mica como mineral esencial tanto en la Cordillera de la Costa como en el Sistema Andino y el Escudo Precámbrico, sólo las Formaciones Sierra Nevada en Mérida septentrional y Las Brisas en Carabobo Occidental, presentan secuencias de micacitas en las cuales la muscovita constituye más del 80% en volumen.

En el área de Piedras Blancas, las micacitas de la Formación Sierra Nevada contienen en muchas zonas más de 95% de muscovita conformando la principal mena de este mineral en nuestro país. Desafortunadamente, la ubicación de la zona económica en el Parque Nacional Páramo de La Culata hace imposible cualquier extracción comercial de minerales en la región. De hecho, las explotaciones experimentales de mica ejecutadas en esa zona desde 1990 han quedado totalmente paralizadas.

En la Región central, investigaciones realizadas por la Corporación de Desarrollo de la Región Central, CORPOCENTRO, en la región de Montalbán, Carabobo Occidental y recientemente en la región de San Joaquín, también en Carabobo, han puesto de manifiesto la presencia de niveles de micacita con alto porcentaje de muscovita; y de acuerdo a parámetros estratigráficos, litológicos y estructurales, puede ser explotada por métodos convencionales a cielo abierto. (RODRÍGUEZ, S. en 1^{ER} CONGRESO DE CORPOCENTRO, 1991).

2.6. Países Productores de Mica

Existen cuatro países a nivel mundial que dominan la producción de mica, produciendo más del 50% del total de la mica que se comercializa. Estos líderes son seguidos además por ocho países con una producción ubicada entre 1.000 y 20.000 toneladas anuales. Aunado a éstos, existe un gran número de pequeños productores con una producción a escala local, la cual no comercializan internacionalmente.

En estos cuatro principales países hay una clara separación, entre los que producen mica en hojas y los que producen mica de desecho, considerándose a los primeros como los más importantes a nivel mundial por la calidad de la mica. En este sentido, la India y Rusia son los mayores productores de mica en hojas, mientras que USA y China dominan la producción de mica de desecho y en hojuelas.

No existe una evaluación formal de los recursos minerales de mica en el mundo, debido a la esporádica ocurrencia del mineral y del hecho de que es frecuentemente extraído como un subproducto de feldspatos o espodumena. Sin embargo, en términos de los futuros niveles de suministro, no pareciera existir ningún tipo de déficit de mica de desecho o de mica en hojuelas, ya que la tecnología está permitiendo disminuir la dependencia total de los depósitos exclusivos de mica en hojas. En la tabla 2 se muestra un cuadro resumen de los productores de mica a nivel mundial.

País	Compañía	Localización	Producción (tpa)		Productos
			1995	1996	
Suráfrica	Micronised Products Northern province	Pegmin, Mica	500	600-1000	Hojuelas de Muscovita
	Gelletich Mining Industries	Phalaborwa, Northern Province	1500	1500	Mica triturada en húmedo; 60,180,325,3x
Madagascar	SMGI	Ampandrandava, Fort-Dauphin	1200		Flogopita de desecho
Zimbabwe	G&W Industrial Minerals	Mwami mica fields	1500	1500	Bloques de muscovita, desechos y triturada en seco
Australia	Minerals Corporation Ltd.	Triple Chance, Broken Hill Oberon, Lithgow	Capacidad 2000 (1997) Capacidad 2000 (1998)		Triturada en seco Mica ultrafina
India	Mica Manufacturing Co. Pvt. Ltd.	Bihar	15000	20000	Hojas, micanita, en polvo y de desecho
	OTC International	Koderma & Giridih Districts, Bihar	Producción mena cruda = 4600		Hojuelas de muscovita y de desecho; gruesa y fina
	Indian Barytes and Chemicals Ltd.	Gudur, Nellere District Andhra Pradesh	1500	2000	Hojuelas de muscovita y de desecho; gruesa y fina
	CVC Mining Co.	Nellore, Andhra Pradesh	1320	1320	Hojas de muscovita, desecho, hojuelas y triturada en húmedo
Rusia	Soyuzmineral-Vostokslыda	Irkutsk	12624	(1994)	Desecho, hojuelas, micanita, triturada
	Stroyaterialы Rossil	Kireevsk, tula	20420	(1994)	
	Tekhsteko-Karelslyda	Chupa, Karelia	1481	(1994)	
	Story. Rossil	Yakutsk	1810	(1994)	
	Aldanslyuda	Kovdor, Murmansk	1222	(1994)	
	Soyuz.-Kovdorslyuda SC Phlogopit	Kovdor, Murmansk	3-4000		flogopita
Francia	Groupe Mineral Harwanne	Etangs/Arroux Ploemur	2500	2500+	Muscovita triturada en seco y en húmedo
	SDFM		9500	9500+	
	KM		6000		
	KF	Ploemur	10000	10000	Muscovita triturada y micronizada
	CMMP				Mica micronizada 800µ
España	Kaolins d' Arvour	Ploemur	5000	5000	
	Caolines de Vimianzo A Coruña	Vimianzo	2200	2300	Muscovita de subproducto, "Micavi"
	Exploitaciones Cerámicas Españolas SA	Burela, Lugo	7000	7000	Subproducto de la extracción de kaolín
Rep. Checa	Garmica Spol sro	Medenec	150	4000	15 tipos de productos de muscovita
Serbia	Bujanovac		420	980	Muscovita concentrada por flotación
Finlandia	Kemira Chemicals Oy	Siilinjärvi, Kuopio	Capacidad 10000		Flogopita triturada en húmedo
USA	Paper Corporation	Custer, S. Dakota	20000	20000	Tritur. en seco; 6-325 mallas
	Franklin Industrial Minerals	Kings Mountain, North Carolina	26400	25800	
	Spartan Minerals Corp.	Verlade, New Mexico	13000	15500	Hojue., trit. Húm., trit. seco y micronizada
	Feldspar Corp.	Cherryville, NC	12000	12000	Trit. seco; 40-325 mallas
		Spruce Pine, NC	20000	22000	Concentrados de mica trit. seco y por clasif. Neum. Muscovita trit. En húm.
Canadá	Suzorite Mica Products	Suzor, Québec	25000	26000	Flogita; 20-325 mallas
China	Hebei Lingshou Mining & Building Materials	Hebei	Capacidad 20000		Triturada

Tabla 2. Países Productores de Mica.
Fuente: Industrial Mineral, 1997

2.6.1. Importación de Mica en Venezuela

La minería se reviste de una gran importancia como suministro de insumos tanto para la industria como de otras actividades demandantes. A nivel regional, esta actividad puede constituirse, a corto, mediano y largo plazo, en un factor dinamizador de la economía de cada uno de los Estados que la conforman. Su desarrollo se plantea como una necesidad, en virtud a la alta vulnerabilidad de las explotaciones petroleras y debido a la variación de los precios, la utilización irracional de la energía, así como a la sustitución de importaciones de rubros mineralógicos de importancia estratégica para el país.

En la actualidad, Venezuela es un importador neto de volúmenes pequeños, pero de muy alto valor, de muchos minerales, entre los que se cuenta la mica, y que se constituyen en materias primas básicas para amplios sectores de la industria, tal como puede observarse en la figura 6. Estos pequeños volúmenes podrían perfectamente ser extraídos de estos depósitos que, conteniendo bajas reservas, pueden ser puestos en producción en forma rápida y a muy pequeña escala, sin afectar el entorno ambiental y conformando áreas económicas locales de gran importancia en la Región Central del país.

La mayor parte de la mica consumida por las principales industrias de la Región Central del país, proviene de la importación de países productores tales como Estados Unidos, Alemania, Francia y Reino Unido particularmente. Además de éstos, existen otros productores con los que se comercializa en menor escala como Bélgica –

Luxemburgo, Italia, Suecia, Suiza, Colombia, Grecia, Brasil, Guatemala, México, Holanda, Dinamarca, Países Bajos, Panamá, Perú, Japón, Canadá, España y Noruega.

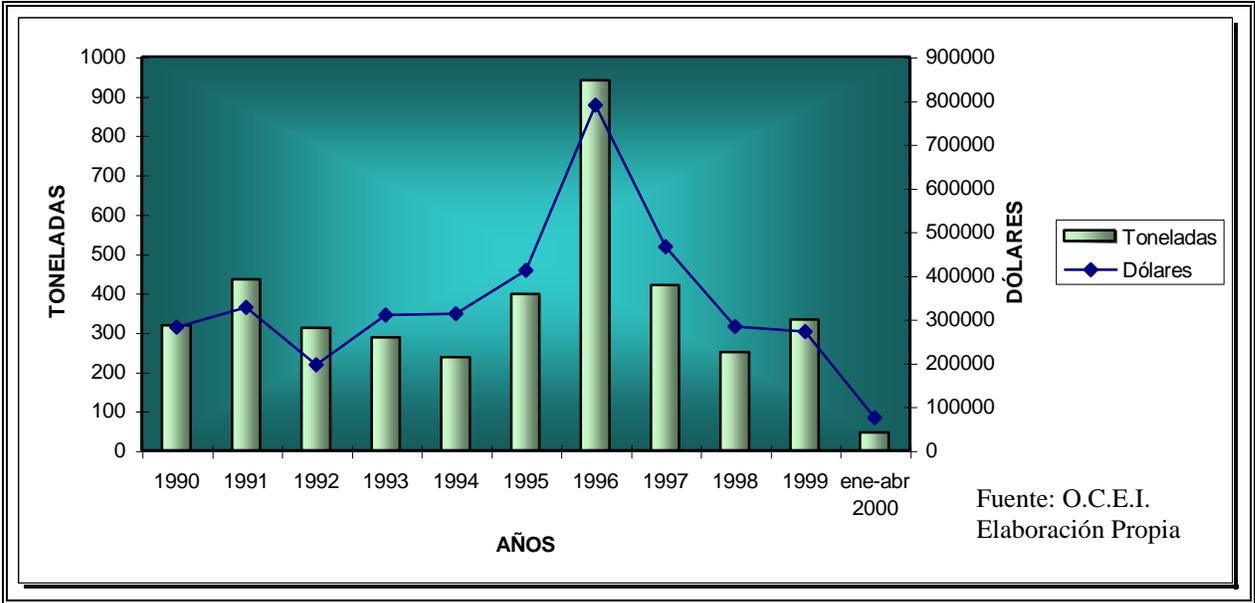


Fig. 6. Cifras de Importación de Mica.

Como se muestra en la figura 6, el precio de la mica fue incrementándose desde el año 1992, con una tendencia al decrecimiento desde el año 1996, probablemente debido a la recesión económica iniciada a mediados de este año y que luego se acentuó en 1999, año en que retrocedieron prácticamente todos los componentes de la demanda global, las dificultades de financiamiento, entre otros factores, que contribuyeron a que las inversiones tuvieran un comportamiento recesivo, que afectó todos los sectores productivos. En razón a que entre las industrias importantes consumidoras de mica se encuentra la de la pintura, su desempeño está cercanamente ligado a la industria de la construcción; y por lo tanto, una disminución de esta última, provocaría una reducción en la industria de la pintura y en el consumo de mica.

Sin embargo, se puede notar que el promedio anual de volumen total importado para la última década, fue de 400 toneladas aproximadamente, mientras que el precio promedio por tonelada de producto se encuentra en 1.021 \$/ton anuales, lo que indica una importante salida de divisas para Venezuela.

En cuanto a las cifras de importación por parte de las diferentes empresas consultadas, no se logró obtener mayor información al respecto, por considerarse confidencial. Sin embargo, la empresa Venezolana de Pinturas indicó su consumo en 3 toneladas al mes, al costo de 480 \$/ton. Por su parte, Baker Hughes Inteq, señaló un consumo de 100 toneladas anuales y Pérez Companc suministró la información del costo del saco de 50 lb. de mica en 19,61\$; lo que arroja un resultado de 864,94 \$/ton, (siendo 50 lb. equivalente a 0,0226 ton).

Aparte de las empresas de pinturas y petróleo importadoras antes mencionadas, se pueden señalar otras, cuyo consumo de materia prima micácea también hace que se les incluya en las estadísticas de importación, tales empresas son:

- Avon Cosmetics de Venezuela C.A.
- Industrias Anauco S.A.
- Macosarto S.A.
- Procter & Gamble Venezuela
- Dupont de Venezuela C.A.
- C. A. Good Year de Venezuela
- Marsan S.A.
- C. A. Firestone Venezolana
- Revlon Overseas Corporation C.A.
- Beecham Venezuela S.A.

- Industrias Químicas Petroleras
- Devcon de Venezuela C.A.
- Cosméticos Selectos C.A.
- J. M. Huber de Venezuela S.A.
- Elca Cosméticos S.A.
- AGA Venezolanas C.A.
- Manufacturas Múltiples
- Mimusa C.A.

En este sentido, de acuerdo a la descripción del producto de mica que necesite cada empresa, el precio F.O.B. del mismo tomará distintos valores, no tan dispersos uno de otro. La descripción del producto a la que se hace referencia incluye, si la mica es exfoliada en hojas o en laminillas irregulares, mica en polvo, desperdicios de mica, mica en bruto, entre otros. Así, la mica en bruto y la exfoliada en hojas o en laminillas irregulares tenía un precio para el año 1997 alrededor de 754,20 \$/ton; la mica en polvo de 1.262,52 \$/ton y los desperdicios de mica para el año 1996, de 767,40 \$/ton.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PREPARACIÓN DE MINERALES

3.1. Preparación de los Minerales

Los minerales al ser extraídos de sus yacimientos, excepcionalmente constituyen verdaderas menas en condiciones de riqueza y pureza convenientes para ser sometidos al tratamiento industrial que ha de beneficiarlos. En la mayoría de los casos tienen que ser sometidos a operaciones preparatorias para transformarlos en menas y hacer posible su beneficio. El conjunto de dichas operaciones constituye la preparación de los minerales.

Según Peláez (1980), el fin de la preparación de los minerales es hacer más económico el beneficio ulterior de éstos, convirtiendo el mineral, tal como sale de la mina, en otro más comercial desde el punto de vista de su riqueza, del tamaño, o de ambos.

Cualquier proceso de preparación de minerales puede considerarse formado por tres operaciones básicas, a saber:

Operaciones de reducción de tamaño (conminución), aplicables exclusivamente a mixtos para obtener trozos aislados formados sólo de mena, de ganga y de ambos, o mixtos si la trituración no es suficientemente pequeña.

Operaciones de clasificación, para separar los trozos, agrupándolos en categorías de tamaños semejantes, con el objeto de aplicar a cada una el modo de concentración conveniente, por separación manual o mecánica de sustancias distintas.

Operaciones de concentración o enriquecimiento, para separar dichos trozos según su naturaleza y obtener así, productos útiles o ricos, estériles o mixtos, llegando en definitiva, por el tratamiento sucesivo de estos últimos, a obtener la mayor cantidad posible de los primeros. Estos mixtos pueden provenir de trituración insuficiente, de concentración escasa, o de separación defectuosa de productos en la concentración.

Cuando el material se deriva de una mina de roca dura, es necesario reducir el tamaño, aun cuando el producto tenga sólo una especificación de tamaño que satisfacer, como por ejemplo, una cantera que produce agregados. Cuando se ha dado una especificación de composición, generalmente es necesario hacer una mayor reducción de tamaño, para liberar los minerales entres sí, de tal manera que se pueda llevar a cabo la separación o concentración. Sin embargo, ya sea que se trate de una especificación de tamaño o de composición, se efectúan separaciones de tamaño en etapas intermedias del procesamiento. La razón principal de esto es que, cualquier dispositivo de reducción de tamaño o de concentración, trabaja en forma óptima en una gama muy reducida de tamaños de partículas.

En todas las fases de la preparación en que se separen minerales distintos, se obtienen siempre tres clases de productos: dos definitivos, descartados de ulterior tratamiento, y uno intermedio que sigue en tratamiento hasta dar productos definitivos. Así, se logra diferenciar entre el *mineral útil, concentrado o mena*, el cual no requiere ya

más preparación para ser utilizado por las industrias que lo necesiten; el mineral estéril o ganga que aunque contiene materia útil, no es suficiente para continuar sometiéndolo a la preparación con ventaja económica; y los mixtos, los cuales están formados por los trozos en que, la parte útil, está tan diseminada en la ganga que no puede separarse sin someterlos a una reducción de tamaño, hasta donde sea posible y conveniente económicamente.

Una característica vital de las separaciones en el procesamiento de los minerales es que nunca son perfectas (KELLY, E., 1990); una parte del producto valioso va siempre en la corriente de desecho, y una parte del desecho (o minerales de ganga) va siempre en la corriente de producto de valor. Es por ello que se hace necesario considerar los parámetros de *recuperación y grado de concentración*, las cuales miden, respectivamente, la eficacia con la que el separador ha extraído los valores contenidos en la corriente de alimentación, y la reducción de volumen que experimenta el mineral extraído de la mina con la consiguiente disminución en los gastos de transporte.

3.2. Operaciones de Reducción de Tamaño (Conminución)

Debido a que las menas se encuentran finamente diseminados e íntimamente asociados con la ganga, ellas deben ser inicialmente liberadas antes de llevarse a cabo la separación. La terminología de esta técnica se designa con el término general de *conminución*, en el cual, el tamaño de partícula de una mena, es reducida progresivamente hasta un grado en que pueda separarse en fracciones valiosas y carentes de valor (útil y ganga). (WILLS, 1997)

Como es sabido los explosivos son usados en minería para remover las menas de sus estratos naturales y por lo tanto, la voladura puede ser considerada como el primer paso en la conminución.

La conminución en la planta de procesamiento mineral, se lleva a cabo, a través de una serie de procesos de **trituration y molienda**. De modo general e indefinido, la trituration consiste en una reducción de tamaños gruesos, mientras que la molienda lo hace con los finos; pero, sobre esta base, no se puede establecer una línea de separación entre ambos procesos. En general, el proceso de conminución puede usarse para producir partículas del tamaño y la forma requeridas; para liberar minerales valiosos de la ganga para que puedan concentrarse; o para incrementar el área de superficie disponible para exhibirse a la reacción química.

La conminución en las plantas de procesamiento mineral, agrupa tres pasos esenciales:

Quebrantado o Trituration Primaria: Esta es la primera etapa designada para separar o remover los componentes valiosos, liberados, de fácil recuperación en forma de un concentrado primario. Los aparatos de este grupo se alimentan con el mineral que se envía desde la mina, y por este motivo, las máquinas deben ser capaces de admitir el trozo más grande que provenga de la zafra. Las operaciones de quebrantado concluyen cuando el todouno, que se admitió de la mina, se ha reducido hasta un tamaño máximo comprendido entre 60 mm y 30 mm, lo que puede conseguirse, según las circunstancias, con una sola máquina o con varias en serie.

Trituración Secundaria: Las colas de la trituración primaria pasan luego a la trituración secundaria, en la cual lo relevante es la recuperación. El objetivo es extraer todos los minerales de valor restantes, cuya recuperación sea económicamente justificable. Se dice entonces, que las colas de la trituración secundaria no tienen valor con respecto a ese mineral valioso; pueden, sin embargo, contener un segundo mineral valioso apto para recuperarse en otro separador. El concentrado secundario se recicla, en principio, para recuperar los valores. En esencia, está formado por partículas intermedias o no liberadas, y a menos que se le someta a una reducción ulterior de tamaño, se le obliga eventualmente a salir con las colas finales o con el concentrado final. En el primer caso, la recuperación general es baja, y en el segundo, la ley general es baja. Los géneros quebrantados se reducen a tamaños superiores a 1 mm (granzas, granallas y arenas).

Pulverización o Molienda: Esta operación persigue, bien sea desprender el mineral útil de la ganga al tamaño más grueso posible; obtener un tamaño apropiado para el procedimiento de concentración adoptado; o conseguir un producto de condiciones comerciales.

Todas las menas tienen una malla económicamente óptima de molienda, la cual dependerá de muchos factores, incluyendo la extensión de la dispersión de los minerales de valor en la ganga, y los subsecuentes procesos de concentración a ser empleados. Con la molienda se puede controlar el tamaño del producto que se necesita y, por esta razón, se dice que una molienda correcta es la clave para un buen procesamiento de los minerales.

Según FUEYO, L. (1999), en función del tipo de material y del método empleado, se puede clasificar la molienda en siete tipos diferentes:

a. Molienda simple: Es la que convierte la totalidad del material, en elementos inferiores a una dimensión determinada sin tener en cuenta ninguna consideración de granulometría interna del producto.

b. Molienda forzada: Es aquella cuyo producto molido debe contener una cantidad de finos superior al límite determinado; es decir, el producto molido debe presentar la máxima superficie posible, por ejemplo, los pigmentos, pinturas, etc.

c. Molienda condicionada: Es aquella cuyo producto molido debe tener la menor cantidad posible de supertriturados, bien sea perjudicial o innecesario.

d. Molienda diferencial o selectiva: Es la que se aplica a productos estructuralmente heterogéneos y que permite aumentar la reducción de los componentes frágiles frente a los duros.

e. Molienda formal: Es aquella según la cual, la forma de los fragmentos obtenidos influye en el valor del producto. La forma buscada puede ser de granos pequeños cúbicos, con muy poca cubicidad, planos, de escamas, entre otros.

f. Molienda autógena: Es la que hace reducciones volumétricas, en las cuales los elementos a moler se fragmentan por percusión y fricciones recíprocas. Este tipo de molienda se caracteriza por la no contaminación del producto molido debido al metal que proviene del desgaste de los elementos moledores.

g. Molienda semiautógena: Es la que utiliza una pequeña cantidad de bolas grandes de acero para quebrar ciertos tamaños intermedios de partículas.

Los productos obtenidos pueden llegar hasta el polvo impalpable dentro de los límites económicos.

3.2.1. Equipos de Trituración y Molienda de Minerales

La trituración primaria y secundaria se hace por medio de máquinas en las que, por su construcción mecánica, se evita que las superficies que efectúan la rotura establezcan contacto; mientras que, en la molienda, dichas superficies sólo están separadas por el género que se está moliendo.

Existen dos equipos diferentes para la trituración, dependiendo del tipo de roca a ser triturado. De manera general, las rocas abrasivas y duras, son trituradas por compresión entre superficies resistentes; y los materiales menos abrasivos y más suaves, son triturados por impacto, cizallamiento o también por mecanismos de compresión. (SCHILITT, W. en HOWARD H., 1992)

Los equipos de trituración más utilizados son los que se basan en los tipos de fuerzas que emplean. FUEYO, L. (1999), señala que estas fuerzas son: la compresión, la abrasión o atrición, el impacto y el cizallamiento, lo que permite clasificar los aparatos en aquellos que actúan por compresión, por impacto y por abrasión. Estos últimos son más bien utilizados en las etapas de molienda con los molinos de bolas, barras, autógenos y semiautógenos, mientras que los dos primeros son los habitualmente usados en machaqueo.

De cualquier forma, para llevar a cabo el proceso de trituración, generalmente se emplean etapas sucesivas de trituración primaria, secundaria, terciaria y, a veces, hasta cuaternaria, en función de las veces que el mineral necesite ser reducido de tamaño, relacionándose cada etapa con la maquinaria que se emplea. La molienda puede

subdividirse, todavía más, por el tipo de molino, el tipo de los medios de molienda y el hecho de que la molienda se efectúe en medio húmedo o seco. Sin embargo, no existe ninguna norma para delimitar los límites por tamaños. En una instalación determinada un molino terciario puede estar trabajando con materiales de mayor tamaño que un molino secundario de otra instalación.

Las **trituradoras primarias** son máquinas altamente resistentes, usadas para reducir la zafra proveniente de la mina a un tamaño adecuado, para su mejor transporte y posterior alimentación de las trituradoras secundarias. Los equipos que suelen utilizarse son: trituradoras de impacto; de cilindros; giratorias; y las de mandíbulas.

Las trituradoras de impacto reducen de tamaño los materiales minerales, gracias a unos martillos fijos o móviles sujetos a un rotor central. De acuerdo con KELLY, E., (1990), el tamaño de los materiales triturados depende de la friabilidad del material y de la velocidad del rotor. El principio de trituración por impacto se basa en la energía del rotor. La energía cinética es impartida de partícula a partícula del material y se utiliza para destruir la estructura interna de las propias partículas por los planos más débiles. Los cuatro tipos principales de estas trituradoras son: los molinos de martillos, los cuales se caracterizan por tener una parrilla de barras cubriendo la salida; las impactoras, caracterizadas por sus placas quebradoras y su descarga abierta; las desintegradoras de impacto, caracterizadas por tener 1, 2, 4 o 6 jaulas instaladas concéntricamente, alimentándose por el centro de la jaula interior; y las de eje vertical, donde el rotor centrifuga el material que se alimenta. Los beneficios de usar trituradoras de impactos, frente a las machacadoras o giratorias, son: menos capital invertido por tonelada de capacidad; más livianas; y mayor gradación de productos finos, entre otros.

Las trituradoras de cilindros están compuestas por un cilindro giratorio horizontal, provisto de salientes o dientes, que empujan el material a triturar contra una placa curva inclinada y fija, que forma con el cilindro, la cámara de trituración (PELÁEZ. E., 1980). La compresión es llevada a cabo por cizallamiento y compresión del mineral entre la superficie del rodillo y las placas de rotura. Al girar el cilindro, los picos enganchan a la roca y la van fracturando contra la placa hasta que el material pasa entre la separación cilindro – placa. El ángulo de admisión de la alimentación entre el cilindro y la mandíbula cóncava es más favorable que el obtenido en los molinos de dos cilindros; por lo tanto, esta trituradora puede, en las mismas condiciones de peso y volumen, absorber bloques de mayor tamaño. Es adecuada para materiales blandos, deleznales y no abrasivos, así como materiales mojados o pegajosos.

Un triturador giratorio está formado por un cono montado en un eje vertical dentro de una carcasa rígida. Dicho eje mantiene la parte superior estacionaria mientras que la parte inferior gira excéntricamente, lo cual transmite al cono un movimiento excéntrico – pendular (CALLOW, M. EN HOWARD H., 1992). Los materiales, al introducirse en el cono por la parte superior, caen por gravedad, y son comprimidos entre las paredes de la carcasa y el cono excéntrico que gira en el centro. La trituradora giratoria empleada principalmente en la trituración primaria, es la de campana (KELLY, E.,1990), la cual se caracteriza por tener sus superficies de trituración divergentes, es decir, la superficie externa o del tazón, tiene inclinación hacia adentro y hacia el fondo.

Las trituradoras de mandíbulas, en esencia, consisten de dos piezas llamadas mandíbulas, dispuestas una frente a la otra en forma de V; una de las cuales es fija, y la otra es móvil, cuyo movimiento se logra por la oscilación alrededor de un eje horizontal,

generado por medio de un sistema de biela excéntrica y de placas de articulación (WILLS, B.,1997). El material, introducido por la parte superior, es fragmentado debido al acercamiento de la mandíbula móvil, y va descendiendo en la cámara de trituración con el alejamiento de dicha mandíbula. Este retroceso permite a los fragmentos generados, descender hacia la parte más estrecha, donde se someterán a una nueva compresión al avanzar la mandíbula. Finalmente, los materiales machacados salen de las trituradoras por la abertura inferior. Estos movimientos de acercamiento – alejamiento de la mandíbula móvil, son los responsables de la trituración por compresión y del avance de los materiales por la cámara de trituración. (Figura 7).

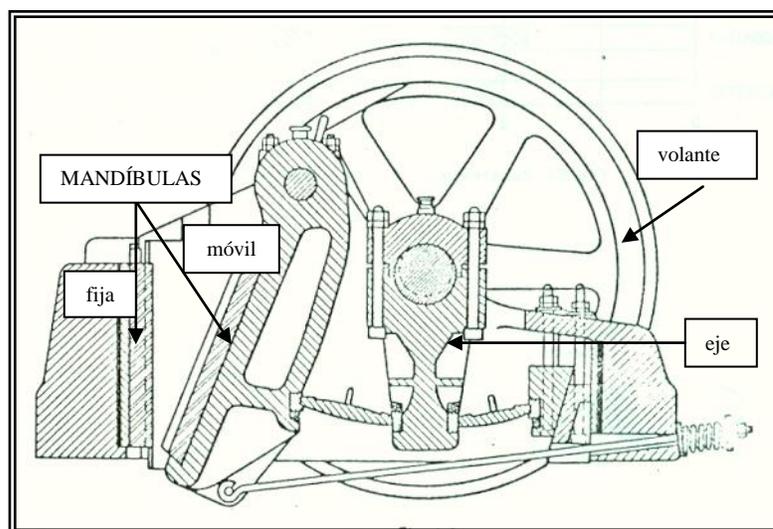


Fig. 7. Machacadora de Mandíbulas Tipo Blake.
Tomado de Peláez, E. (1980).

Dentro de los tipos de machadoras de mandíbulas, se pueden mencionar el tipo Blake, el tipo Dodge y el tipo de Biela Simple. Las del tipo Blake, se caracterizan por ser de simple efecto, al tener lugar en ellas, únicamente fenómenos de compresión. Tal como se muestra en la figura 7, están formadas por una mandíbula fija y una móvil, apoyada esta última en un balancín articulado en su parte superior. La mandíbula móvil tiene un movimiento de vaivén sobre la mandíbula fija, tanto más acusado a medida

que se desciende al extremo inferior de la mandíbula móvil. Las machacadoras tipo Blake son consideradas estándar para la trituración primaria y secundaria de rocas duras, tenaces y abrasivas, así como para materiales pegajosos.

Las machacadoras tipo Dodge, son las más simples desde el punto de vista mecánico. La mandíbula móvil es accionada por una excéntrica, unida directamente a la prolongación de esta mandíbula. El eje de oscilación se encuentra en la base de la mandíbula móvil. Por lo tanto, el recorrido es máximo a la entrada, y va disminuyendo a medida que el material desciende.

Las machacadoras de Biela Simple, se construyen con un eje y una placa solamente, pues la mandíbula móvil está suspendida del eje que es excéntrico; tienen doble efecto de compresión y fricción. La zona de la mandíbula móvil, próxima a la excéntrica, describe un círculo de radio igual a la excentricidad del eje. Según se va descendiendo en la cámara de trituración, las zonas inferiores de la mandíbula móvil, van convirtiendo esta trayectoria circular en elíptica, cuyo eje menor va disminuyendo cuanto más próximo está la boca de salida de la cámara de trituración. En función de los movimientos descritos, se aprecia que en la parte superior de la cámara, predominan los procesos de compresión, mientras que en la zona inferior, también tienen lugar los de fricción.

Las **trituradoras secundarias** son mucho más ligeras que las trituradoras primarias, y su propósito es reducir el género procedente de la trituración primaria, a un tamaño adecuado para alimentar los aparatos de molienda o para llevarse a una

concentración previa. Dentro de los aparatos utilizados se encuentran los trituradores de cono, los cilindros dentados, los molinos de martillos y los cilindros trituradores.

Los trituradores de cono se caracterizan por sus superficies convergentes de trituración, donde la superficie externa tiende a ser paralela a la superficie del cono, la cual es su principal diferencia con respecto a las trituradoras giratorias de campana. Generalmente, al disminuir el tamaño de las partículas, la superficie externa de trituración se vuelve más recta y más paralela a un cono de inclinación más fuerte. Existen varios tipos de trituradores de cono, dependiendo de cómo se encuentre el eje con el cono; éstos pueden ser suspendidos y apoyados (Cono Symons). Los trituradores de cono se destinan principalmente para ultra – finos en aplicaciones específicas cuando se exigen cantidades de arenas o finos importantes y sus granulometrías suelen estar comprendidas entre los 20 mm y los 5 mm.

Los cilindros dentados consisten de dos rodillos horizontales provistos de dientes, los cuales giran en sentido contrario. Uno de ellos se encuentra soportado por cojinetes deslizantes que se mantienen en posición con resortes. FUEYO, L. (1999), señala que los dientes pueden ser opcionales y poseer numerosas formas pasando de puntas, pirámides, dientes de tiburón, ondulaciones y estrías rectas o cruzadas, etc. Estas distintas formas se emplean dependiendo del tipo de material a triturar; del tamaño de la alimentación y de la granulometría final requerida. El uso de dichos dientes o picas tiene como finalidad la búsqueda de una fragmentación regular con una mínima producción de supertriturados. Las fuerzas que aquí actúan son la de cizallamiento y choque primeramente. Su característica más importante radica en su

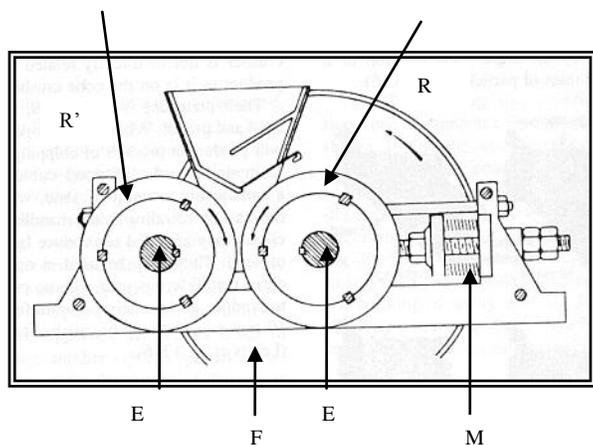
robustez, su construcción modular, su mínima producción de finos y su bajo costo de mantenimiento.

Los molinos de martillos, al igual que para la trituración primaria, pueden emplearse para la trituración secundaria, sometiendo el género a la acción de choques violentos que producen su fragmentación. Consisten en varias series de martillos o mazos, que están articulados por uno de sus extremos a un eje que gira dentro de una cámara protegida con placas de acero. El aparato se alimenta por la parte superior; y la descarga inferior, puede ser libre o estar regulada por una rejilla. Las relaciones de reducción pueden ser muy grandes; hasta 40:1, pudiendo considerarse entre 10:1 y 20:1 como normal. Su aplicación fundamental es en la trituración de rocas blandas, desde calizas a arcillas; sin embargo, a partir del 6% de cuarzo, las rocas son demasiados abrasivas para ser tratadas económicamente por percusión.

Los cilindros trituradores tienen la misma morfología que los cilindros dentados, con la salvedad de montar unos cilindros completamente lisos; siendo inclusive, la distancia entre los propios cilindros, más próxima. Los mismos se componen de dos cilindros de igual diámetro con ejes horizontales y paralelos, girando en sentido contrario. WEISS N.L.,(1985), señala que el material que se introduce entre ambos queda sometido a un esfuerzo radial de compresión y tangencial de fricción, que lo tritura y desmenuza hasta que pueda pasar por el espacio que separa los cilindros. Esta separación, que es regulable, determina la dimensión de los granos obtenidos (Fig. 8). El hecho de que sufra una compresión, e inmediatamente después sea abandonado el material mineral, es característico de los cilindros, y por ello son los aparatos trituradores que producen menos polvo.

Para evitar que el esfuerzo requerido por la trituración de un trozo de dureza anormal, o el paso de un exceso de material produzca una rotura en la máquina, uno de los cilindros se dispone de modo que pueda separarse del otro lo suficiente para permitir el paso del cuerpo duro que se resista a la trituración, volviendo automáticamente a su posición original por la acción de unos muelles o resortes.

Los cilindros trituradores son apropiados para triturar menas en seco, hasta tamaños comprendidos entre 6 y 1,65 mm (1/4" y malla 10"), respectivamente. Las ventajas más sobresalientes, son su gran capacidad, poca altura y fácil acceso para el mantenimiento por lo que se usa mucho en plantas móviles o semimóviles para la producción de piedra picada en canteras, etc.



F = armazón general de sustentación;
 EE = ejes de los cilindros;
 M = muelle cuya tensión aplica el cilindro
 corredizo al fijo;
 R = cilindro triturador corredizo
 R' = cilindro triturador fijo

Fig. 8. Cilindros Trituradores.
 Tomado de Wills, B. (1997).

Los **equipos de molienda** de minerales, son los utilizados para la última etapa en el proceso de conminución; en los mismos, las partículas son reducidas en tamaño frotando una capa fina de éstas entre superficies duras, que se desplazan

tangencialmente una con respecto a la otra bajo presiones suficientes para agrietar y cizallar las partículas. En este sentido, se han diseñado grandes tambores cilíndricos rotatorios de acero conocidos como *molinos*, cargados hasta algo menos de la mitad de su volumen con cuerpos sueltos, que son grandes y pesados con respecto a las partículas de mena, pero pequeños en comparación con el volumen del tambor (TAGGART, 1966).

Cuando el molino gira, la carga moledora se eleva a lo largo de la pared ascendente hasta alcanzar un equilibrio dinámico (Fig. 9); el conjunto adquiere un movimiento rotativo general alrededor de un núcleo central, que permanece más o menos estacionario. Los elementos (barras o bolas) situados entre la pared ascendente del molino y el núcleo citado, se desplazan en sentido ascendente, mientras que al otro lado del núcleo, el movimiento es opuesto.

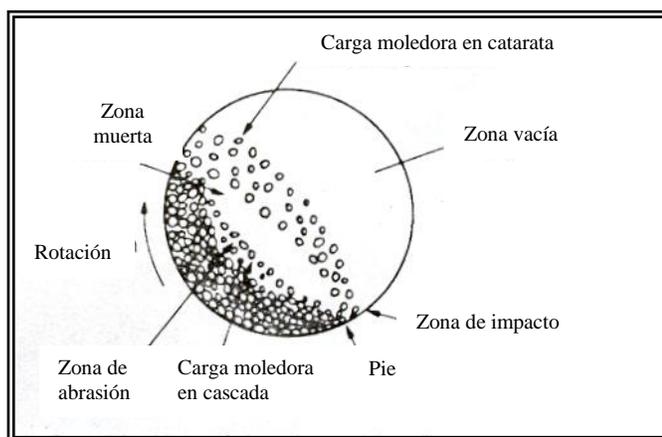


Fig. 9. Movimiento de la Carga en los Molinos.
Tomado y modificado de Wills, B. (1997).

En la ascensión, llega un momento en que las barras o bolas se separan de la pared y, dependiendo de las condiciones de marcha, caen dando sobre la propia carga

o describen una parábola en el aire. En el primer caso se dice que el molino trabaja en cascada y en el segundo, es decir, cuando hay caída libre de las barras o bolas, en catarata. (PELÁEZ, E., 1980).

En este sentido, en las máquinas empleadas para la trituración primaria y secundaria predomina la acción de la compresión; en los pulverizadores o molinos pueden tomar lugar algunos mecanismos, incluyendo impacto o compresión, debido a las fuerzas aplicadas casi normalmente a la superficie de la partícula; cizallamiento, debido a fuerzas oblicuas; y abrasión o fricción, debido a fuerzas actuantes paralelas a las superficies (Fig. 10). (WILLS, B. 1997).

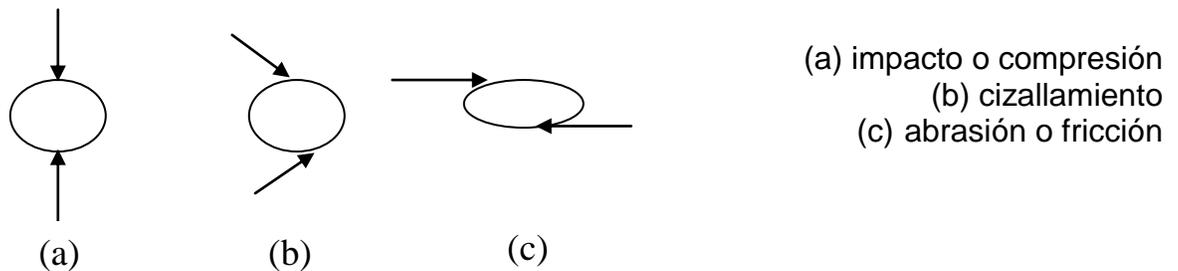


Fig. 10. Mecanismos de Fractura en la Molienda.
Tomado de Wills, B. (1997).

Los molinos pueden ser identificados por el tipo de carga moledora. Cada tipo de molino, según M.I. CALLOW EN HARTMAN H. (1997), es adaptado a ciertas aplicaciones de molienda, las cuales deben ser evaluadas para seleccionar el equipo óptimo para cada tarea. Los tipos más comunes de estos equipos son: los molinos de barras; los de bolas; los de pebbles; los autógenos y los semi – autógenos. A la vez, éstos molinos pueden subdividirse atendiendo al método de alimentación y descarga, o si operan en húmedo o en seco.

El molino de barras es un molino cilíndrico de longitud generalmente igual al doble de su diámetro, que utiliza para la trituración, barras, en vez de bolas. Con este molino no se debe tratar minerales de tamaños superiores a 25 mm, porque los trozos gruesos separarían las barras e impedirían la acción de éstas sobre los trozos pequeños; por eso da menos exceso de trituración que el molino de bolas. Asimismo, a igualdad de espacio ocupado, la carga de barras ofrece una superficie menor que la de bolas, por lo cual no da una trituración tan fina como la de este último (Fig. 11). Las barras en el interior del molino también actúan como una criba. Se retienen los materiales minerales gruesos en la zona de carga del molino y según van perdiendo tamaño, se van aproximando hacia la zona de salida. Su aplicación más importante es para la granulometría fina de materiales semiduros a duros, tanto secos como húmedos.

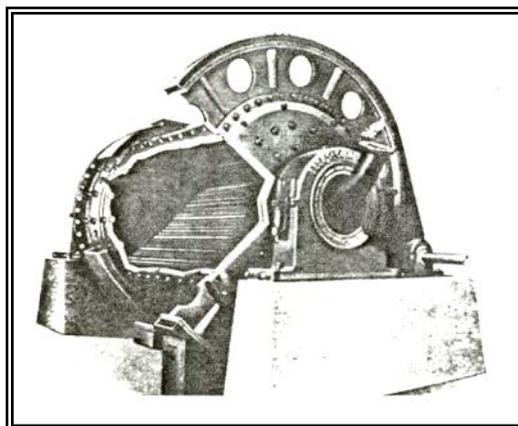


Fig. 11. Molino de Barras.
Tomado de Wills, B. (1997)

Los molinos de bolas están formados por cámaras cilíndricas o tronco – cónicas revestidas, a las que se hace girar con el fin de efectuar una molienda cuyos productos finales estén comprendidos entre los tamaños de 0 – 30 micras a 0 – 200 micras.

El material moledor está conformado por bolas de diferentes diámetros, en función de los materiales a moler. Dichos elementos moledores suelen tener forma esférica (bolas), aunque también pueden presentar formas cilíndricas, cónicas e irregulares. En función del sistema de descarga los molinos pueden definirse como: molinos de descarga por rebose; con parrillas colocadas sobre la periferia; con parrillas colocadas a lo largo de toda la extremidad opuesta a la entrada; de evacuación a lo largo del cilindro; y de evacuación por corrientes de aire. Pueden utilizarse tanto en molienda por vía seca, como por vía húmeda, y son recomendados en la fabricación de cemento y minerales no metálicos, como fosfatos, barita, cuarzo, entre otros.

Los molinos de pebbles son similares a los de bolas, pero usan una carga moledora que puede tomarse de un determinado tamaño: del propio mineral que se está tratando; o del molino primario de molienda autógena; o de material seleccionado fuera de la masa del mineral, que puede ser natural de roca, o de mineral no metálico, o fabricado artificialmente como pueden ser los de cerámica, entre otros. El peso específico de los pebbles es menor que el peso específico de las bolas; sin embargo, su tamaño es mayor, requiriendo más potencia, pero el ahorro del medio de molienda suele ser mucho mayor que el costo y la potencia extra. Los pebbles son frecuentemente utilizados para moliendas en seco y donde la contaminación por hierro va en detrimento de la calidad del producto mineral. Su campo de aplicación más importante es en la industria del vidrio, la cerámica y la industria química.

Los molinos autógenos utilizan el todo uno procedente de la mina o de la trituración primaria como carga moledora, sin adición de cualquier otro medio de molienda, fragmentándose el material mineral de diferentes tamaños, unos con otros,

dentro del molino en estado de rotación. En este sentido, la mena debe ser competente, teniendo características adecuadas de fractura para una operación plenamente autógena. Estos tipos de molinos pueden efectuar una molienda en húmedo o en seco, siendo su eficacia prácticamente la misma. El uso de los molinos autógenos se justifica por la reducción de costos de operación. Estos descensos en los costos se deben fundamentalmente al bajo consumo de acero y de energía, así como pueden reemplazar a todas las etapas de trituración y de molienda con barras.

Los molinos semi – autógenos son los equipos que se utilizan cuando el todo o parte del mineral proveniente de la mina o el mineral triturado en tamaños gruesos, no son totalmente competentes para actuar como carga moledora. En este sentido, las características adecuadas de fractura se logra adicionando bolas de acero o mineral más grueso, además del propio mineral a moler, en una cantidad del 2 – 10% del volumen total del molino. Esto con el objeto de fracturar ciertos tamaños intermedios de partículas minerales, que de lo contrario, formarían acumulaciones en el molino.

3.3. Operaciones de Clasificación

Con el objeto de separar el producto mineral proveniente de las distintas operaciones de conminución, surgen las operaciones de clasificación para controlar el tamaño de dicho material mineral que alimenta a otro equipo. Esto se debe a que todo equipo es capaz de manejar un tamaño óptimo de material en la forma más eficiente, además que los materiales procedentes de la trituración o molienda, no se ajustan a los tamaños requeridos y, por lo tanto, hay que hacer una separación por dimensiones en función de su uso final. Existen dos tipos básicos de separadores; las cribas, que

normalmente se emplean para los tamaños de partículas minerales más gruesos ($> 250 \mu\text{m}$; malla 60); y los clasificadores, para los minerales más finos; aunque el uso de uno u otro método dependerá de muchos factores en la práctica; tales como: el tipo de mena, la alimentación a la planta, etc. Las cribas se caracterizan por el uso de barreras físicas para lograr una separación dimensional; mientras que, los clasificadores, emplean equipos para la separación de partículas minerales según su rapidez de asentamiento en un fluido, logrando así una separación isodrómica.

3.3.1. Clasificación Dimensional

Este tipo de clasificación está determinado por el **cribado** y el **tamizado**, cuyos términos se aplican a la separación mecánica de partículas minerales basada en el tamaño. Estas separaciones se logran utilizando una superficie perforada uniformemente. Las partículas que son más grandes que las aberturas quedan retenidas sobre la superficie, mientras que las partículas más pequeñas pasan por la tela. El cribado y el tamizado se distinguen por el hecho de que el cribado es un proceso continuo y se usa principalmente a escala industrial, mientras que el tamizado es un proceso intermitente que se aplica casi exclusivamente para fines de pruebas.

Los equipos pueden utilizarse para el procesamiento de una amplia variedad de materiales minerales; las superficies perforadas para el tamizado pueden ser tan pequeñas como 400 mallas ($38\mu\text{m}$) hasta 125 mm, mientras que para el cribado, las superficies pueden separar minerales entre 0,250 mm y 250 mm, pudiendo llegar hasta 460 mm.

El **tamizado** se hace necesario para la verificación de las especificaciones de los productos minerales, que indiquen tamaños definidos del material en términos de un porcentaje dado que pase un cierto tamaño de abertura. Para este proceso se utiliza un tamiz de laboratorio consistente de una superficie de tamizado que es normalmente de alambre tejido. Dicha superficie de tamizado (tela) va montada en un armazón cilíndrico que permite ensamblar los tamices uno sobre otro normalmente en serie, con las aberturas sucesivamente más pequeñas de arriba hacia abajo (Figura 12).

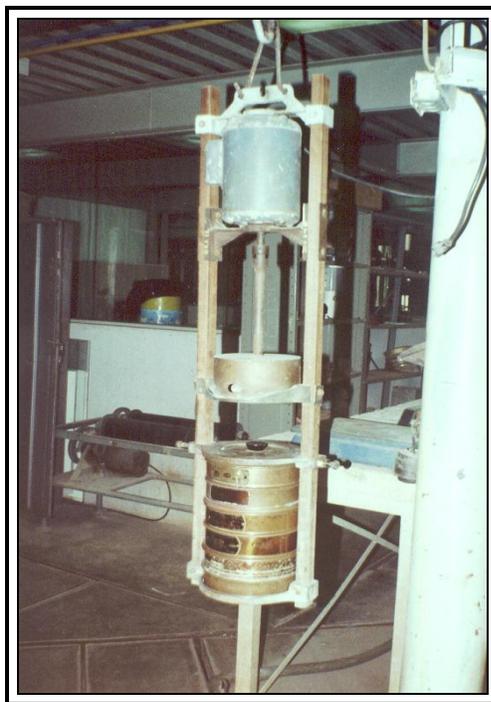


Fig.12. Equipo de Tamizado de Laboratorio
Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas. Dpto. de Minas. U.C.V.

Se emplean además una tapa en la parte superior y un recipiente en el fondo para completar la serie vertical de tamices. La muestra por analizar se vacía sobre la tela superior y se sacude mecánicamente todo el conjunto. Después de un tiempo dado, se divide la muestra en *fracciones de tamaño*, conteniendo cada fracción el material que ha pasado por los tamices superiores, pero que no ha podido pasar por la tela en la

que ha quedado. La máquina sacudidora transmite un movimiento circular consistente y un movimiento vertical de oscilación a las partículas; dichos movimientos no sólo exponen repetidamente a las partículas en las aberturas, sino que también minimizan la obstrucción de las aberturas por partículas ligeramente más grandes que éstas. (KELLY, E. 1990).

El **cribado** es una operación que comienza desde el momento en que el todouno entra en la planta de trituración y se sucede en las diversas etapas de la fragmentación y la molienda. Dicho proceso se realiza sobre cribas que presentan aberturas de dimensiones determinadas. De acuerdo con WILLS, B. (1997), existe un amplio rango de propósitos para el cribado, de los cuales, para la industria minera, se pueden mencionar: a). prevenir la entrada de partículas minerales de tamaño inferior a las máquinas de trituración, de manera de incrementar su capacidad y eficiencia; b). prevenir que el material mineral con sobre tamaño pasen a la próxima etapa en operaciones de trituración y molienda en circuito cerrado; y c). preparar un producto final de tamaño adecuado.

El equipo de cribado puede clasificarse en general como estacionario o dinámico, tal como lo señala WEISS, N. (1985), dependiendo que la superficie de cribado sea fija o móvil; estos últimos, a su vez, se subdividen en giratorios, vibratorios y de sacudidas. Dentro de las cribas estacionarias se pueden mencionar las parrillas planas inclinadas, las cuales son una superficie de barras para servicio pesado. Dentro de las cribas dinámicas resaltan las cribas vibratorias, las cuales tienen un movimiento a alta velocidad, diseñadas primordialmente para levantar las partículas de la superficie; las sacudidoras, las cuales tienen un movimiento lineal lento esencialmente en el plano de

la criba; y las cribas giratorias, en donde la superficie de la criba gira en torno al eje del cilindro.

3.3.2. Clasificación Isodrómica

La clasificación o separación isodrómica, es un método de separación de mezclas de minerales en dos o más productos, con base en la velocidad con la cual los granos caen a través de un medio fluido. En el procesamiento mineral, este medio es usualmente agua, y la clasificación en seco es generalmente aplicada a partículas minerales, las cuales son consideradas muy finas para ser separadas eficientemente por medio de cribado. Puesto que la velocidad de las partículas, en un medio fluido, es dependiente no sólo del tamaño sino también de la gravedad específica y forma de las partículas, los principios de clasificación son importantes en la separación mineral utilizando concentradores por gravedad. (WILLS, B. 1997)

Por regla general, en la preparación de minerales, la separación por gravedad tiene dos finalidades: separar minerales de la misma densidad por tamaños (clasificación); o de distintas densidades, de acuerdo con su clase (concentración por gravedad). En estas operaciones, los fluidos empleados pueden ser el aire, el agua, líquidos más densos que el agua, y suspensiones semifluidas de sólidos en fluido gaseoso o líquido y, como su nombre lo indica, se emplea la fuerza de gravedad como fuerza principal de diferenciación. (TAGGART, 1966)

3.3.2.1. Clasificación Neumática

La clasificación de las partículas en el seno de un fluido gaseoso, se realiza según los mismos principios generales utilizados en la clasificación hidráulica, con la salvedad de que las diferencias de densidad entre las materias sólidas y el fluido portador o de arrastre, aquí son mucho más grandes. (FUEYO, L. 1999)

Este tipo de clasificación se utiliza tanto en circuito abierto como en circuito cerrado o incluso en cascada. En circuito cerrado, se utiliza para regular la finura de un producto molido o para realizar una clasificación previa a la molienda de un producto fino, con el objeto de moler únicamente las partículas de tamaño superior al necesitado. En circuito abierto, se utiliza para la extracción de impurezas perjudiciales bajo formas de partículas ultrafinas de productos naturales como, por ejemplo, las arenas. Y en cascada, con un segundo clasificador, se utilizan para obtener fracciones granulométricas sucesivas del producto e incluso un mayor rendimiento de extracción. Los separadores de aire pueden trabajar por gravimetría, por efecto centrífugo o bien por una mezcla de los dos como en la mayoría de los aparatos.

3.3.2.2. Ciclón Neumático

Este es un equipo toma el nombre del fenómeno atmosférico por todos conocido. Es un clasificador centrífugo de minerales finos llevados en suspensión por un fluido gaseoso llevado en corriente, que entra tangencialmente en la parte superior del aparato representado esquemáticamente en la figura 13.

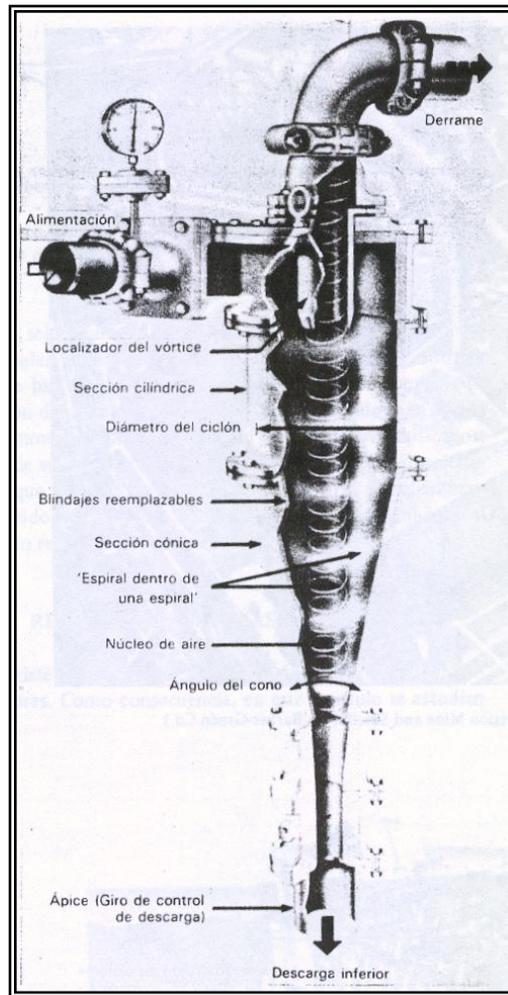


Fig. 13. Corte Esquemático de un Ciclón
Tomado de Kelly, E. (1990)

Un típico ciclón consiste de un depósito de forma de cilindro cónica con una válvula de control de descarga o una espita en su parte cónica por donde se hace la descarga inferior, y en su sección cilíndrica contiene una entrada tangencial de alimentación. El tope de la sección cilíndrica es cerrada con un plato a través del cual pasa axialmente la tubería de descarga superior. Dicha tubería es extendida dentro del cuerpo del ciclón, cuya sección se denomina "localizador del vórtice", el cual previene el corto circuito de la alimentación directamente dentro de la descarga superior (WILLS, B. 1997).

La alimentación es introducida tangencialmente a la parte cilíndrica bajo una cierta presión. La suspensión empieza a rotar alrededor del eje longitudinal del ciclón, formándose un torbellino primario descendente hacia el vértice de la parte cónica y que genera un vórtice con una zona de baja presión a lo largo del eje vertical.

Las partículas más gruesas, debido a la aceleración centrífuga, se adhieren a la pared, siendo finalmente evacuadas por la salida inferior. Debido a las reducidas dimensiones de este orificio, solamente se evacua una parte de la suspensión (descarga inferior), la cual transporta las partículas gruesas.

En dicha salida inferior se crea un segundo torbellino de trayectoria ascendente, el cual transporta la mayor parte del aire, junto con las partículas finas en suspensión que no han sido descargadas por la salida inferior. Finalmente, esta corriente abandona el ciclón a través del tubo central superior o localizador del vórtice.

En el interior del torbellino secundario, se crea una depresión que recoge todo el aire existente en la suspensión, creándose una columna de aire central que asciende hasta el localizador del vórtice y sobre el cual gira realmente el torbellino secundario, en el cual vuelve a producirse una nueva clasificación de partículas.(BOUSO, J.,s/f).

La teoría clásica de la acción de un ciclón sobre las partículas, según WILLS, B., (1997), describe que, dentro del patrón de flujo, las partículas están sujetas a dos fuerzas en oposición: una fuerza centrífuga y una fuerza de arrastre hacia adentro (Fig. 14).

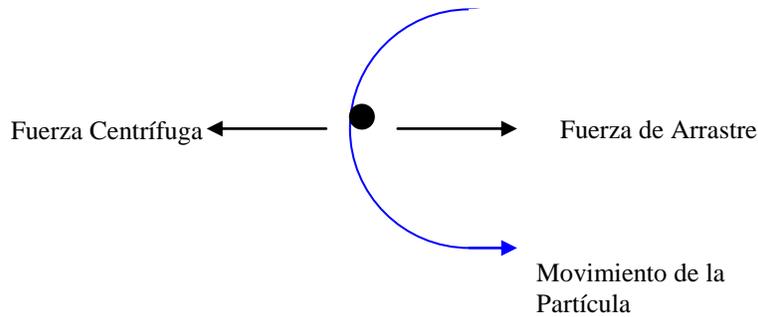


Fig. 14. Fuerzas Actuantes sobre una Partícula en su Órbita dentro de un Ciclón.
Tomado de Wills, B. (1997)

La fuerza centrífuga desarrollada, acelera la razón de arreglo de las partículas; de este modo, las mismas se separan de acuerdo al tamaño y a su gravedad específica. Las partículas que se arreglan más rápido, se mueven hacia la pared del ciclón, donde la velocidad es más baja, migrando hacia el ápice. Debido a la acción de la fuerza de arrastre, las partículas que se arreglan más despacio, se mueven a través de la zona de baja presión a lo largo del eje y son llevadas hacia arriba a través del localizador del vórtice para su descarga superior.

La existencia de una región externa por donde descienda el flujo de gruesos, y de una región interna por donde ascienda el flujo de finos, necesita una posición en la cual no haya velocidad vertical. Esto se aplica a través de todo el cuerpo del ciclón, generándose en el mismo, una envolvente de velocidad vertical cero (Fig. 15). De esta manera, como se mencionó anteriormente, las partículas sacadas de esta envolvente por la fuerza centrífuga, se dirigen vía a la descarga inferior, mientras que las partículas atraídas hacia el centro por la fuerza de arrastre, se eliminan por la descarga superior. Las partículas que permanecen en la envolvente de velocidad vertical cero, están influenciadas por una igual fuerza centrífuga como de arrastre, y por lo tanto, pueden

tener igual oportunidad de reportarse, bien sea en la descarga inferior o en la descarga superior.

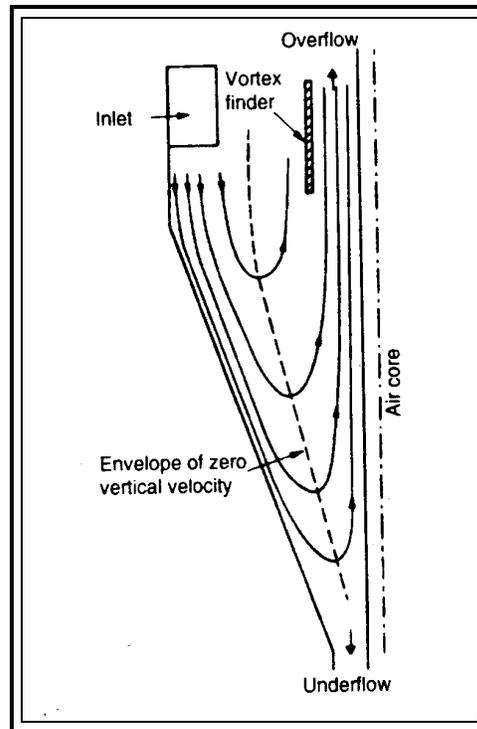


Fig. 15. Distribución de las Componentes Vertical y Radial de la Velocidad en un Ciclón.
Tomado de Wills, B. (1997)

Varios trabajos experimentales han demostrado que la clasificación no se realiza a través de todo el cuerpo del ciclón como lo postulan los modelos clásicos. En estos nuevos estudios se determinó que el interior del ciclón podría dividirse en cuatro regiones (Figura 16).

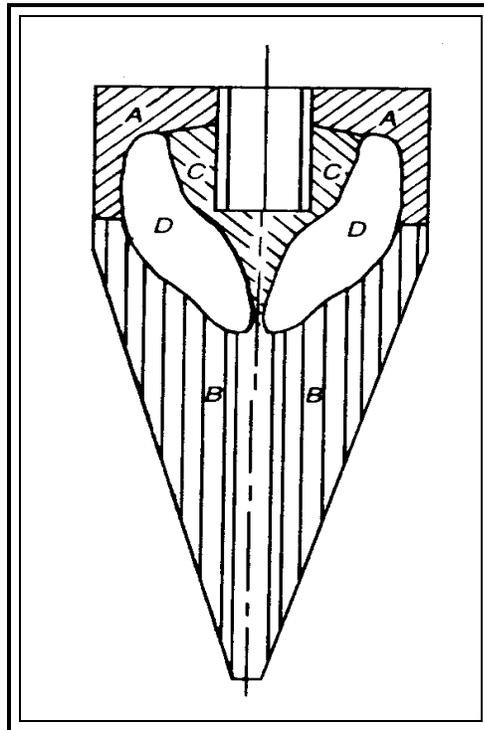


Fig. 16. Regiones de Distribución de Tamaños Similares en un Ciclón.
Tomado de Wills, B. (1997).

Según KELLY, E. (1990), la región angosta A, contra la cubierta superior y la pared del cilindro, contiene partículas que poseen la distribución de tamaños de la alimentación, es decir, alimentación no clasificada. La mayor parte de la sección cónica la llena la región B, en la que las partículas tienen esencialmente la distribución de tamaños del producto grueso. Circundando y extendiéndose abajo del localizador del vórtice se encuentra la distribución de tamaños del producto fino. La cuarta región D es una toroide alargada situada entre C y A-B. Aquí, la distribución de tamaños es mayor en las partículas de tamaño intermedio, ya sean de la alimentación o del contenido como un todo. Estas partículas de tamaño intermedio tienden a tener tiempos de residencia arriba del promedio (haciéndose máxima la discrepancia alrededor del tamaño d_{70}), lo cual significa que tales partículas tienden a acumularse en esta región

hasta ser desplazadas por falta de espacio. Esto indica que esta región es el lugar geométrico de la clasificación activa.

3.3.2.3. Clasificador Neumático de Laboratorio.

El clasificador de aire de laboratorio marca Denver, modelo "C", trabaja invariablemente en caída libre y la mayoría de las veces no utiliza la diferencia de densidad. Se emplea para clasificar finos, que puede ser por debajo de las cinco micras y generalmente para separar por tamaño un solo mineral.

Para la alimentación, todos los minerales son posibles de tratar. El equipo puede clasificar hasta polvo de metales y la ejecución óptima depende de lo denso del material y de las dimensiones de la partícula. Probablemente en algunos clasificadores, si la alimentación contiene partículas con alto y bajo peso específico, lo más denso puede ser colectado con la fracción más gruesa.

Puntualizando en las figuras 17 y 18, se puede ver que la alimentación se hace de la tolva al clasificador por medio de un tornillo transportador, que tiene una propulsión de 1 a 20 caballos de potencia, 173 revoluciones por minuto, una fase, 60 ciclos y un motor de engranaje reductor de 115 voltios. El aire es admitido y controlado por válvulas de presión encima del motor.



Frente

Dorso

Fig. 17. Clasificador de Aire de Laboratorio Marca Denver, Modelo C.
Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas, Dpto. de Minas. U.C.V.

El diámetro del clasificador es de 20 cm y el del colector 31 cm; la construcción es de acero inoxidable al igual que la tolva alimentadora. El colector es equipado con una válvula graduable para controlar los tamaños pequeños y grandes de partículas descargadas en el matraz de fondo.

El extractor de servicio pesado opera a 11.000 revoluciones por minuto, fase simple y 60 ciclos; tiene un motor universal de 115 voltios; dos envases colectores; tres conductores de salida con bolsas en forma de tubo de 12.7 cm de diámetro, las cuales son desechables y están localizadas en el panel de atrás donde recoge la fracción fina y, a su vez, se produce la descarga del aire. La sección cabeza del clasificador está alineado con chapa de latón duro, resistente a la abrasión. El codo es sin costura y

conectado por camisa para facilitar la limpieza, y toda la unidad es montada en un estante de acero de 78.74 cm × 106.68 cm.

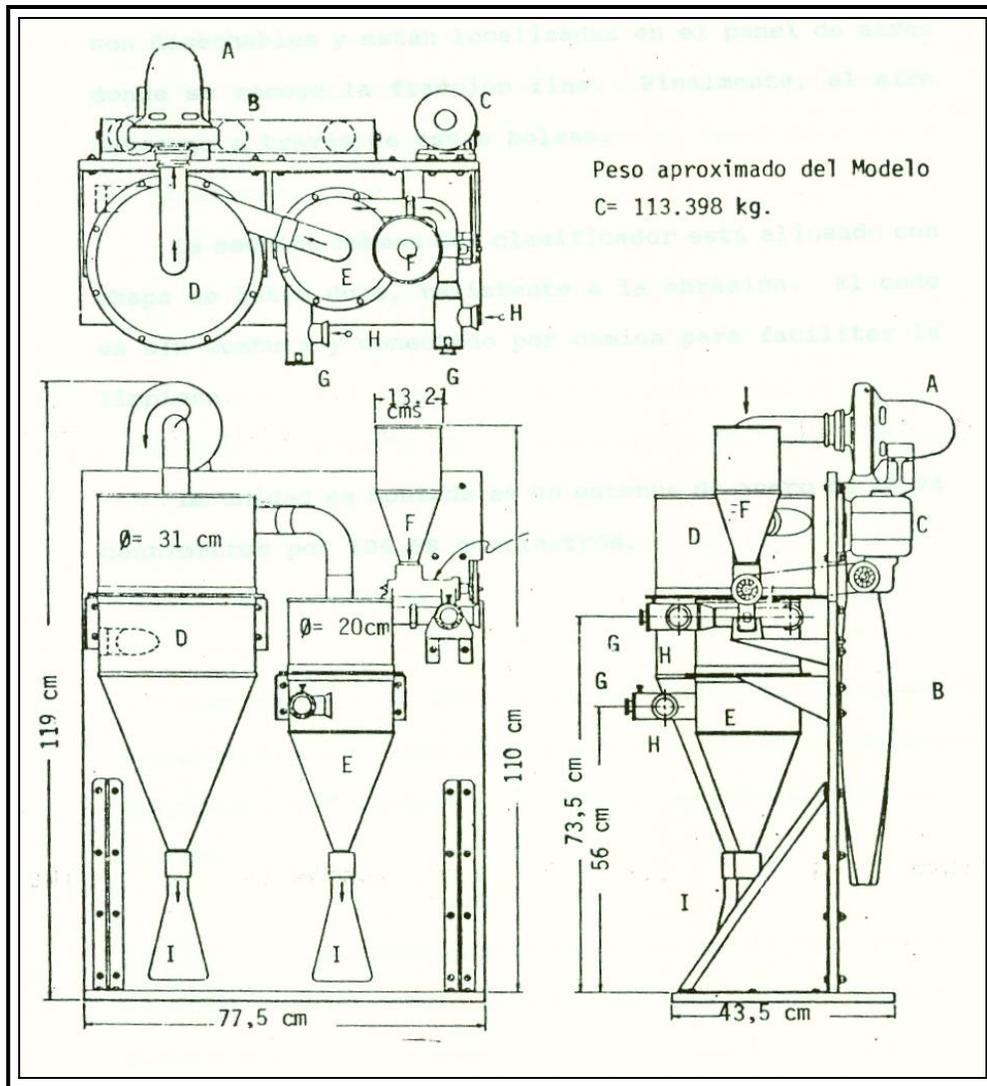


Fig. 18. Esquema del Clasificador de Aire de Laboratorio Marca Denver, Modelo C.
 A: Extractor, B: Recepción de la Descarga de Polvo Filtrado; C: Motor y Reductor de Velocidad, D: Colector, E: Clasificador, F: Alimentador, G: Válvula de Control de Aire, H: Aire; I: Recipientes de Vidrios.
 Tomado de Benvenga, J. (1990).

3.4. Operaciones de Concentración

La conminución y la clasificación son frecuentemente seguidos por un proceso de concentración. En los últimos 25 años, se han introducido nuevas y avanzadas tecnologías, que en algunos casos son aplicables sólo a algunos minerales específicos. Estas tecnologías han impactado el campo de los minerales y en especial de los minerales industriales en muchos aspectos, tales como:

- El desarrollo de productos minerales de más alta calidad, lo cual aumenta sus propiedades y, por lo tanto, el valor de los artículos que incorporan esos productos de alta calidad, influyendo significativamente en los precios.

- El desarrollo de productos minerales mejorados o nuevos de un mineral particular, el cual reemplaza otro mineral, incrementando así la participación en el mercado de los mismos en una industria o aplicación específica.

- La extensión de las reservas minerales de una compañía a través de la utilización de menas, que no habían podido ser introducidas en el mercado por no tener las especificaciones requeridas sin el uso de estas tecnologías.

- Por estar tan bien colocados estos productos minerales en el mercado, las aplicaciones de las nuevas tecnologías han hecho contribuciones substanciales en la reducción de los costos de producción de esos productos.

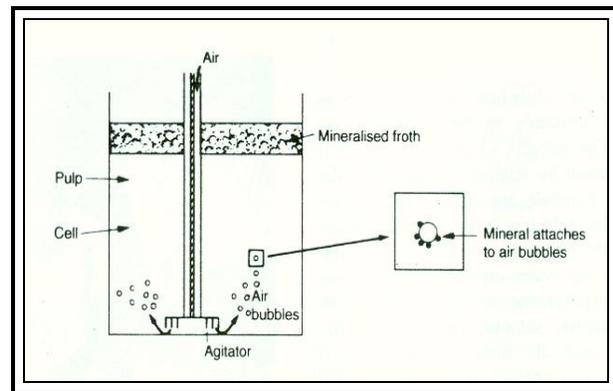
En este sentido, las operaciones de concentración son las más importantes a que se someten los minerales antes de su tratamiento metalúrgico o empleo industrial y tiene por objeto, separar las partículas de acuerdo con su riqueza, recogiendo el útil y descartando el estéril.

3.4.1. Concentración por Flotación.

Actualmente, la flotación es sin duda el método más usado en la concentración de minerales; se le utiliza para procesar casi todos los minerales sulfurosos y se aplica extensamente para los minerales metálicos no sulfurosos, los minerales industriales y el carbón mineral. También puede aplicarse a minerales de baja ley y a minerales que requieren molienda fina para lograr la liberación. Como se trata de un proceso relativamente selectivo, una aplicación importante está en la separación y concentración de los minerales valiosos contenidos en minerales complejos.

El proceso de flotación utiliza las diferencias en las propiedades físico – químicas superficiales de las partículas minerales. Después de un tratamiento con reactivos, tales diferencias en las propiedades superficiales entre los minerales, dentro de la pulpa de flotación, se hacen aparentes y, para que tome lugar la flotación, una partícula debe ser capaz de adherirse a una burbuja de aire para poder ser elevada a la superficie del agua (Figura 19). El proceso puede ser aplicado sólo a partículas relativamente finas, ya que si las mismas son demasiados grandes, la adhesión entre la partícula y la burbuja será menor que el peso de la partícula y, por lo tanto, la burbuja disminuirá su capacidad de carga.

Fig. 19. Principio de la Flotación
Tomado de Wills, B. (1997)



En la concentración por flotación, el mineral útil es usualmente transferido a una espuma o fracción flotante, dejando la ganga en la pulpa o cola. Esto es lo que se denomina flotación directa, que es opuesta a la flotación inversa, en donde la ganga separada se encuentra dentro de la fracción flotante. (WILLS, B. 1997).

La mayoría de los minerales son naturalmente hidrofílicos. Para lograr una separación por flotación, las superficies del mineral tienen que volverse selectivamente hidrofóbicas. Esto puede lograrse mediante la regulación de la química de la solución, seguida por la adición de un colector que selectivamente se adsorba y proporcione la superficie hidrofóbica requerida, así como la adición de cualquier otro reactivo necesario para lograr las condiciones requeridas de flotabilidad del mineral

3.4.1.1. Reactivos de Flotación

La regulación de la química de la solución, a la que se hacía referencia en el punto anterior, puede abarcar la adición de reactivos; ya sea activadores, que aumentan la selectividad intensificando la adsorción del colector, o depresores, que retardan o evitan la adsorción del colector. También puede incluir la adición de un

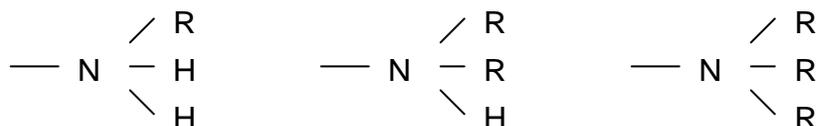
dispersor para asegurar que las superficies minerales estén libres de partículas finas. Finalmente, la regulación de la química de la solución puede incluir el control del pH para asegurar que habrá de existir el colector (que es a menudo un ácido débil) en la solución en la forma deseada. Otro grupo de reactivos que intervienen en la flotación son los espumantes. Estos tienen dos funciones: mejorar la dispersión de las burbujas finas en la pulpa y controlar las características de la espuma. En resumen, la clasificación de los reactivos de flotación prevé su división en dependencia de su papel en la flotación, de acuerdo a los grupos que se mencionan en los siguientes párrafos.

Los colectores son los más decisivos de los reactivos de flotación. Según DUDENKOV (1980), los colectores son moléculas o iones orgánicos que se adsorben selectivamente sobre las superficies minerales. El destino principal de los colectores es la hidrofobización selectiva de la superficie de las partículas de ciertos minerales en la pulpa de flotación, para crear condiciones favorables de su adherencia a las burbujas de aire para su ulterior extracción en concentrados. Los colectores disminuyen la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas de aire.

Por su capacidad a la disociación en la pulpa de flotación, los colectores se dividen en dos grupos: los ionizables, que se disocian en iones, y los no ionizables, que actúan en forma molecular. En dependencia de si la parte de flotación activa de la molécula es anión o catión, los colectores ionizables se subdividen en aniónicos y catiónicos.

En dependencia de la estructura química, los colectores aniónicos se dividen en sulfhídricos, para los cuales es característica la existencia en la parte polar del grupo —SX ($X = \text{H, Na, K, NH}_4$), ácidos grasos y sus sales (jabones), alquilsulfatos y alquilsulfonatos, los que tienen en su composición $\text{—SO}_3\text{X}$ y $\text{—OSO}_3\text{X}$ ($X = \text{H, Na, K}$). Los colectores no ionizables también se dividen en los reactivos que contienen azufre bivalente, alcoholes, alquilfenoles, etc.

Los colectores catiónicos son compuestos orgánicos en los cuales el radical hidrocarburo es el catión. El grupo de estos reactivos está representado por aminas, sus sales, bases amónicas cuaternarias y otras bases nitrogenadas. Las aminas son derivadas del amoníaco, las cuales en dependencia de la cantidad de los átomos de hidrógeno sustituidos por radicales hidrocarburos, se dividen en primarias, secundarias y terciarias:



La denominación de la amina proviene de la de los radicales hidrocarburos que entran en su composición. Las aminas inferiores son perfectamente solubles en agua y, al aumentar el peso molecular, la solubilidad de aminas en agua disminuye. Las aminas superiores son las sustancias sólidas, insolubles en agua. Las dosis usuales de este reactivo se encuentran en 250 gr/ton (PELÁEZ, E. 1980).

Los agentes espumantes son sustancias tensoactivas heteropolares que puedan adsorberse en la superficie de separación agua – aire. En la fase líquida de la pulpa de flotación su acción eleva la resistencia mecánica de las burbujas de aire, favorece su conservación en estado disperso, aumentando de esta forma la superficie de adherencia de las partículas de mineral flotante y la estabilidad de la espuma de flotación.

Los floculantes son sustancias de alto peso molecular sintéticas o naturales, las que favorecen la floculación de partículas minerales en suspensiones acuosas. Fundamentalmente, los floculantes se emplean para acelerar el espesado de los concentrados, productos intermedios y colas. En una serie de casos, ellos se aprovechan como reguladores de flotación.

Por último, los reactivos reguladores se utilizan para elevar la selectividad de flotación y para aumentar la extracción de minerales. Los reguladores, influyendo en la interacción del colector con los minerales, aumentan o disminuyen la hidrofobización de sus superficies. En este sentido, existen los reactivos de activación, los depresores y los reguladores de pH. La activación de la flotación del mineral está relacionada con la provocación de la susceptibilidad de una especie en un medio en el que generalmente no respondería a la acción del colector. (KELLY, E.,1990).

Por otro lado, con una acción contraria a los activadores, los agentes reguladores de acción depresora impiden la adsorción del colector por la superficie de los minerales y elevan su humectación. El reactivo más importante es el silicato de sodio, empleado para deprimir cuarzo y otros silicatos en dosis usuales de 1,2 kg/ton (PELÁEZ, E.,

1980). El mecanismo de la acción depresora del regulador en la superficie de mineral consiste en el desplazamiento del ión colector; la reducción o impedimento de la adsorción del colector; el enlace de los iones del activador en la superficie del mineral y en el volumen de la pulpa; la formación con el colector de un compuesto poco soluble en el volumen de la pulpa; la creación en el mineral de cubrimientos que estorban el contacto entre la superficie que adsorbe el colector y la burbuja de aire; la disolución de la superficie mineral y la separación de los iones que activan la flotación del mineral, o la disolución y eliminación del colector quimiadsorbido junto con los iones de la red cristalina.

La acción de los ácidos y álcalis en la flotación (reguladores de pH), es determinada por la compleja influencia de los iones H^+ y OH^- en el estado de las sustancias, disueltas en la fase líquida de la pulpa, y en las superficies interfaciales. Al cambiarse el pH de la pulpa, varían las propiedades y la solubilidad tanto de los mismos reactivos de flotación, como también de los minerales. En dependencia del régimen del agente reactivo y la composición mineral de la pulpa, la variación del pH puede ejercer una influencia tanto activadora, como depresora durante la flotación.

La adherencia de los iones hidrógeno o hidroxilo en la superficie de mineral varía el estado eléctrico de la superficie, y con ello influye en la adherencia de los iones del colector en la capa de difusión o directamente en la superficie. Son especialmente sensibles a la variación de pH aquellos materiales, para los cuales los iones H^+ y OH^- son los que determinan el potencial (cuarzo, silicatos, hidróxidos). Asimismo, regulando el pH es posible mantener una concentración determinada de formas iónica y molecular del colector y el depresor y, con ello, regular la selectividad de la flotación.

3.4.1.2. Equipo de Flotación

Aunque existen muchos diseños diferentes de máquinas de flotación, todas ellas tienen la función primaria de hacer que las partículas que se han convertido en hidrofóbicas entren en contacto y se adhieran a las burbujas de aire, permitiendo así que dichas partículas se eleven a la superficie y formen una espuma, la cual puede ser removida.

En el diseño de un proceso se requieren pruebas de flotación en laboratorio, experimentales y en planta piloto, así como también para mejorar el proceso durante la vida de la planta y para optimizar continuamente el proceso al ocurrir cambios en la ley o la mineralogía del mineral. La mayoría de las pruebas se efectúan en celdas de flotación, tal como la que se dispone en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, (Figura 20), la cual tiene capacidad entre 500 y 2000 gramos de mineral.

Dicha máquina, tiene un rotor que gira dentro de carcasa. Se introduce el aire a través del rotor para proporcionar buena dispersión y suficiente mezclado para dar origen a las colisiones entre partículas y burbujas, que son el prerrequisito esencial para la adherencia de partículas a las burbujas.

El aire puede admitirse a través de la guía del rotor; o de un tubo vertical situado en torno a esta guía por la succión creada en el rotor, en cuyo caso el régimen de aereación está limitado por el diseño y la velocidad del rotor; o bien puede introducirse a presión. Se pueden usar los datos obtenidos de tales celdas de laboratorio para

especificar los requerimientos de los reactivos y los tiempos de retención en las operaciones a escala industrial.

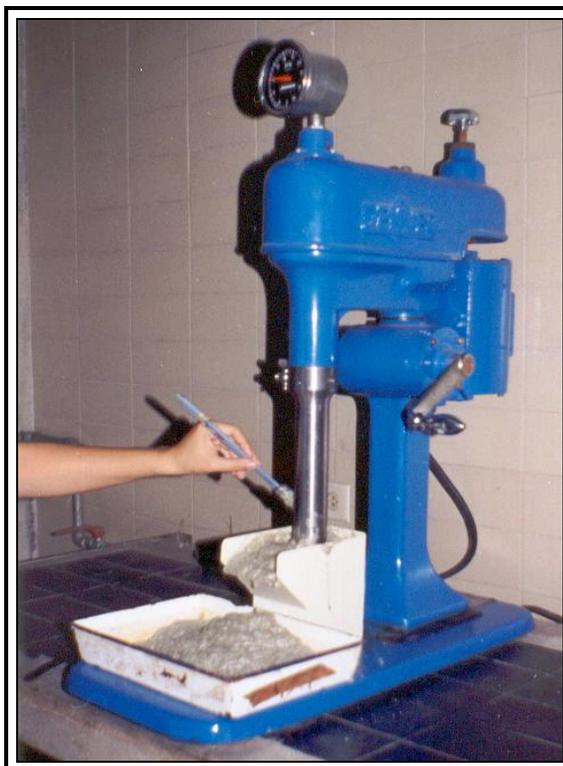


Fig. 20. Máquina de Flotación para Pruebas de Laboratorio Marca Denver, D-12 Flot. Laboratorio de Docimasia, Departamento de Minas, U.C.V.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Metodología

Con el fin de adquirir la información necesaria para hacer posible el estudio de factibilidad de beneficiar la mica de la Cantera Cura, es significativo realizar una planificación cuidadosa de las etapas a cumplir en el desarrollo experimental. En este sentido, las etapas que se ejecutaron para el presente trabajo, a partir de la preparación del material, se representan en forma esquemática en la figura 21.

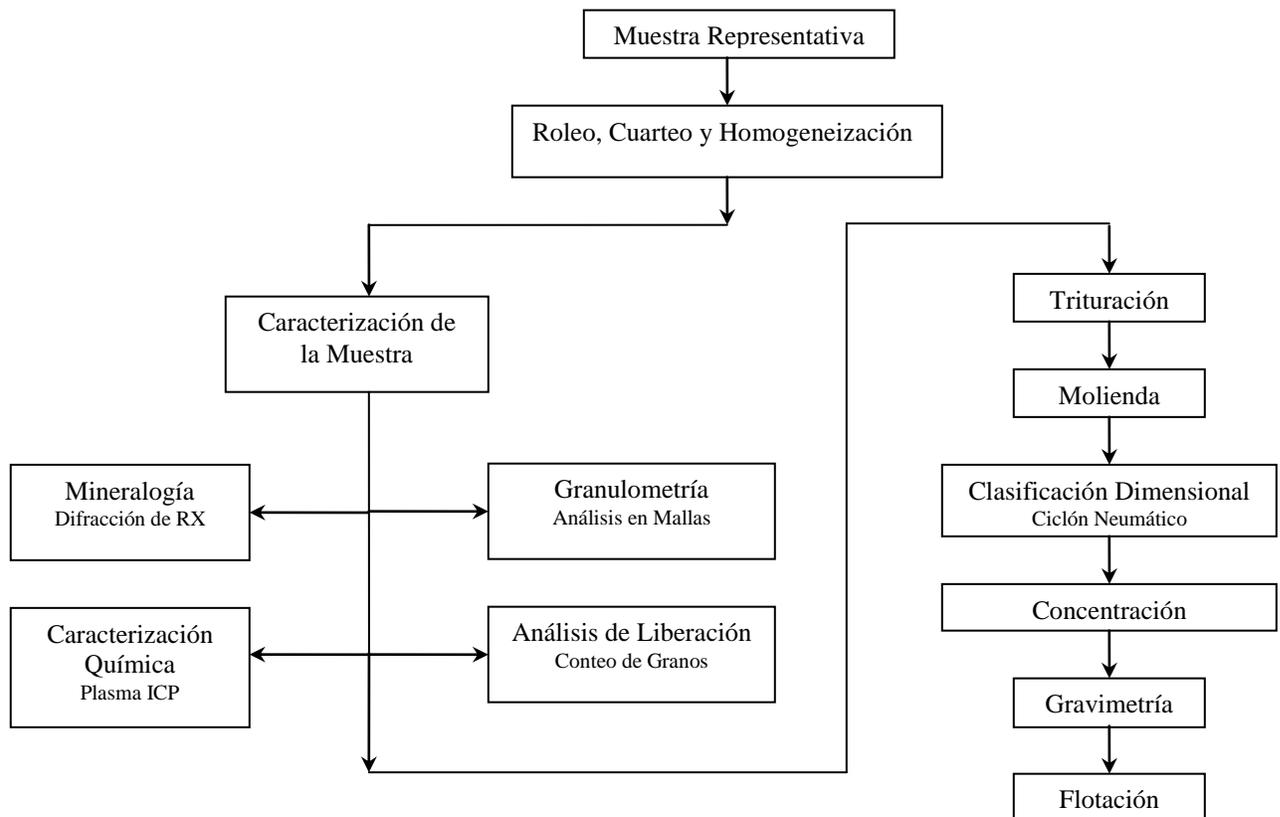


Fig. 21. Esquema General del Desarrollo Experimental
Fuente: Elaboración Propia

4.2. Preparación de las Muestras

La preparación de las muestras se constituye en una etapa preliminar de interés, ya que permite preparar el material micáceo para los tratamientos posteriores a los cuales va a ser sometido. A tal fin, se extrajeron 224 Kg. del yacimiento micáceo de San Joaquín bajo la forma de un muestreo tradicional con herramientas comunes (pico y pala), a todo lo largo de una franja de aproximadamente 15 a 20 m de un frente descubierto para la realización de las vías de acarreo de la cantera.

El material, una vez en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, fue tendido convenientemente en lonas a fin de facilitar su secado, posterior homogeneización y observación macroscópica.

Seguidamente se llevó a cabo una reducción de tamaño en la machacadora de mandíbulas marca Denver, modelo 201661 de 12×7.5 cm con salida a 1", ya que los tamaños máximos de roca eran de 20 cm de largo por 8 cm de ancho. El material descargado fue pasado a una trituración secundaria, a través de unos cilindros trituradores de 24 cm de diámetro con salida a malla 4; luego, fue tendido en lonas nuevamente para proceder a su homogeneización (Figura 22), estableciendo un cuarteo sistemático mediante el empleo del cuarteador Jones, hasta tener las muestras representativas en fracciones de 20 Kg cada una.



Fig. 22. Homogeneización de la Muestra

4.3. Caracterización de las Muestras

La determinación de las características de las partículas minerales es un aspecto importante del procesamiento de minerales. El conocimiento de las cualidades físicas y químicas se hace indispensable para que el producto mineral obtenido satisfaga una especificación de tamaño, forma o composición química, así como conocer cualitativamente las diferencias de comportamiento entre uno u otro mineral para un determinado proceso, ya sea por su grado de liberación, forma de la partícula, tamaño de las partículas, o contenido mineralógico, entre otros.

4.3.1. Descripción Macroscópica

La muestra, una vez recibida y preparada convenientemente en el laboratorio, fue sometida a observación visual de los trozos tomados en campo.

Se observó un material esquistoso, de color de meteorización gris verdoso oscuro y color fresco gris verdoso claro, de forma predominantemente laminar y alta fragilidad, con un brillo perlino característico de las micas y sedoso al tacto; así como pequeñas venas de cuarzo que se intercalaban con el esquistoso. El tamaño de las micas es muy pequeño, por lo que no se aprecia con exactitud, sino que más bien aparece en la roca de forma diseminada, identificándose sólo por su brillo y la estructura que le dá a la roca caja.

4.3.2. Determinación del Contenido de Humedad

Para la determinación del contenido de humedad, se siguió el método de ensayo normal, tomándose 1 Kg. de muestra en un recipiente adecuado de peso conocido e introduciéndose en el horno por espacio de 12 horas a una temperatura de 105°C. Una vez secada la muestra, se dejó enfriar en el desecador y se pesó, obteniéndose el siguiente resultado:

W_{hr} = Peso del material húmedo + recipiente, en gramos = 1671,1 gr

W_{dr} = Peso del material seco + recipiente, en gramos = 1660 gr

W_r = Peso del recipiente, en gramos = 672,1 gr

$$W = [(W_{hr} - W_{dr}) / (W_{dr} - W_r)] \times 100$$

$$W = (1671.1 - 1660) / (1660 - 672.1) \times 100 = (1.12 \times 10^{-2}) \times 100$$

$$W = \underline{1,12\%}$$

Como puede observarse del resultado obtenido, el material proveniente de mina presenta 0,12% por encima de lo indicado en las especificaciones de material micáceo para las industrias (máximo 1%). Para este material en particular, esta humedad de 1,12% hace que el material presente una tendencia a formar grumos muy sueltos, así como adherirse a las superficies que se pongan en contacto con éste, pero sin sentirse completamente húmedo al tacto. No obstante, el producto micáceo obtenido de los posteriores ensayos de concentración, se presentará seco, una vez que se hallan introducido las muestras en el horno para eliminar el agua proveniente de dicho proceso.

4.3.3. Análisis Granulométrico

Como parte del proceso de caracterización, el análisis granulométrico es uno de los ensayos más importantes. El tamaño de las partículas minerales de los materiales es una variable primordial en la mayoría de los procesos de beneficio mineral, para conocer el rango en el cual se encuentran las mismas, así como su distribución. Dicha distribución por tamaños, en la fase final de un proceso de reducción de tamaño, es de considerable importancia para las especificaciones industriales.

Este análisis se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas, del Departamento de Minas. El proceso de clasificación se realizó en seco, en los tamices de la serie A.S.T.M. Para cada análisis se utilizó una cantidad representativa de muestra de 2 Kg., tanto del producto de la trituración primaria, como el de la secundaria, provenientes ambos de la preparación de la muestra anteriormente descrita.

Dicha cantidad de muestra se colocó convenientemente durante 10 minutos en el tamizador colgante “Rotap”, dispositivo vibratorio y de sacudidas que permite el proceso de clasificación. Los resultados de los análisis granulométricos se representan en las tablas 3 y 4; y de igual manera, se representan gráficamente en la figura 23.

Malla			Retenido	Pasante	
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
# 1"	25,4	0	0	0	100
# 1/2"	12,7	134	6,70905723	6,70905723	93,2909428
# 1/4"	6,3	504	25,234066	31,9431232	68,0568768
# 4	4,75	219	10,9648025	42,9079257	57,0920743
# 6	3,35	217	10,8646673	53,772593	46,227407
# 8	2,36	168	8,41135533	62,1839483	37,8160517
# 14	1,4	171	8,5615581	70,7455064	29,2544936
# 20	0,85	141	7,05953037	77,8050368	22,1949632
# 30	0,6	75	3,75506934	81,5601061	18,4398939
# 50	0,3	118	5,90797577	87,4680819	12,5319181
# 60	0,25	44	2,20297401	89,6710559	10,3289441
# 80	0,18	19,4	0,97131127	90,6423672	9,3576328
# 100	0,15	45,4	2,27306864	92,9154358	7,08456416
# -100	<0,15	141,5	7,08456416	100	0
	Total	1997,3*			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 3. Análisis Granulométrico del Producto de la Trituración Primaria

Malla			Retenido	Pasante	
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
#6	3,35	98,9	5,24835491	5,24835491	94,7516451
# 8	2,36	143	7,58862237	12,8369773	87,1630227
# 12	1,7	200,9	10,6612184	23,4981957	76,5018043
#16	1,18	237,7	12,6140947	36,1122904	63,8877096
#20	0,85	198,5	10,5338569	46,6461473	53,3538527
#30	0,6	213	11,3033326	57,9494799	42,0505201
# 50	0,3	244,6	12,980259	70,9297389	29,0702611
# 70	0,212	115,2	6,11335173	77,0430906	22,9569094
# 100	0,15	127,5	6,76607939	83,80917	16,19083
# 120	0,125	45,8	2,43048185	86,2396519	13,7603481
# 150	0,1	35,6	1,8891955	88,1288474	11,8711526
#200	0,075	86,1	4,56909361	92,697941	7,30205901
# -200	<0,075	137,6	7,30205901	100	0
	Total	1884,4*			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 4. Análisis Granulométrico del Producto de la Trituración Secundaria

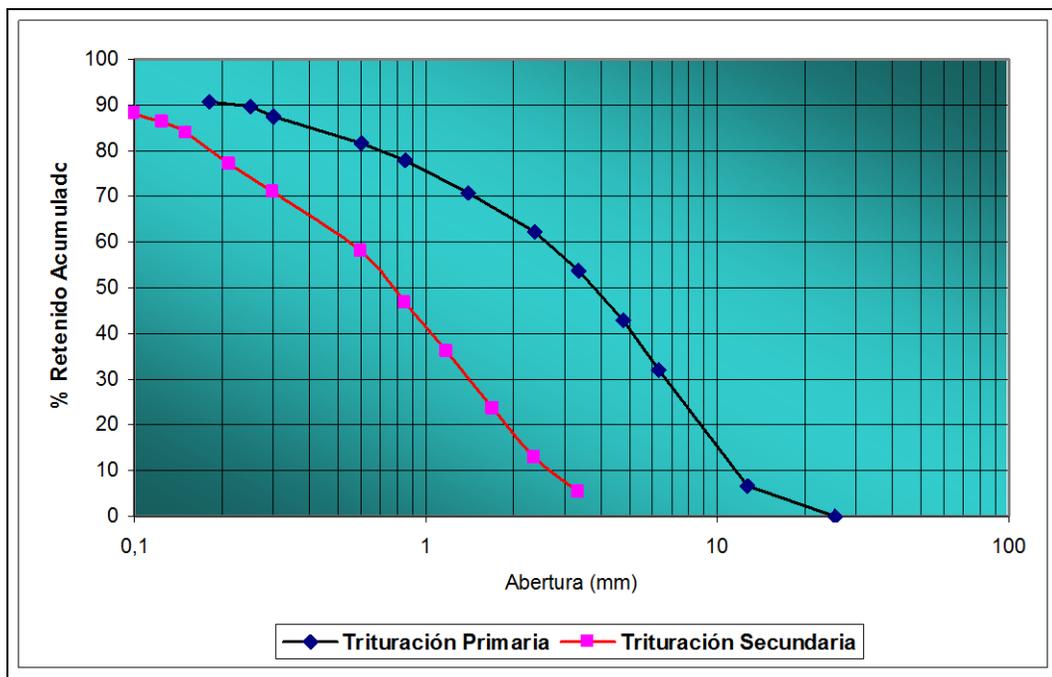


Fig. 23. Curva Granulométrica del Producto de la Trituración Primaria y Secundaria

Del comportamiento de la granulometría del material en estudio, observado en las tablas 3 y 4 y la figura 23, se puede deducir que dicho material es relativamente grueso con un 62.18% por encima de la malla 8, luego de una primera trituración, y con un 57.94% por encima de la malla 30, en su segunda trituración. La distribución de tamaños se estima uniforme; asimismo, la mayor cantidad de material, en la trituración primaria, está en el rango $-1'' + 14$ mallas, mientras que en la secundaria, la mayor cantidad de material se ve representada en el intervalo $-6 + 50$ mallas.

Por otro lado, cerca del 7%, en ambos productos, es pasante de las mallas 100 y 200 respectivamente, señalando un porcentaje relativamente bajo de finos, lo cual es conveniente para evitar dificultades operativas en cualquier proceso de beneficio. Con la figura 23, se puede observar el paralelismo entre las curvas, indicando una trituración efectiva y un material aceptablemente uniforme.

4.3.4. Difracción de Rayos X

Los cristales poseen una estructura ordenada tridimensional con periodicidades características o períodos de identidad a lo largo de los ejes cristalográficos. Cuando un haz de rayos X choca contra tal distribución tridimensional, hace que los electrones que encuentran en su trayectoria vibren con una frecuencia de la radiación X incidente. Estos electrones vibrantes absorben parte de la energía de los rayos X, y actuando como fuente de nuevos frentes de onda, emiten (dispersan) esta energía como radiación X de la misma frecuencia y longitud de onda. En general, las ondas dispersadas interfieren destructivamente, pero en algunas direcciones específicas se refuerzan entre sí para producir un efecto de dispersión cooperativo que recibe el nombre de difracción.

Los análisis de difracción de rayos X se realizaron en el laboratorio de Difracción de Rayos X del Departamento de Metalurgia Física, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela.

Para la muestra cabeza del ciclón, así como para la cabeza de la flotación, se obtuvieron difractogramas con similares resultados (ver anexo N°2), los cuales fueron analizados por la intensidad relativa obtenida de cada pico del difractograma, que luego se comparó con una serie de fichas que posee cada mineral para poder ser identificado.

Los datos más representativos se encuentran en la tabla 5, seleccionados de los 195 picos analizados en el registro. Los minerales presentes en la muestra analizada

por difracción de rayos X, de acuerdo con las intensidades relativas mostradas en la tabla anterior, se describen en la tabla 6.

Ángulo Doble	Intensidad	Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad Relativa
6,30	170	3,150	14,017	36
8,90	415	4,450	9,927	88
12,50	465	6,250	7,075	99
17,80	330	8,900	4,979	70
18,70	385	9,350	4,741	82
19,80	240	9,900	4,480	51
20,90	310	10,450	4,247	66
25,10	385	12,550	3,545	82
26,60	470	13,300	3,348	100
26,80	435	13,400	3,324	93
31,50	195	15,750	2,838	41
34,80	135	17,400	2,576	29
39,40	125	19,700	2,285	27
42,40	120	21,200	2,130	26
45,50	170	22,750	1,992	36
50,10	120	25,050	1,819	26
59,90	95	29,950	1,543	20

Tabla 5. Cuadro Resumen de los Resultados de las Intensidades Relativas del Material en Estudio

Mineral	Composición Química	Generalidades
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$	Dureza (H) = 2 – 2½, Densidad (G) = 2.76 – 2.88. Caracterizado por su exfoliación muy perfecta y color claro. Transparente a incoloro en las hojas delgadas
Clorita	$(Mg_{4.3}Fe_{0.88}Al_{1.82})(Si_{2.6}Al_{1.4})O_{10}(OH)_8$	Dureza (H) = 2 - 2½, Densidad (G) = 2.6 – 3.3. Caracterizado por el color verde, hábito micáceo y por no ser elástica la exfoliación
Cuarzo	SiO_2	Dureza (H) = 7, Densidad (G) = 2.65. Caracterizado por su elevada dureza, fractura concoidea y ausencia de clivaje

Tabla 6. Características de los Minerales encontrados por Difracción de RX.

La muestra analizada por el método de difracción de rayos X, arroja como resultado la presencia de dos minerales esenciales como son la mica y el cuarzo. La mica se considerará, en adelante, con respecto a los resultados finales de este trabajo, constituida por la muscovita y la clorita. Esto es, por cuanto la primera forma parte del grupo de las micas, mientras que la clorita, si bien no corresponde a este grupo, presenta, sin embargo, similares propiedades físicas y químicas que la identifican con el mismo (ver tabla 6). La diferencia principal de la clorita radica, como se señaló anteriormente, en sus hojas flexibles pero no elásticas; así como la ausencia de potasio en su composición química.

Los resultados así expresados son favorables, debido a que el problema se plantea con base a separar un solo mineral de ganga, que en este caso es el cuarzo. Sin embargo, se consideró necesario realizar un estudio petrográfico de manera que se lograra corroborar los datos arrojados por Difracción de RX y tener de esta manera, una

información fidedigna de la mena objeto de estudio, para establecer un diseño experimental apropiado.

4.3.4.1. Estudio de Petrografía

El estudio petrográfico se llevó a cabo en el Laboratorio de Mineralogía y Petrología Ígneo – Metamórfico de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, y fue realizado siguiendo el procedimiento normal pautado para el caso. Con una muestra de mano, se realizó la sección fina y se determinó en la misma, una textura foliada esquistosa, con un tamaño de grano promedio de 0,12 mm.

La descripción mineralógica se presenta en el anexo N° 3 en donde se encuentra señalado, desde el punto de vista geológico, lo observado en la muestra bajo el microscopio electrónico. La composición mineralógica, es la parte de este estudio que se requirió comparar con los datos de difracción de RX, la cual se menciona a continuación:

Esencial (E); Accesorio (A)

1. Cuarzo	55% (E)
2. Muscovita	45% (E)
3. Minerales Opacos	Trazas (<1%)
4. Epidoto	Trazas (<1%)
5. Esfena	Trazas (<1%)

Asociación Mineral Diagnóstica: Cuarzo – Muscovita – Epidoto

Facies Metamórfica: Esquistos Verdes

Protolito: Sedimentario

Relación P/T: Baja

Nombre de la Roca (Mineralógico – textural): Esquisto Cuarzo – Muscovítico.

Como puede observarse, la presencia de mica y cuarzo se hace notoria también en este estudio. A pesar de que los análisis de difracción de RX y petrográfico son cualitativos, pueden corroborarse los resultados comunes que arrojaron ambos métodos, permitiendo por lo tanto, estimar de una manera preliminar los minerales presentes en la muestra de material en estudio que, en este caso, está caracterizada por mica y cuarzo.

4.3.5. Análisis de Liberación

Un prerrequisito esencial para la separación de un mineral en sus fracciones de valor y de desecho, es la liberación de los granos de mineral con valor de los granos de mineral de desecho. El grado de liberación (f) es el porcentaje de un mineral dado que existe en la forma de partículas libres, es decir, partículas que contienen sólo ese mineral con relación del total de la muestra. Las partículas que contienen a la vez los minerales de valor y de desecho, se conocen como partículas no liberadas o mixtas, y gran parte de las dificultades que se experimenta en la separación de minerales, radica en el tratamiento de estas partículas, ya que necesitan de posteriores trituraciones para poder ser liberadas, adicionando gastos de energía a los equipos para realizar dichos procesos, lo que encarece los costos de la planta.

El procedimiento seguido para realizar el análisis de liberación fue el siguiente: el material retenido en cada malla utilizada en los análisis granulométricos, tanto de la trituración primaria como de la secundaria, fue analizado individualmente bajo un microscopio electrónico HM – Pol, marca Leitz, ubicado en Laboratorio de Mineralogía y Petrología de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Para ello, cada una de estas muestras se colocaron y fijaron en portaobjetos, procediendo al conteo de las partículas con ayuda de una plantilla que permitía el desplazamiento horizontal y vertical del portaobjeto. De esta manera, se fijaba la posición vertical y se realizaba el conteo haciendo un “barrido” horizontal; una vez terminada la línea, se movía la posición vertical y se repetía el proceso de barrido. Este conteo se realizó en un mínimo de 150 cuadrículas, con la finalidad de obtener un resultado representativo del análisis de liberación.

El criterio para llevar a cabo el conteo de partículas, se basó en diferentes relaciones de liberación, tal como se describe a continuación:

- 0% Mena (Mica) – 100% Ganga (Cuarzo)  
- 25% Mena – 75% Ganga  
- 50% Mena – 50% Ganga  
- 75% Mena – 25% Ganga  
- 100% Mena  

El grado de liberación se define como:

$$Total\ de\ partículas\ de\ útil\ en\ el\ mixto = \frac{\sum mixtos \times \%}{100} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{\text{Total de partículas de útil liberadas}}{\text{Total de partículas de útil liberadas} + \text{Total de partículas de útil en el mixto}} \quad (3.2)$$

Los resultados del análisis de liberación para cada uno de los productos retenidos en las mallas de la trituración primaria y secundaria, se muestran en la tabla 7.

	Mallas A.S.T.M.	Abertura (mm)	Mica Grado de Liberación (%)
TRIT. PRIMARIA	30	0.600	72.03
	50	0.300	85.06
	60	0.250	88.22
	80	0.180	95.16
	100	0.150	97.35
TRIT. SECUNDARIA	30	0.600	91.91
	50	0.300	94.58
	70	0.212	94.73
	100	0.150	94.80
	120	0.125	96.30
	150	0.100	95
	200	0.075	98.23

Tabla 7. Grado de Liberación de los Productos de la Trituración Primaria y Secundaria.

Como se observa en el cuadro anterior, con la trituración primaria se logra un grado de liberación del 90% aproximadamente en la malla 60; mientras que, con la trituración secundaria, cerca del 90% de liberación se logra en la malla 30.

En las Figuras 24 y 25, se puede observar el material visto al microscopio, en donde se reconoce la mica como el mineral transparente y laminar; y el cuarzo, como granos de un color más blanco. Se nota así, la forma empaquetada que tiene la mica en la Figura 24, correspondiente a la trituración primaria, donde no se ha logrado alcanzar un grado de liberación óptimo; mientras que en la Figura 25, luego de una segunda trituración, se observa la transparencia de las hojas de mica, indicando una buena liberación.

Lo dicho anteriormente se puede reflejar en un gráfico de grado de liberación, tal como se señala en las figura 26. En los mismos se puede observar que, aplicando la reducción de tamaño adecuada, es posible lograr un alto grado de liberación mediante este mecanismo; Sin embargo, aunque es imposible lograr una liberación completa, se puede lograr un nivel aceptable para los procesos posteriores de concentración.

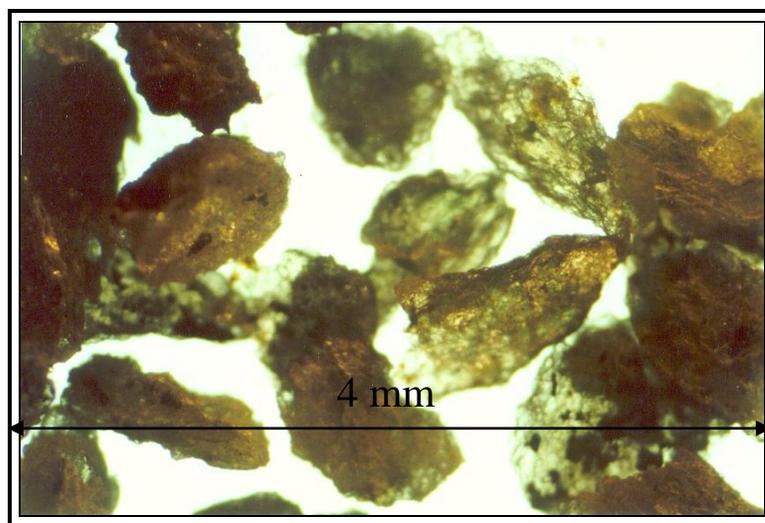


Fig. 24. Producto de la Trituración Primaria. Malla 30

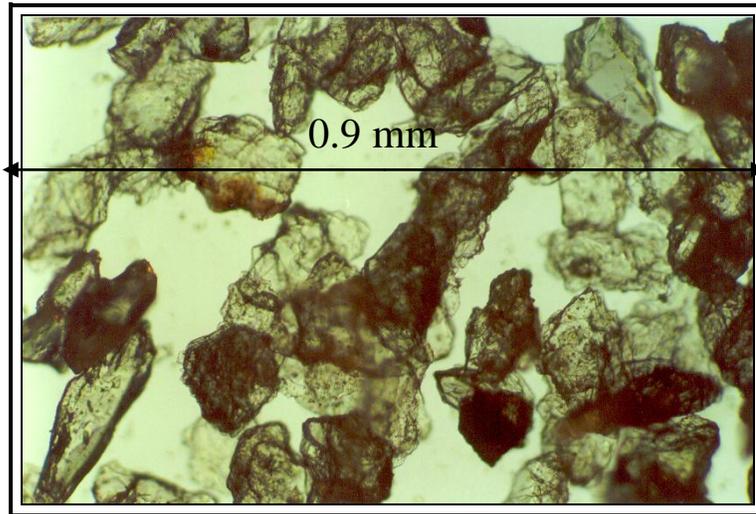


Figura 25. Producto de la Trituración Secundaria. Malla 150

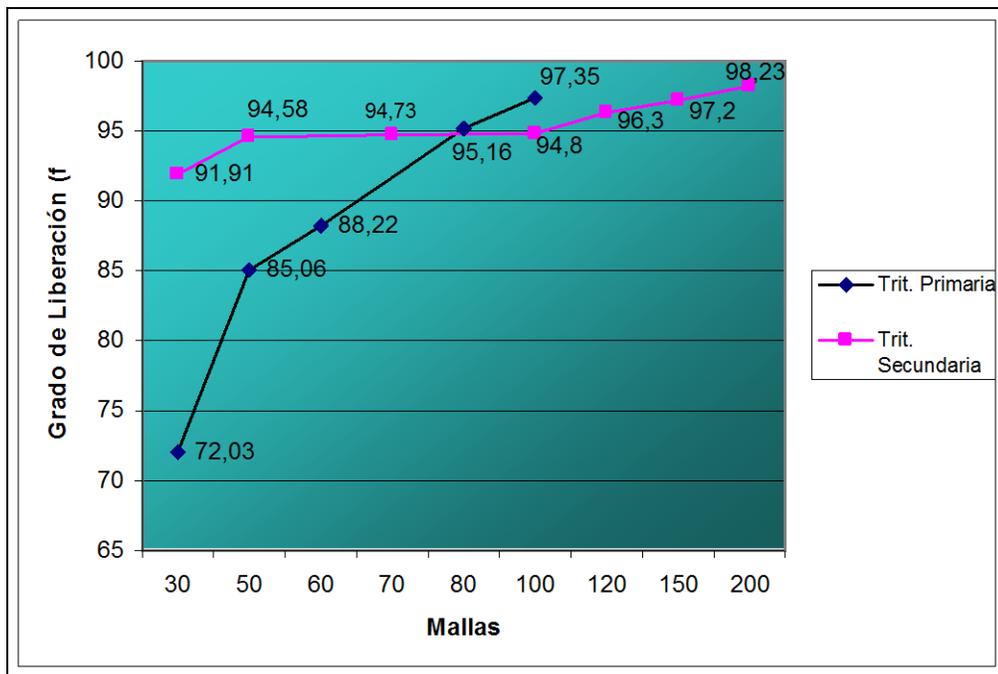


Fig. 26. Representación Gráfica del Grado de Liberación en la Trituración Primaria y en la Trituración Secundaria

4.3.6. Análisis Químicos

Para determinar cuantitativamente la concentración de los elementos característicos de la mica y del cuarzo en cada una de las muestras, se realizaron análisis químicos en el equipo de espectroscopía de emisión por plasma ICP, marca Jobin Yvon JY24 de ISA división d'instruments, S.A. (Figura 27). Este equipo se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Geoquímica Metamórfica, del Instituto de Ciencias de la Tierra, adscrito a la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

4.3.6.1. Fundamentos del Método ICP.

El "plasma de acoplamiento inductivo ICP" es una fuente capaz de producir espectros elementales para la identificación y cuantificación de los elementos contenidos en una muestra.

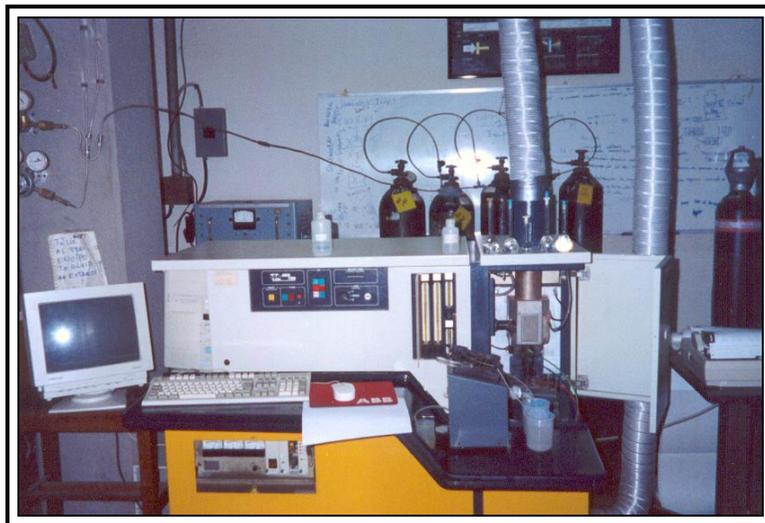


Fig. 27. Equipo de ICP Marca Jobin Yvon, Modelo JY24.
Laboratorio de Geoquímica Metamórfica. Instituto de Ciencias de la Tierra. U.C.V.

En 1920 se introduce la palabra “PLASMA” para designar un “gas ionizado, eléctricamente neutro, confinado en tubos de descarga”. Puede considerarse que el plasma es un cuarto estado de la materia cuyas propiedades derivan de las fuerzas coulombianas por la interacción entre partículas cargadas.

En su aplicación espectroscópica, se da el nombre de plasma a un gas parcialmente ionizado, eléctricamente neutro en su conjunto y confinado en un campo electromagnético (VINDEL A.,1985). Sus temperaturas (4.000 – 10.000 °K) son notablemente superiores a las de las llamas químicas, lo que constituye la base del interés en su aplicación como fuente de emisión en espectroscopia, donde deben disociarse las combinaciones químicas, incluidas las más refractarias.

Un sistema típico de análisis elemental por espectroscopia con un plasma con fuente de excitación y atomización, está constituido por:

- El plasma, que deberá reunir ciertas condiciones de temperatura, confinamiento y otras propiedades.
- El generador eléctrico, que aportará la energía externa al plasma que la disipará en forma térmica y radiante.
- El sistema de introducción de la muestra, que deberá permitir un eficaz aporte de la muestra al conjunto con buena penetración en el seno del plasma y con un tiempo de residencia suficiente en el mismo.
- El sistema de alimentación de gas, que asegura el funcionamiento de plasma, el transporte de la muestra y eventualmente la formación del aerosol con la muestra.
- El sistema óptico, que permitirá analizar el espectro emitido por el plasma.

➤ El sistema de tratamiento de la señal, que permitirá el análisis cualitativo y cuantitativo a partir de las radiaciones emitidas.

- El Plasma.

Definido el plasma como un estado de equilibrio entre partículas cargadas y neutras de un gas ionizado, se tienen diferentes tipos de plasmas en función de la forma de obtener y mantener dicho equilibrio. El plasma de acoplamiento inductivo comúnmente conocido como ICP por las siglas de su denominación inglesa “Inductively Coupled Plasma”, se obtiene por la acción de una corriente de alta frecuencia que genera un campo magnético oscilante hasta el que se lleva el gas que va a sustentar el plasma.

Estos campos magnéticos provocan la aparición de iones y electrones que se mueven siguiendo trayectorias anulares acelerados por efecto de la alternancia de los campos magnéticos, produciéndose por efecto Joule, una liberación de energía calorífica que permite alcanzar temperaturas de hasta 10.000 °K en el interior de las zonas de máxima corriente circular. De esta manera, se consigue una configuración toroidal del plasma confinado en el campo magnético, con una fuerte intensidad luminosa radiante que se denomina “llama”.

Una simplificación muy esquemática de los mecanismos que se producen en el plasma, son las zonas energéticas, que están en función de las diferentes densidades electrónicas y que permiten asignar gradientes de temperatura en las diferentes zonas de la “llama”. En este sentido, existen tres zonas; la primera, con una energía de 0 – 16

eV, con la que se pueden excitar e ionizar los átomos de la mayoría de los elementos de la tabla periódica; la segunda zona tiene una energía de 16 – 30 eV y se producen con ella, los espectros de los iones de elementos con potenciales de ionización superiores a 15 eV (halógenos); y, por último, una tercera zona con energía superior a los 30 eV en donde se excitan las líneas de Argón.

Físicamente, el plasma se confina en un conjunto de tres tubos concéntricos (generalmente de cuarzo) abiertos por un extremo a la presión atmosférica. El tubo interior, denominado inyector, se utiliza para hacer llegar el aerosol de la muestra hasta el interior de la “llama” del plasma. Los otros dos tubos forman una corona cilíndrica a través de la cual se transporta el Argón que sustenta el plasma en régimen de turbulencia. Este Argón tiene la doble misión de mantener el plasma y de refrigerar las paredes del tubo exterior a fin de evitar su fusión por las elevadas temperaturas alcanzadas en la “llama” (Figura 28).

- El Generador de Radiofrecuencia.

Es el elemento que permite aplicar la energía necesaria para sustentar y confinar el plasma ICP. La frecuencia es un parámetro importante del generador que ha sufrido modificaciones a lo largo del desarrollo seguido por los plasmas aplicados a los espectros. En un principio se utilizaron frecuencias entre 1 y 8 Megahertz para ir incrementando hasta los 27; 40 y 56 MHz que se emplean actualmente, observándose una configuración más toroidal del plasma por encima de los 25 MHz (Fig. 29), lo que se traduce en una mayor facilidad para que las partículas del aerosol penetren en el

plasma, frente a la “barrera” que opone al paso de dichas partículas el fuerte gradiente térmico frente al inyector en los plasmas de frecuencia inferior.

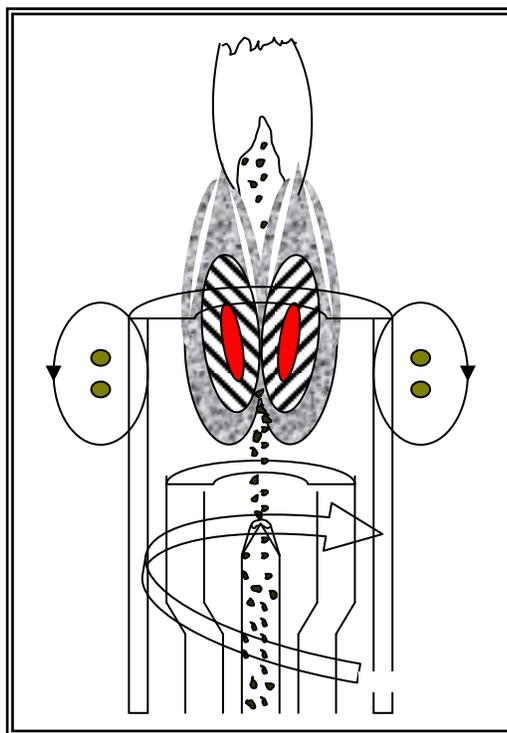


Fig. 28. Conformación Física del Plasma ICP.
Fuente: Química Industrial. 1985. Elaboración Propia

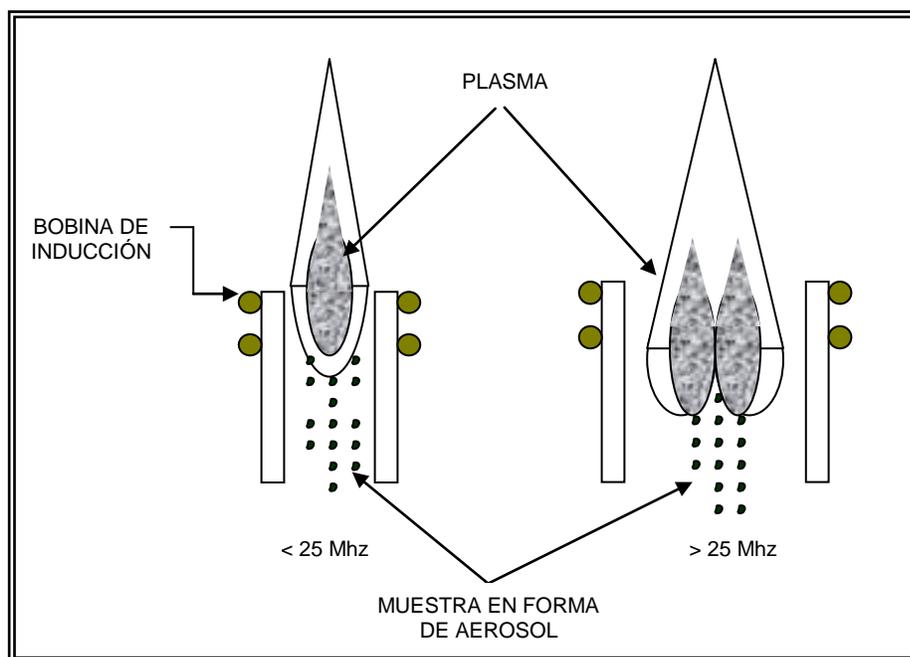


Fig. 29. Configuración del Plasma de acuerdo a la Frecuencia Utilizada.
Fuente: Química Industrial. 1985. Elaboración Propia

- Sistema de Introducción de Muestras

El método más difundido de introducción de la muestra, es en forma de solución líquida a través de la nebulización. La nebulización tiene por misión formar un aerosol húmedo, finamente dividido, con un tamaño de partícula homogéneo y lo más reducido posible a fin de facilitar el tránsito de la muestra en el seno del plasma y conseguir una excitación homogénea y reproducible. Este objetivo se alcanza mediante la combinación de dos elementos: nebulizador y cámara de nebulización.

El nebulizador transforma la solución líquida de la muestra en un aerosol húmedo. Esta operación tiene lugar generalmente mediante un sistema neumático que por efecto Venturi aspira la solución a través de un capilar pulverizándola con el impacto de un chorro de gas a presión.

La cámara de nebulización tiene por misión, separar del aerosol formado, las gotas de mayor tamaño, a fin de uniformar el aporte de muestra al plasma. Se utilizan dos sistemas claramente diferenciados: los de Bola de Impacto y los de Decantación, siendo éste último el que se encuentra en el equipo JY24 (Fig. 30).

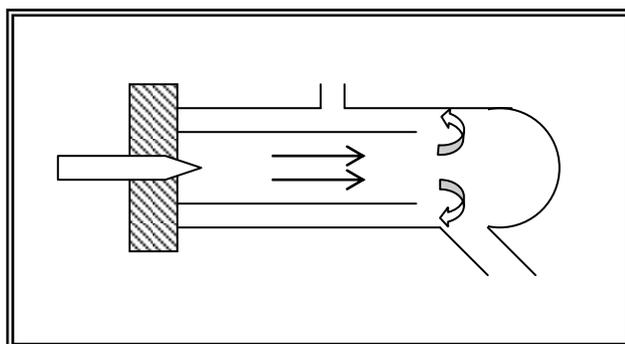


Fig. 30. Cámara de Nebulización del Equipo JY24
Fuente: Química Industrial. 1985. Elaboración Propia

- Sistema de Gases.

Este sistema va a permitir disponer de un control de presión y caudal sobre el gas utilizado en la generación del plasma, en la refrigeración de las paredes de la antorcha y en el aporte de la muestra en los sistemas de nebulización mediante circuitos independientes. El flujo de argón requerido para un sistema de espectroscopia de plasma ICP es de 12 – 14 litros / minuto.

Se utiliza el Argón como plasmógeno debido a que su potencial de ionización (15,7 eV) permite disponer de una energía suficiente para excitar prácticamente todos los elementos en sus líneas más sensibles.

- Sistema Óptico.

Los átomos de la muestra, absorben energía en el plasma pasando a un estado excitado desde el que vuelven a su estado fundamental, liberando dicha energía en forma de radiaciones electromagnéticas característica de cada elemento presente. Por tanto, se tiene desde el plasma una radiación luminosa policromática representativa de todos los elementos de la muestra.

Para identificar y medir la presencia de estos elementos en la muestra, se necesita un sistema que separe cada una de las radiaciones monocromáticas que constituyen el haz policromático; esto se consigue mediante el sistema óptico.

Los elementos fundamentales de los sistemas ópticos utilizados en espectroscopía son: la ventana o rendija de entrada, a través de la cual se introduce la radiación policromática al sistema; el elemento dispersivo que separa las radiaciones monocromáticas en función de su longitud de onda; y la rendija secundaria, a través de la cual se conducen al detector, las radiaciones monocromáticas.

La radiación monocromática que sale a través de la rendija secundaria, es recogida por un tubo fotomultiplicador que transforma la señal óptica en impulsos eléctricos que son convenientemente amplificados y tratados para su identificación y cuantificación.

La mayoría de los instrumentos disponen de sistemas de proceso de datos que permiten:

- Automatizar el conjunto generador del plasma
- Automatizar el sistema introductor de la muestra
- Automatizar y controlar el sistema óptico
- Efectuar la recogida y tratamiento de espectros
- Confeccionar curvas de calibrado
- Calcular las concentraciones de los elementos en la muestra
- Efectuar correcciones del fondo espectral y de solapamiento de líneas
- Cálculos estadísticos

4.3.6.2. Procedimiento Analítico.

En principio, en una balanza Mettler H51AR con apreciación de 0,01 mg, fueron pesados 0,1 gramos de muestra, provenientes de la cabeza del ciclón, así como de la flotación, y de cada uno de los productos obtenidos en los ensayos exploratorios y experimentales; asimismo, se pesaron 0.5 gramos de Tetraborato de Litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) para trabajar en una proporción 5:1. Una vez pesados, se colocaron en crisoles de grafito, a manera de “sándwich”, es decir, (tetraborato + muestra + tetraborato), de manera de garantizar el total cubrimiento de la muestra por dicho fundente.

Estos preparados (“sándwich”) fueron luego colocados en una mufla a 450 °C por 5 minutos, para lograr extraer cualquier partícula de agua retenida que pudiera afectar el posterior proceso de fusión, el cual se llevó a cabo en otra mufla a 950 °C por espacio de 15 minutos.

A continuación, se preparó una solución al 5% de ácido nítrico (HNO_3) para disponer de ésta 50 ml y disolver la perla formada con la fundición anterior. Asimismo, se acondicionó una serie de planchas y agitadores magnéticos para llevar a cabo la disolución, tal como se observa en la Figura 31. Una vez disueltas, las soluciones fueron trasvasadas a balones aforados de 100 ml, los cuales fueron enrasados con agua destilada (Figura 32).



Fig. 31. Dilución de Perla en HNO_3 sobre Planchas Eléctricas con Calentamiento y Agitadores Magnéticos.

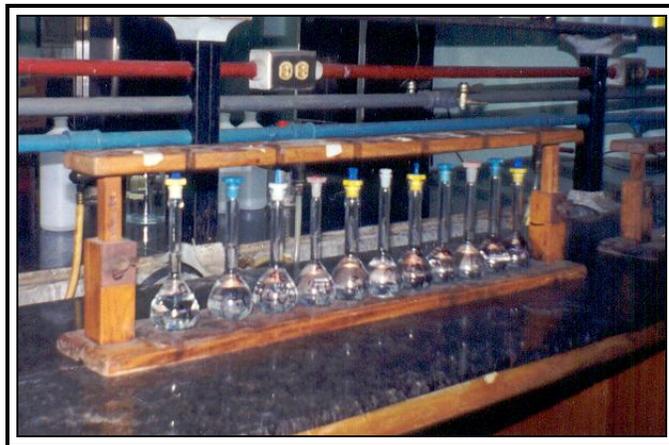


Fig. 32. Balones Aforados con la Perla Diluida.

La curva de calibración necesaria para la comparación de las soluciones problema, con las soluciones estándar de concentración conocida del elemento a determinar, fueron realizadas directamente por el equipo de IPC, y de esta manera se prepararon patrones multielementales de Al y Si, además de los llamados “blancos” contentivos sólo de tetraborato de litio diluido en ácido nítrico al 5%.

4.3.6.3. Resultados de los Análisis Químicos

La escogencia de los elementos Al y Si para ser determinados por el equipo ICP, se debió a que éstos son los elementos mayoritarios de los minerales de interés (mica y cuarzo). Los mismos se consideran indicadores de la presencia de dichos minerales.

Las concentraciones de Si y Al, así como su expresión en óxidos (ver anexo N° 4) en las muestras cabeza del ciclón y cabeza de la flotación, se muestran en las tablas 8 y 9, respectivamente.

Elemento	Conc. (ppm)	Óxido	(%)	Q* (%)	M* (%)	C* (%)	Total Q (%)	Total Mi (%)
Si	313	SiO ₂	67,70	54,18	9,07	36,75	54,18	45,82
Al	70	Al ₂ O ₃	13,37					

(*) Q : Cuarzo; M : Muscovita; C: Clorita; Mi: Mica

Tabla 8. Concentraciones de Elementos Mayoritarios presentes en la Muestra Cabeza del Ciclón

Elemento	Conc. (ppm)	Óxido	(%)	Q* (%)	M* (%)	C* (%)	Total Q (%)	Total Mi (%)
Si	303	SiO ₂	64,91	49,95	10,88	39,17	49,95	50,05
Al	77,8	Al ₂ O ₃	14,72					

(*) Q : Cuarzo; M : Muscovita; C: Clorita; Mi: Mica

Tabla 9. Concentraciones de Elementos Mayoritarios presentes en la Muestra Cabeza de la Flotación

4.4. Ensayos Experimentales

Una vez caracterizada la muestra, se continua con los ensayos experimentales de laboratorio, que están constituidos por las operaciones de preparación y

concentración de menas, tal como se encuentra señalado en el capítulo 3. A los fines de este trabajo, dichas operaciones se fundamentan en un estudio de moliendabilidad, experimentos de clasificación dimensional, ensayos exploratorios de concentración y experimentos de concentración, para obtener de la mena objeto estudio, la respuesta idónea a las exigencias industriales.

4.4.1. Estudio de Moliendabilidad

Luego de la etapa de la trituración secundaria, el producto mineral obtenido se presenta en condiciones inadecuadas, tanto física como químicamente, para un uso industrial conocido. Por lo que se hace necesario realizar una tercera etapa de molienda de minerales, para disminuir de tamaño aún más, la mica objeto de estudio, logrando separarla efectivamente del cuarzo.

El material que no fue triturado suficientemente en la trituración secundaria, resultó en un producto grueso y, aunque presenta un grado de liberación adecuado, contiene gran cantidad de mixtos, por lo que tendrá una pobre relación de enriquecimiento y recuperación en la etapa de concentración. Asimismo, el material triturado innecesariamente reduce el tamaño de partícula de la ganga y puede reducir el tamaño de partícula del mineral de valor por debajo del tamaño requerido para una separación eficiente. En ambos aspectos se requiere un gasto excesivo de energía; por lo tanto, un análisis de moliendabilidad permitirá establecer los tiempos necesarios y suficientes para obtener la mena totalmente liberada a un tamaño óptimo.

En este sentido, se prepararon 4 Kg. de material como alimentación para el molino de barras marca Denver, constitutivo de 10 barras de 30 cm de longitud. Cada kilogramo fue destinado para un tiempo de estadía en el molino a razón de 3 minutos, con el fin de determinar la distribución granulométrica del producto en esos tiempos y, a su vez, construir la gráfica Gaudin – Schuhman, la cual relaciona los resultados granulométricos con el tiempo necesario para lograr un producto triturado a una malla dada.

Dichos datos se pueden observar en la tablas 10, 11, 12, 13, 14 y en la Figura 33, que a continuación se muestran.

Malla			Retenido	Pasante	
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
# 6	3,35	98,9	5,24835491	5,24835491	94,7516451
# 8	2,36	143	7,58862237	12,8369773	87,1630227
# 12	1,7	200,9	10,6612184	23,4981957	76,5018043
# 16	1,18	237,7	12,6140947	36,1122904	63,8877096
# 20	0,85	198,5	10,5338569	46,6461473	53,3538527
# 30	0,6	213	11,3033326	57,9494799	42,0505201
# 50	0,3	244,6	12,980259	70,9297389	29,0702611
# 70	0,212	115,2	6,11335173	77,0430906	22,9569094
# 100	0,15	127,5	6,76607939	83,80917	16,19083
# 120	0,125	45,8	2,43048185	86,2396519	13,7603481
# 150	0,1	35,6	1,8891955	88,1288474	11,8711526
# 200	0,075	86,1	4,56909361	92,697941	7,30205901
# -200	<0,075	137,6	7,30205901	100	0
Total		1884,4*			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 10. Análisis Granulométrico de la Muestra Cabeza del Ciclón

Malla			Retenido		Pasante
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
# 12	1,7	35,1	3,52197471	3,52197471	96,4780253
# 16	1,18	63,1	6,33152719	9,85350191	90,1464981
# 20	0,85	84,8	8,50893036	18,3624323	81,6375677
# 30	0,6	132,5	13,2952037	31,657636	68,342364
# 50	0,3	186,4	18,7035922	50,3612282	49,6387718
# 70	0,212	88,3	8,86012442	59,2213526	40,7786474
# 100	0,15	112,6	11,2984146	70,5197672	29,4802328
# 150	0,1	79,8	8,00722456	78,5269918	21,4730082
# 200	0,075	76,5	7,67609874	86,2030905	13,7969095
# 270	0,053	72,3	7,25466586	93,4577564	6,54224363
# 325	0,045	18,3	1,83624323	95,2939996	4,7060004
# -325	<0,045	46,9	4,7060004	100	0
Total		996,6*			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 11. Análisis Granulométrico del Producto de la Molienda de 3 Minutos

Malla			Retenido		Pasante
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
# 30	0,6	171	17,1102662	17,1102662	82,8897338
# 50	0,3	198,3	19,8419051	36,9521713	63,0478287
# 70	0,212	108	10,8064839	47,7586552	52,2413448
# 100	0,15	125	12,5075045	60,2661597	39,7338403
# 150	0,1	100	10,0060036	70,2721633	29,7278367
# 200	0,075	98,3	9,83590154	80,1080648	19,8919352
# 270	0,053	106,2	10,6263758	90,7344407	9,26555934
# 325	0,045	41,7	4,1725035	94,9069442	5,09305583
# -325	<0,045	50,9	5,09305583	100	0
Total		999,4*			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 12. Análisis Granulométrico del Producto de la Molienda de 6 Minutos

Malla			Retenido		Pasante
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
# 30	0,6	127,9	12,8182	12,8182	87,1818
# 50	0,3	169,7	17,0074163	29,8256164	70,1743836
# 70	0,212	106,1	10,6333935	40,4590098	59,5409902
# 100	0,15	151	15,1332932	55,5923031	44,4076969
# 150	0,1	97,5	9,77149729	65,3638004	34,6361996
# 200	0,075	115,7	11,5955101	76,9593105	23,0406895
# 270	0,053	123,4	12,3672079	89,3265183	10,6734817
# 325	0,045	51,3	5,14131088	94,4678292	5,53217078
# -325	<0,045	55,2	5,53217078	100	0
Total		997,8*			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 13. Análisis Granulométrico del Producto de la Molienda de 9 Minutos

Malla			Retenido		Pasante
A.S.T.M	Abertura (mm)	Peso (gr)	%	sum %	sum %
# 30	0,6	59,4	5,94773205	5,94773205	94,0522679
# 50	0,3	145,6	14,5789526	20,5266847	79,4733153
# 70	0,212	117	11,7152298	32,2419145	67,7580855
# 100	0,15	157,8	15,8005407	48,0424552	51,9575448
# 150	0,1	107,8	10,7940322	58,8364874	41,1635126
# 200	0,075	142,6	14,2785621	73,1150496	26,8849504
# 270	0,053	162,3	16,2511265	89,366176	10,633824
# 325	0,045	83,1	8,32081706	97,6869931	2,31300691
# -325	<0,045	23,1	2,31300691	100	0
Total		998,7			

(*) Cifra considerada como 100%

Tabla 14. Análisis Granulométrico del Producto de la Molienda de 12 Minutos

Como puede observarse, la molienda de 3 minutos arroja un resultado de porcentaje retenido sobre la malla 70 de 59.22%, mientras que para un tiempo de 6 minutos, por encima de la malla 100, se encuentra el 60,26% del material; para 9 minutos, el 65,36% es mayor de la malla 150; y para 12 minutos, el porcentaje retenido es de un 58,83% sobre la misma malla. En el gráfico de la figura 33 también puede notarse el paralelismo de las curvas de distribución, partiendo de la referencia de la muestra cabeza, que es producto de los cilindros trituradores.

La recta que se indica en el gráfico Gaudin – Schuhman (Fig. 33), representa el parámetro que ha de interceptarse para conseguir el tiempo de molienda adecuado para una malla específica. Dicha recta tiene un ángulo de 60,46°, que en radianes representa 1,055 Rad. Así, el porcentaje pasante a cualquier malla va a estar dado en función a un módulo de tamaño “K”. Dicha expresión está dada por la fórmula 3.3.

$$Pp = 100 \times \left(\frac{d}{k} \right)^\alpha$$

En donde; Pp: Porcentaje Pasante a la Dimensión d (3.3)
 α : Módulo de Distribución

De esta manera, si se despeja “K”, se obtiene la dimensión que habrá de colocarse en el eje de las abscisas. Con este valor se intercepta luego la recta, y se desplaza horizontalmente al eje de las ordenadas, ubicando así, el tiempo de molienda necesario para conseguir el 90% pasante de un tamaño de malla de dimensión “d”.

Con esta metodología, se calculó el tiempo de molienda necesario para obtener el 90% de los tamaños de partículas menores a la malla 30, el cual fue de 5,2 minutos. La escogencia de la malla 30 se debió a que a partir de este tamaño, con esta mena micácea en particular, se logra conseguir que el concentrado a obtener por flotación con espuma, cumpla con el mayor rango de especificación comercial de las micas.

4.4.2. Experimentos de Clasificación Isodrómica

Para llevar a cabo la clasificación por medio del ciclón neumático, se llevaron a la alimentación del mismo, un grupo de cantidades de muestra a manera de exploración, para conocer el tamaño máximo que podía admitir el equipo, así como los productos obtenidos con algunas variaciones de las válvulas de control de aire.

En este sentido, el equipo trabaja en condiciones estables con una cantidad de 200 a 300 gramos de material, ya que, de otra manera, el tornillo sin fin que regula la alimentación, sufre trabas en su mecanismo. Asimismo, el tamaño máximo de grano admitido debe ser menor a malla 8, por las mismas limitaciones anteriores; de manera

que todo el material a ensayar se trataba previamente en el molino de barras, para obtener un producto pasante 90% de la malla 8, lo cual se conseguía con un tiempo de 30 segundos, determinado por la gráfica de Gaudin Schuhman. El tiempo de ejecución del ensayo en el ciclón neumático, se fijó en 3 minutos de duración para todas las pruebas.

Del ciclón neumático de laboratorio se obtienen tres productos, cuyas nomenclaturas establecidas para este trabajo son: el producto A, (P_A), obtenido en la descarga del clasificador; el producto B, (P_B), adquirido en el colector; y el fino, (P_C), recogido en las bolsas colocadas en la parte dorsal del equipo.

Las variaciones de las válvulas de control de aire a las que se hace referencia, se vincula a la única variable que para este equipo se ha considerado evaluar, tomada de un conjunto posible de variables que está compuesto, además de la escogida, por el tamaño de alimentación y la razón de alimentación. El tamaño de alimentación es el proveniente de una trituración previa con una granulometría dada, y el propósito es evaluar la clasificación del material dentro de ese rango de tamaños; asimismo, la razón de alimentación es constante, ya que está gobernada por las revoluciones por minuto fijas, impartidas por el motor.

En el ciclón neumático se distinguen 2 válvulas importantes de control de aire, con 7 niveles de variación de caudal cada una, los cuales fueron ajustados por observación. Existe una tercera válvula, colocada detrás del colector, que sólo permanece abierta o cerrada. Para contabilizar dichos niveles, se hizo uso de un anemómetro (ver Figura 34) para medir la velocidad del aire admitido a través de cada

válvula y, con el diámetro de las mismas, se obtuvo el caudal de entrada convertido a galones por minuto. Tales resultados se reflejan en la tabla 15.

	Niveles de Variación del Caudal de Aire	Caudal de Aire (gal/min)
VÁLVULA "A"	100% Abierta	129,51
	83% Abierta	104,51
	66% Abierta	95,71
	50% Abierta	79,24
	33% Abierta	62,20
	16% Abierta	32,66
	0% Abierta	0
VÁLVULA "B"	100% Abierta	131,88
	83% Abierta	124,49
	66% Abierta	104,09
	50% Abierta	82,08
	33% Abierta	57,37
	16% Abierta	26,69
	0% Abierta	0

Tabla 15. Caudales de Aire en las Válvulas del Ciclón Neumático.

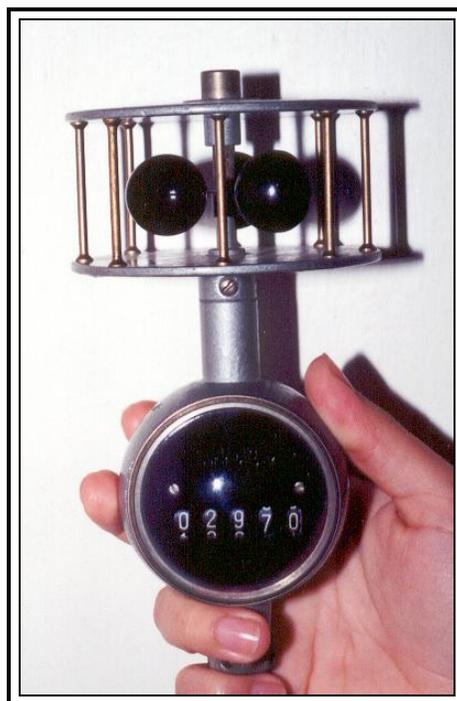


Figura 34. Anemómetro. Instrumento de Medición de Velocidad de Aire.

Una vez determinados los niveles de variación de caudal, se examinaron distintas combinaciones de aberturas de válvulas, para establecer la más conveniente entre ellas. En este sentido, la selección de los productos adecuados se basó en la observación directa, escogiendo aquella combinación con la cual se presentara mayor cantidad en peso recogido en las bolsas. La observación directa permitiría la evaluación macroscópica de las cantidades de mica y cuarzo clasificadas; y el peso recogido en las bolsas, indicaría la mayor cantidad de finos que pudiera extraerse de la alimentación.

En la tabla 16 se muestra las 20 combinaciones ensayadas con los respectivas masas recogidas en cada uno de los productos, expresadas en porcentaje.

Combinación	% masa en Pa	% masa en Pb	% masa en Pc
A1B1C1	93,28	4,11	2,61
A1B1C2	86,65	9,09	4,27
A1B7C1	92,19	4,17	3,64
A6B1C2	71,41	14,25	14,34
A4B1C2	75,36	16,70	7,94
A2B1C2	67,71	13,48	18,81
A6B4C2	44,86	25,27	29,87
A6B4C1	60,10	6,01	33,89
A6B1C1	43,41	21,42	35,17
A6B2C1	63,94	3,23	32,83
A6B3C1	66,40	14,40	19,19
A6B5C1	61,37	6,35	32,27
A6B6C1	59,03	7,83	33,14
A4B2C1	63,72	10,01	26,27
A4B4C1	67,24	10,51	22,25
A2B6C1	66,40	7,98	25,62
A4B6C1	66,11	12,52	21,36
A2B4C1	65,41	11,17	23,42
A5B6C1	61,67	5,46	32,87
A5B4C1	46,14	17,37	36,49

(*) 1: 100% Abierta; 2: 83% Abierta; 3: 66% Abierta; 4: 50% Abierta; 5: 33% Abierta; 6: 16% Abierta; 7: 0% Abierta; C1: Abierta; C2: Cerrada

Tabla 16. Reporte de Combinaciones de Válvulas para Experimentos de Clasificación

Para cada abertura de válvula se estimó el promedio de las masas recogidas en las bolsas (P_c), obteniéndose los resultados representados en el gráfico comparativo de la figura 35. De igual forma, en la figura 36, se muestra la correspondencia existente entre cada una de las combinaciones ensayadas con su respectivo porcentaje en peso de P_c .

La figura 35, refleja el punto más alto para el cual la válvula “A” tiene el mayor porcentaje de material en P_c , esto es, una abertura del 33% para un P_c de 35%, por lo tanto, el 35% del material alimentado se recoge en las bolsas en una graduación de válvula del 33% (62,20 gal/min) de la válvula “A”. Por otro lado, la válvula “B” presenta la mayor elevación en su curva, a una abertura igualmente de 33% (57,37 gal/min), reportando en P_c un porcentaje de 32,27% de la masa total.

De esta manera, los resultados así expresados, indican las mejores condiciones para las cuales las válvulas “A” y “B”, de una manera independiente, extraen la mayor cantidad de material fino hacia las bolsas. Sin embargo, el funcionamiento del ciclón neumático se hace bajo una combinación de aberturas de válvulas cuyos resultados se mostraron anteriormente en la tabla 16; las mismas fueron enumeradas en forma ascendente para señalar los 20 casos ensayados y los resultados se muestran en la figura 36. En este gráfico, puede examinarse el comportamiento de cada uno de dichos casos en el producto recogido en las bolsas, donde resalta claramente el caso 20 (A5B4C1) como la combinación que arroja un producto óptimo, siendo éste el caso escogido finalmente como la forma de obtener el material en P_A y P_B , que constituiría la alimentación del proceso de concentración por flotación con espuma.

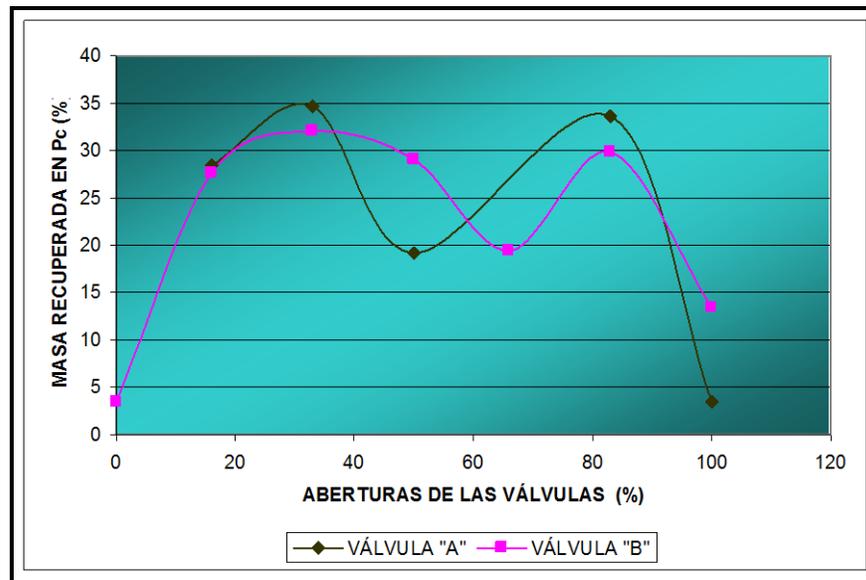


Fig. 35. Representación del Producto Pc obtenido en el Ciclón Neumático de acuerdo a distintas Aberturas de Válvulas

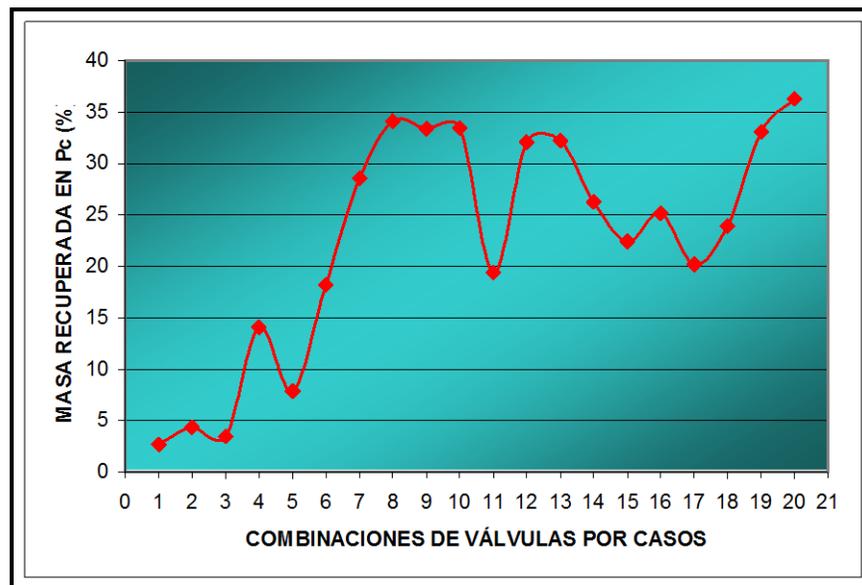


Fig. 36. Representación del Producto Pc obtenido en el Ciclón Neumático de acuerdo a las 20 Combinaciones de Aberturas de Válvulas

En lo que respecta a la Válvula C, dado que solo es posible modificarla en dos posiciones, abierta o cerrada, se observa en la figura 37 el comportamiento de ambas categorías, de lo que se aprecia una notable eliminación del material fino si ésta

permanece abierta; condición bajo la cual fue considerada finalmente para los experimentos subsiguientes.

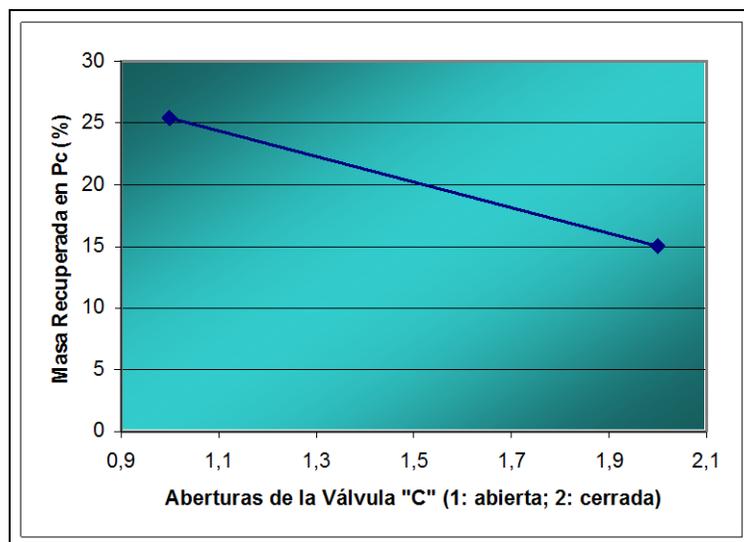


Fig. 37. Representación Gráfica del Producto Pc obtenido en el Ciclón Neumático de acuerdo a las Aberturas de la Válvula "C".

4.4.2.1. Eficiencia del Ciclón Neumático.

Existe un método para interpretar la precisión de la clasificación en los clasificadores neumáticos. Gráficamente, se representa la eficiencia del ciclón con una *curva de partición o de reparto*, la cual muestra la fracción en porcentaje de lo que se reporta en el producto en relación con la alimentación. El punto de corte o tamaño de separación del ciclón es definido frecuentemente como el punto d_{50} en la curva de partición, para el cual, como resultado de la acción de clasificación, el porcentaje de rechazo presente en el producto pasado sería igual al porcentaje de finos con el rechazo; es decir, las partículas que tengan este tamaño tienen igual oportunidad de ir a la descarga inferior que al derrame. De este modo, la eficiencia de separación o índice de imperfección, viene dado por:

$$i = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (4.1)$$

Este índice es proporcional a la inclinación de la curva de separación. En el caso de una separación perfecta, dicha inclinación sería vertical y daría por tanto un coeficiente de imperfección nulo.

La imperfección en el caso de los clasificadores neumáticos de aire corriente es cercana a 0,5 – 1, y desciende difícilmente por debajo de 0,28 en los clasificadores más sofisticados (FUEYO, L. ,1999).

Para el ciclón neumático de Laboratorio Denver, se escogieron cuatro (4) de las mejores combinaciones de válvulas que reportaran la mayor cantidad de finos en Pc; con las mismas se hizo la representación de las curvas de reparto respectivas, tal como se muestra en las figuras 38, 39, 40 y 41.

Del gráfico de la Figura 38 se obtienen un $d_{25} = 0.145$ mm; $d_{50} = 0.27$ mm y un $d_{75} = 0.7$ mm. De la fórmula 3.4, se obtiene:

$$i = \frac{(0.7 - 0.145)}{(2 \times 0.27)} = 1.027$$

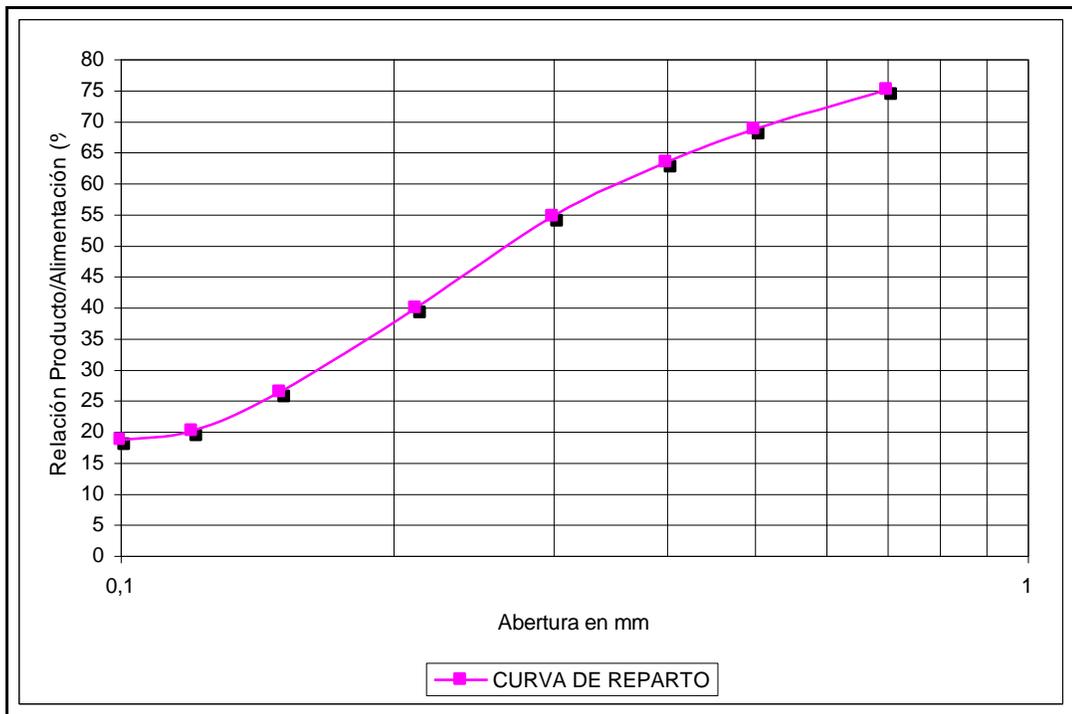


Fig. 38. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las Condiciones de Aberturas de Válvulas A5B4C1

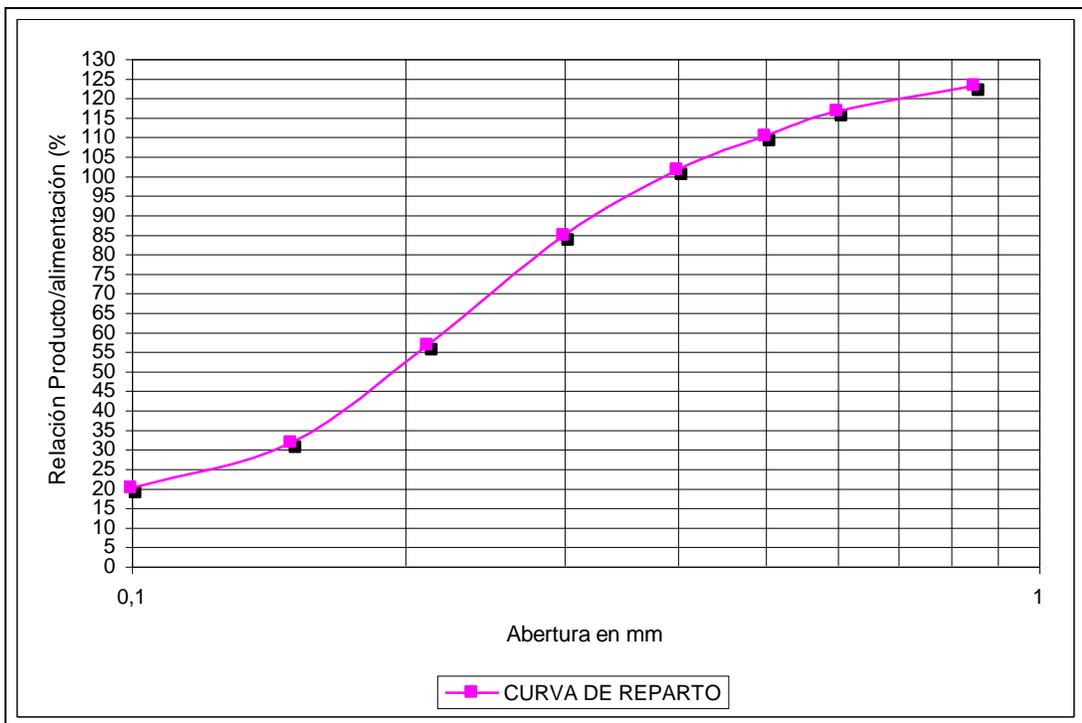


Fig. 39. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las Condiciones de Aberturas de Válvulas A5B6C1

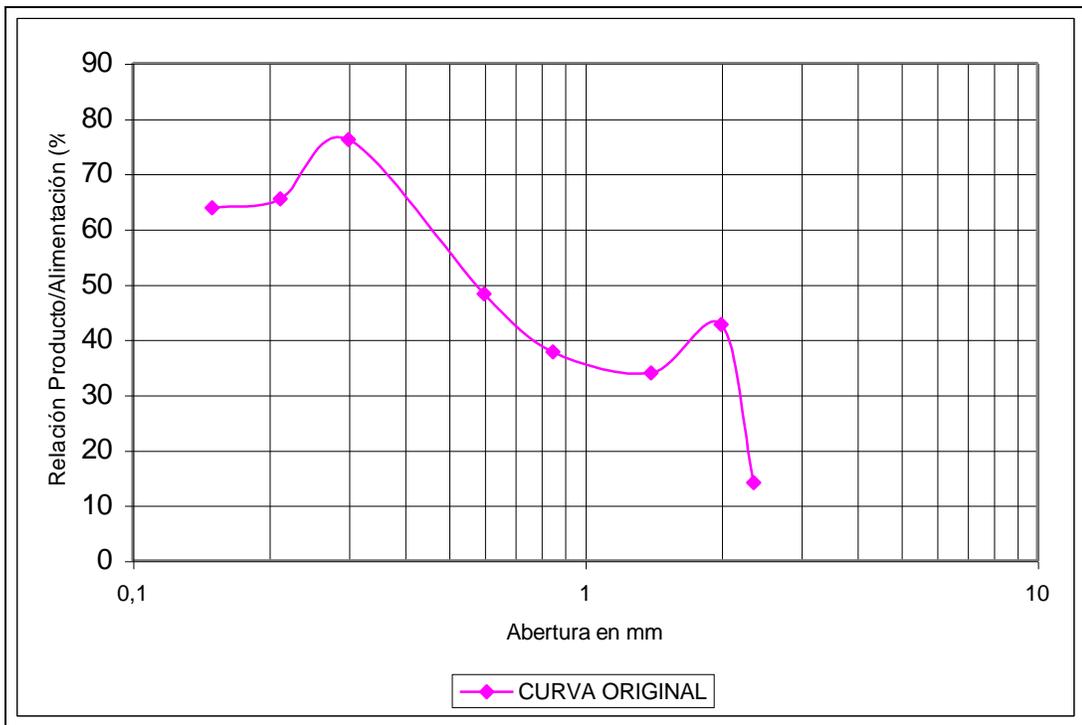


Fig. 40. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las Condiciones de Aberturas de Válvulas A6B1C1

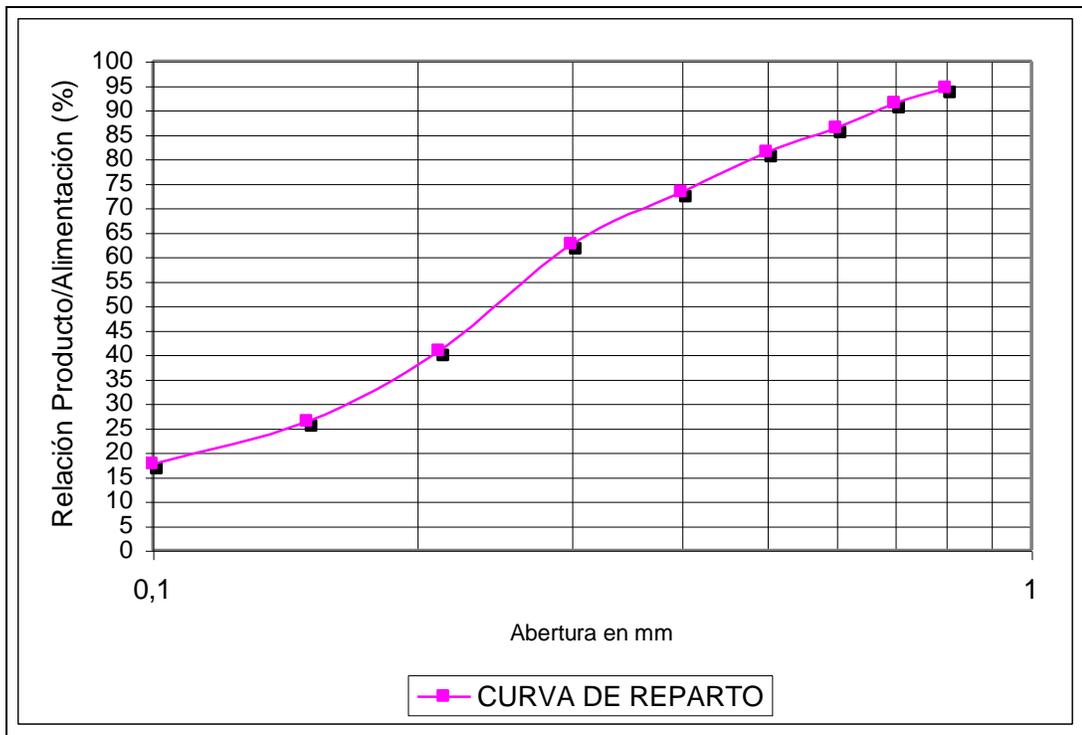


Fig. 41. Curva de Reparto para el Ciclón Neumático en las Condiciones de Aberturas de Válvulas A6B4C1

De igual forma, para los gráficos representados en las figuras 39, 40 y 41, se tienen los siguientes diámetros y respectivos índices de imperfección:

CASO	d_{25}	d_{50}	d_{75}	i
A5B6C1	0.122	0.19	0.27	0.389
A6B1C1	-	-	-	-
A6B4C1	0.145	0.245	0.42	0.561

Como se puede observar en el gráfico respectivo, la condición A6B1C1 se presenta muy irregular, probablemente debido a una sobrecarga en la alimentación que es la causa más común de ineficiencia, por lo que su desempeño en la clasificación no se puede medir con exactitud. La combinación en donde el ciclón neumático trabaja con mayor eficiencia es la A5B6C1; sin embargo, la escogencia del primer caso (A5B4C1), se decide debido a la mayor cantidad de finos que se recoge en las bolsas, tal como se muestra en la tabla 16, condición de importancia para los experimentos posteriores. Si éste no fuera el caso, la escogencia de la condición óptima sería el caso A5B6C1 o de otra manera el caso A6B4C1. De cualquier forma, con las curvas de partición, se refleja su alcance en el estudio del desempeño del ciclón neumático, logrando ajustar y/o adoptar los resultados que mejor se relacionen con la naturaleza de la investigación.

Los resultados en la curva de reparto arrojan un tamaño de corte (d_{50}) aproximadamente en la malla 70 (0.212 mm), lo que refleja la gradación de tamaños gruesos (-8+70) que se encuentran en la descarga inferior; dejando en la descarga superior, el material más fino no deseado para los ensayos posteriores de concentración por flotación.

Si bien es cierto que en dicho material fino se encuentra mineral útil (mica), los análisis químicos realizados a la muestra de la alimentación del ciclón, y a la del producto de la descarga inferior del mismo (alimento de flotación), indican la considerable disminución y aumento de las proporciones de cuarzo y mica respectivamente, tal como se mostró en las tablas 8 y 9, probando la eficiencia que, para el caso particular del presente trabajo, se ha requerido.

Como punto aparte, en el anexo N° 5 se puede observar el diagrama de proceso diseñado para las condiciones finales del Ciclón Neumático de Laboratorio, el cual representa de manera esquemática la forma de trabajo del equipo que puede asistir a la comprensión de dicho mecanismo para operaciones futuras.

4.4.3. Ensayos Exploratorios de Concentración

El objetivo principal de esta fase es el de establecer las condiciones de flotabilidad de la mena y comprobar la respuesta de la misma a dicho proceso. Se operó con 200 gr. de material con una granulometría ubicada dentro de un rango de tamaños menor de malla 30 y mayor de malla 200. La escogencia del método de flotación para concentrar finalmente la mena objeto de estudio, se debe a los resultados inexactos arrojados por otras pruebas de concentración por gravedad, empleando el método de mesas y canales, y del espiral Humphreys, los cuales no lograron efectuar la separación de la mica y el cuarzo efectivamente, en razón a la semejanza de valores entre sus densidades.

La muestra utilizada en esta etapa del trabajo corresponde al producto mezclado adecuadamente P_A y P_B , proveniente del clasificador neumático, cuya distribución granulométrica de la condición escogida se muestra en la tabla 17 y gráficamente en la Figura 42. Con el fin de alcanzar una cantidad suficiente de material para estos ensayos, se ejecutaron varios pases por el ciclón, a fin de obtener cerca de 5 kg de material, el cual fue posteriormente molido aproximadamente por debajo de la malla 30, haciendo uso del gráfico de Gaudin Schuhman; obteniendo, de esta manera, el tiempo requerido en alcanzar ese tamaño de partícula ubicado en los 5,2 minutos.

Malla A.S.T.M			Retenido %	sum %	Pasante sum %
	Abertura (mm)	Peso (gr)			
# 8	2,36	21,7095761	21,7530822	21,7530822	78,2469178
# 10	2	8,39391995	8,41074143	30,1638237	69,8361763
# 14	1,4	14,4618139	14,4907955	44,6546192	55,3453808
# 20	0,85	20,6982604	20,7397399	65,3943591	34,6056409
# 30	0,6	13,7876034	13,8152339	79,209593	20,790407
# 50	0,3	11,7649721	11,7885492	90,9981422	9,00185779
# 70	0,212	4,0115521	4,01959129	95,0177335	4,98226651
# 100	0,15	3,00023645	3,00624894	98,0239824	1,97601756
# -100	< 0,15	1,97206552	1,97601756	100	0
Total		99,8*			

(*) Cifra tomada como 100%

Tabla 17. Análisis Granulométrico del Producto del Ciclón Neumático. Combinación A5B4C1. P_A y P_B .

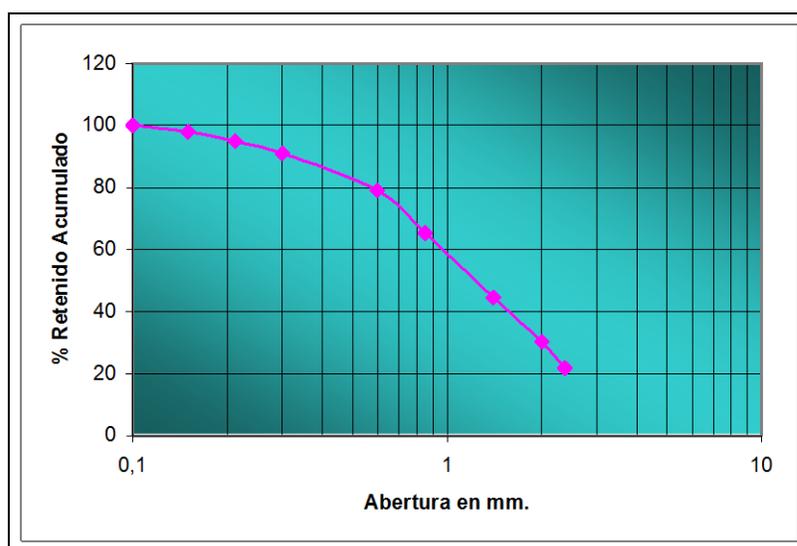


Fig. 42. Curva Granulométrica del Producto del Ciclón Neumático. Combinación A5B4C1. P_A y P_B .

La existencia de un porcentaje retenido en la malla 8 de un 21,75% obedeció probablemente a un tiempo insuficiente para lograr alcanzar un 90% pasante de esta malla, tal y como fue calculado con base en la fórmula de la gráfica Gaudin Schuhman, para un 90% pasante de la malla 8. Sin embargo, esto se justifica por el carácter teórico que tiene dicha gráfica y los datos que de ella se recojan son aproximados a los del verdadero comportamiento del material, sin dejar por ello de ser un indicador útil para la evaluación de un tiempo de molienda dado.

Como base de estudio para los ensayos exploratorios, se consideró el reporte de “Mica” publicado por el Industrial Mineral Handbook de 1994, el cual reseña el proceso de beneficio realizado a la mica en hojuelas recuperada de una mina de alaskita en los Estados Unidos. En el mismo se establece, que “el material fino de tamaño –30 mallas es deslamado para eliminar lo contenido en –80 o –100 mallas. Una vez obtenida esta pulpa, se alimenta a un circuito de flotación que puede ser trabajado en un medio ácido con ácido sulfúrico y amina (2.5 a 4 pH), o bien, puede optarse por un medio alcalino (7.5 a 9 pH) con hidróxido de sodio y amina” (TANNER, J. en CARR, Donald.; 1994). De esta manera se ejecutaron pruebas misceláneas, que se constituyeron en pruebas de reconocimiento del comportamiento de la mena al proceso, así como los ajustes requeridos en manipulación y adiestramiento para conocer las acciones a seguir. En consecuencia, se consideró trabajar todos los ensayos en un medio alcalino, debido a que en la práctica industrial, un medio ácido puede ser perjudicial para la vida útil de las celdas de flotación, además de encarecer los costos por el empleo de ácidos como reactivos; los demás parámetros fijados se muestran en la tabla 18 en un grupo de 4 flotaciones correspondientes a esta etapa exploratoria.

El reactivo utilizado fue Amina Flotigam EDA-3B, marca Clariant, diluida al 50%, con una densidad de $0,87\text{gr}/\text{cm}^3$, suministrada por la empresa C.V.G. Ferrominera S.A. Este reactivo actúa con doble papel de colector y espumante, por lo que no fue necesario la adición de este último reactivo. El agregado del silicato de sodio responde a que éste se constituye en un depresor de silicatos, condición natural del cuarzo, de allí el interés para deprimirlo y constituir una flotación de tipo directa. Asimismo, se utilizó la celda de flotación de laboratorio de 500 ml de capacidad, cuyo volumen fue empleado para preparar la pulpa. A continuación se ejemplifica el cálculo del peso de sólido para un 25% de sólido en la pulpa:

$$V \text{ de la pulpa} = V \text{ sólido} + V \text{ agua}$$

considerando la densidad del agua igual a $1 \text{ gr}/\text{cm}^3$, se tiene:

$$\text{Peso del sólido} = \frac{25\% * 600\text{gr}}{75\%} = 200\text{gr}$$

Para una pulpa de 30% y 35% se fijó la masa de sólido (200gr) y se obtuvo la diferencia en agua. Por lo tanto;

Densidad de Pulpa	
25%	Peso del sólido seco = 200 gr Volumen de agua = 600 ml
30%	Peso del sólido seco = 200 gr Volumen de agua = 466,6 ml
35%	Peso del sólido seco = 200 gr Volumen de agua = 371,4 ml

El acondicionamiento sin entrada de aire se estimó en 5 minutos, dentro de los cuales 2 minutos correspondieron al acondicionamiento con el NaOH, 2 minutos para el del silicato de sodio y 1 minuto para el de la amina. La recolección de la espuma se realizó en un período de 2 minutos, cuyo espesor se encontraba entre los 8 a 10 cm; se

procedió al filtrado de productos (concentrados y colas), y secado en estufa a 100 - 150°C.

PRUEBA	VARIABLES	REACTIVOS
1	RPM = 1100 PULPA = 25%	pH = 10 NaSiO ₂ = 1050 gr/ton (0,142 cc) Amina = 522 gr/ton (0,12 cc)
2	RPM = 1200 PULPA = 25%	pH = 10 NaSiO ₂ = 1050 gr/ton (0,142 cc) Amina = 522 gr/ton (0,12 cc)
3	RPM = 1100 PULPA = 30%	pH = 10 NaSiO ₂ = 1050 gr/ton (0,142 cc) Amina = 522 gr/ton (0,12 cc)
4	RPM = 1100 PULPA = 35%	pH = 10 NaSiO ₂ = 1050 gr/ton (0,142 cc) Amina = 522 gr/ton (0,12 cc)

Tabla 18. Condiciones de los Ensayos Exploratorios de Flotación.

Habiéndose realizado las 4 flotaciones bajo las condiciones señaladas, se obtuvieron dos productos de cada una de ellas, tal como se muestra en la tabla 19:

- Concentrado (CON): Espuma mineralizada de mica
- Cola (COL): Pulpa que permanece en la celda, contentiva de cuarzo

Para efectuar el análisis del efecto de cada variable en la masa del concentrado, la recuperación, y el porcentaje de mica obtenido en el producto, se hizo uso de la estadística de toma de decisiones para obtener la “gran media” de los resultados. En la tabla 20, se señalan dichos promedios y su representación gráfica está dada por las figuras 43 y 44.

Prueba	Producto	Peso (gr.)	Óxido	Óxido (%)	Q* (%)	M* (%)	C* (%)	Total Q (%)	Total Mi (%)	R* (%)	K*
1	CABEZA	200	SiO ₂	64,91	49,95	10,88	39,17	49,95	50,05	63,27	2,47
			Al ₂ O ₃	14,72							
	CON	48,6	SiO ₂	47,50	21,86	28,63	49,51	21,86	78,14		
			Al ₂ O ₃	24,32							
	COL	146,2	SiO ₂	77,36	69,09	1,77	29,14	69,09	30,91		
			Al ₂ O ₃	8,52							
2	CABEZA	200	SiO ₂	64,91	49,95	10,88	39,17	49,95	50,05	51,57	2,93
			Al ₂ O ₃	14,72							
	CON	55,9	SiO ₂	47,11	24,26	17,58	58,17	24,26	75,74		
			Al ₂ O ₃	22,41							
	COL	139,2	SiO ₂	74,51	63,23	0,00	36,77	63,23	36,77		
			Al ₂ O ₃	7,25							
3	CABEZA	200	SiO ₂	64,91	49,95	10,88	39,17	49,95	50,05	56,47	2,70
			Al ₂ O ₃	14,72							
	CON	48,2	SiO ₂	49,50	23,71	31,79	44,50	23,71	76,29		
			Al ₂ O ₃	24,18							
	COL	147,4	SiO ₂	74,73	65,39	0,00	34,61	65,39	34,61		
			Al ₂ O ₃	8,64							
4	CABEZA	200	SiO ₂	64,91	49,95	10,88	39,17	49,95	50,05	36,84	3,43
			Al ₂ O ₃	14,72							
	CON	43,4	SiO ₂	50,63	25,50	30,78	43,72	25,50	74,50		
			Al ₂ O ₃	23,59							
	COL	153,9	SiO ₂	67,23	52,18	0,00	47,82	52,18	47,82		
			Al ₂ O ₃	8,91							

(*) Q: Cuarzo; M: Muscovita; C: Clorita; R: Recuperación; K: G. de Concentración.; Mi: Mica.

Tabla 19. Resultados de los Productos de los Ensayos Exploratorios de Flotación

De la tabla 19 se deduce que, con la combinación 1, de variables prefijadas a 1100 RPM y pulpa de 25%, se obtienen resultados favorables, en cuanto a la cantidad de mica recogida en el concentrado, representada en 78,14%, con una recuperación de la muestra inicial del 63,27%. Estos resultados constituyen los más favorables de todas las condiciones, haciéndose definitivo el establecimiento de esta combinación para continuar con las variaciones de los análisis experimentales posteriores.

A = RPM		B = Pulpa							
A1 = 1100		B1 = 25 %							
A2 = 1200		B2 = 30%							
		B3 = 35%							
Combinación	Masa del Conc.	% R	% Mica	K		Masa del Conc.	% R	% Mica	
A1B1	48,6	63,27	78,14	2,47	A1	46,73	52,19	76,31	
A1B2	48,2	56,47	76,29	2,7	A2	55,9	51,57	75,74	
A1B3	43,4	36,84	74,5	3,43	B1	52,25	57,42	76,94	
A2B1	55,9	51,57	75,74	2,93	B2	48,2	56,47	76,29	
					B3	43,4	36,84	74,5	

Tabla 20. Reporte de Combinaciones de Variables

Haciendo uso de la tabla 20, puede corroborarse la escogencia de la condición 1. Como se refleja en la figura 43, la masa del concentrado aumenta a medida que se elevan las revoluciones por minuto; sin embargo, la recuperación decae en 0,62%, al igual que decae el porcentaje de mica en el concentrado en 0,57%, lo cual indica que el aumento de las RPM ejerce mayor agitación de la pulpa, impidiendo la sujeción apropiada de las partículas minerales micáceas a las burbujas de aire. Por lo tanto, desde el punto de vista de calidad, la condición de 1100 RPM se acredita como la más favorable.

Igualmente, según la figura 44, a medida que se aumenta la densidad de la pulpa, se pierde la propiedad selectiva y no se logra flotar de manera óptima. Tanto la masa del concentrado, como la recuperación del producto micáceo, y el porcentaje de mica en el concentrado, declinan con el espesor de la pulpa. Por lo tanto, se fijó a 25% de sólidos la densidad de pulpa para los sucesivos ensayos experimentales.

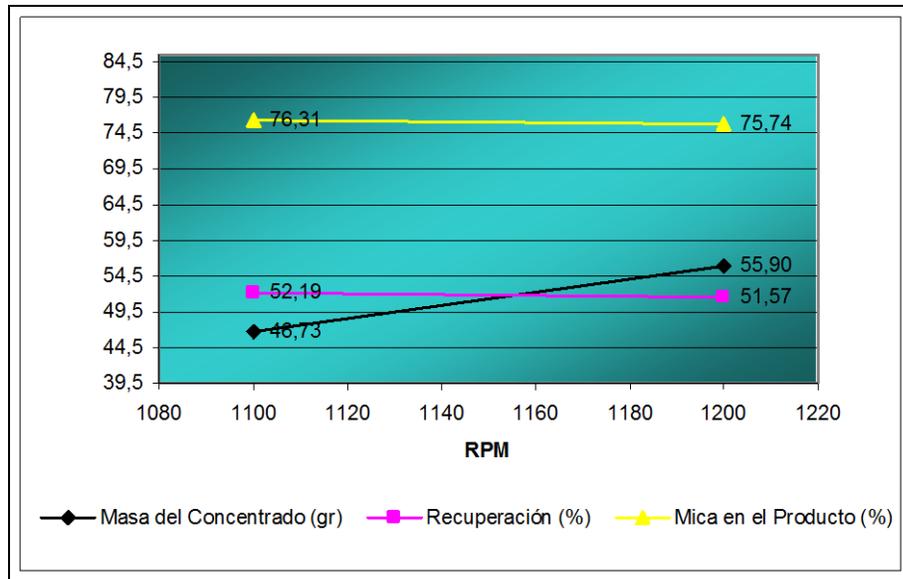


Fig. 43. Efecto de las Revoluciones por Minuto (RPM) de la Máquina de Flotación en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.

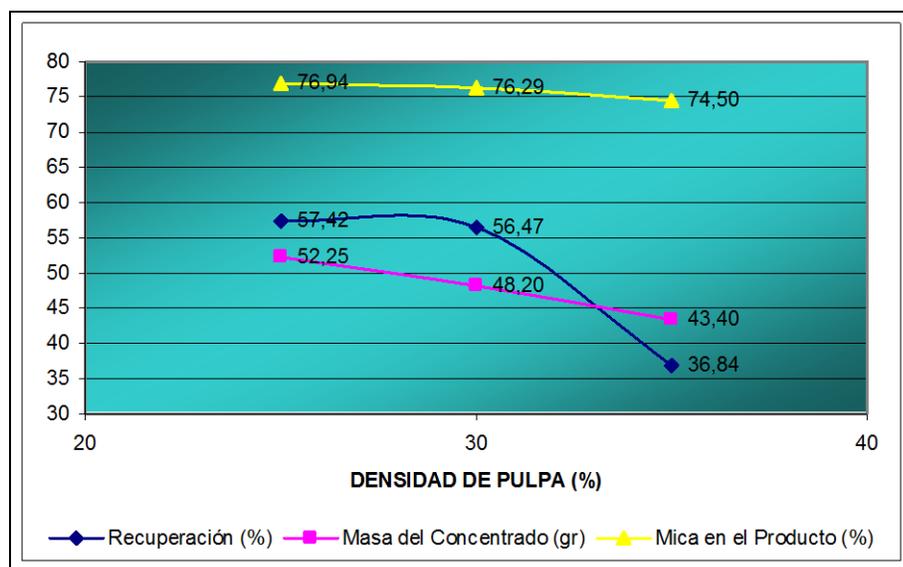


Fig. 44. Efecto de la Densidad de la Pulpa en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.

4.4.4. Experimentos de Concentración

Una vez establecidas las condiciones iniciales de velocidad del rotor igual a 1.100 RPM en el equipo de flotación y una pulpa de 25%, se procedió a determinar la respuesta de la mena a la flotación en base a un plan de ensayos, tal como se muestra en la tabla 21, considerando en esta oportunidad como variables, a los reactivos empleados para los distintos fines.

PRUEBA	CONSTANTES	VARIABLES
1	RPM = 1.100 PULPA = 25%	pH = 8 NaSiO ₂ = 1050 gr/ton (0,142 cc) Amina = 522 gr/ton (0,12 cc)
2	RPM = 1.100 PULPA = 25%	pH = 10 NaSiO ₂ = 1400 gr/ton (0,19 cc) Amina = 522 gr/ton (0,12 cc)
3	RPM = 1.100 PULPA = 25%	pH = 10 NaSiO ₂ = 1050 gr/ton (0,142 cc) Amina = 395 gr/ton (0,091 cc)

Tabla 21. Condiciones de los Ensayos Experimentales de Flotación.

Al igual que en los exploratorios, de cada uno de los ensayos se obtuvieron dos productos: un concentrado y una cola, ambos con las mismas características, para dar un total de 6 productos que, adicionados a las réplicas de cada ensayo, representan 12 respuestas en total para 6 pruebas. Dichas réplicas fueron empleadas para determinar el promedio entre los pares de ensayos correspondientes y posteriormente establecer la gran media de cada variable, la que es posible analizar por medio de una representación gráfica. Básicamente, en esta fase de los experimentos, se utilizó menor cantidad de amina, por cuanto de los ensayos exploratorios, se formaba una espuma de

un espesor entre 8 y 10 cm de inmediata generación y difícil manejo en la recolección. Asimismo, se escogió un aumento en la dosis de silicato de sodio, para lograr mayor cantidad de cuarzo contenido en las colas.

4.4.5. Resultados

Los resultados obtenidos en estas pruebas experimentales se muestran en la tabla 22; las combinaciones de variables se señalan en la tabla 23 y gráficamente en las figuras 45, 46 y 47. Al igual que en los exploratorios, estos resultados se midieron en base a porcentajes de cuarzo y mica para cada uno de los productos, así como su recuperación en porcentaje. Para obtener estos últimos, se hizo necesario realizar un balance de masas, de tal manera que indicara posibles diferencias en el contenido de los minerales, tanto a la entrada, como a la salida del proceso. Un ejemplo típico de dicho cálculo se muestra a continuación:

CASO 1			
	Peso (gr)	% Mica	gr de mica
CABEZA	200	50,05	100,10
CONC	66,4	91,02	60,44
COLA	133,1	27,62	36,76
			97,20 +

Como puede observarse, para este caso, la suma del peso de mica presente en el concentrado y en la cola (productos), no supera el peso de mica presente en la muestra (alimentación) antes del proceso de flotación.

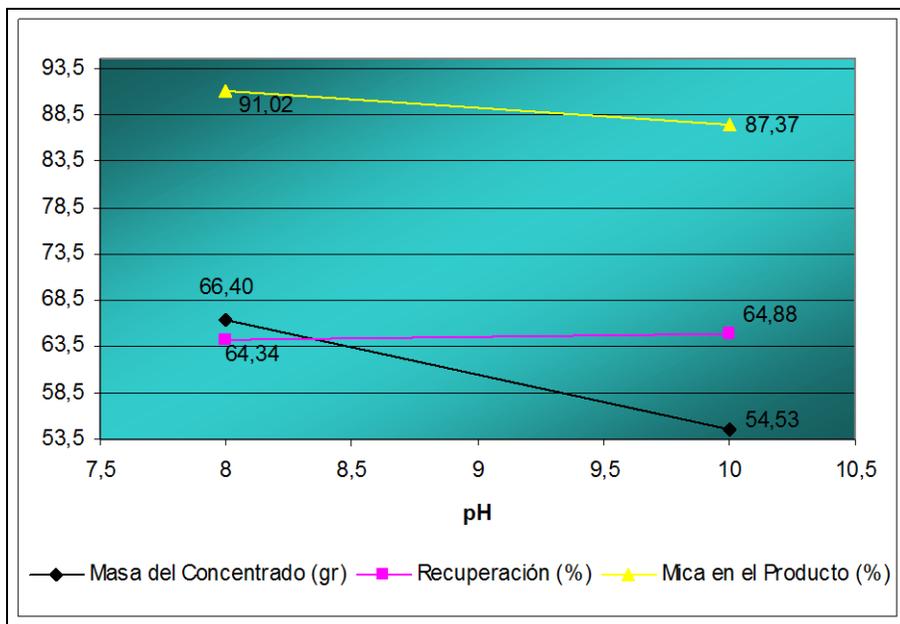


Fig. 45. Efecto del pH en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.

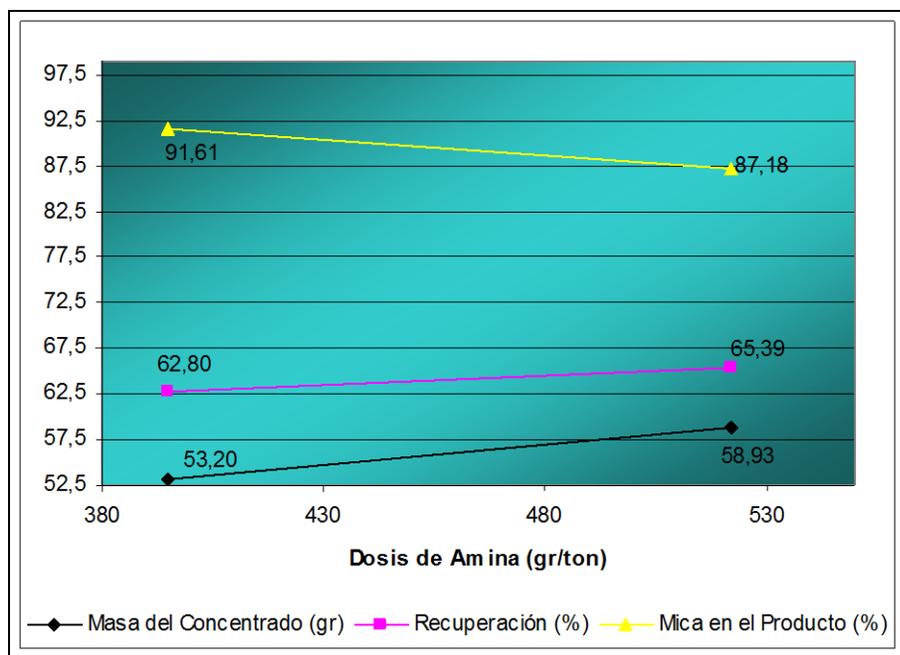


Fig. 46. Efecto de la Dosis de Amina en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.

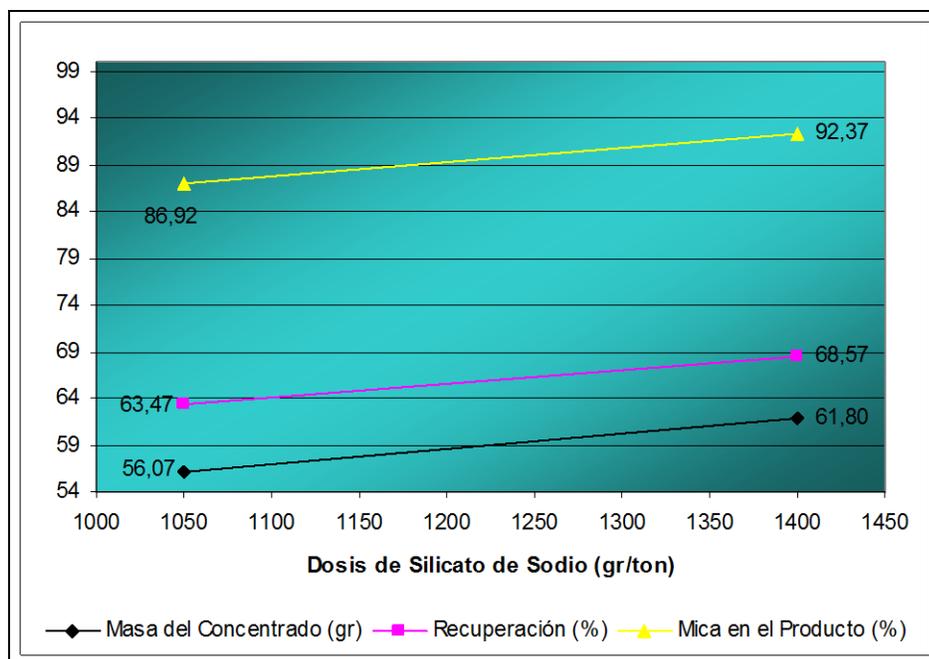


Fig. 47. Efecto de la Dosis de Silicato en la Masa del Concentrado y Recuperación de Mica en el Concentrado.

4.4.6. Análisis de Resultados

Como se indicó anteriormente, para identificar la mejor respuesta de los ensayos realizados se tomaron en cuenta dos factores, a saber:

- Alto porcentaje de mica en el producto
- Alta recuperación

En general, con este plan de ensayos para un proceso de flotación más afinado, se logró alcanzar mayores recuperaciones y aproximadamente 14% adicional de mica en el concentrado, por lo que la flotación catiónica en las condiciones señaladas, hace factible el procesamiento de la mica.

En la tabla 22 se observa de manera directa y por combinación de variables, que el caso 3 arroja 91,61% de mica en el concentrado, con una recuperación del 62,80% del género, lo cual, visto desde el grado de concentración (K), se necesitaría por cada unidad en peso de concentrado, 2,92 unidades en peso del género para obtener este valor de mica en el producto, lo que lo hace desfavorable para cualquier proceso de beneficio a nivel de planta piloto o industrial.

Por otro lado, en la misma tabla se observa que, para el caso 2, con menos cantidad de material del género, específicamente con un grado de concentración de 2,70, se logra obtener una mayor recuperación del 68,57% y un porcentaje de mica en el producto de 92,37%, lo cual no está muy alejado del valor indicado por el caso 3; por lo tanto, desde el punto de vista de calidad, las condiciones de ensayo de esta prueba, serían las ideales para lograr dicho objetivo. Y por lo que respecta al caso 1, éste puede considerarse como un intermedio entre los valores mencionados.

No obstante, tal y como lo indican las recuperaciones para todos los casos, éstas se sitúan en el orden del 65%, lo que advierte un efecto aceptable del proceso de beneficio sobre este material, sin llegar a ser totalmente efectivo, cuando en las colas se está desechando cerca del 27% de mica contra un 37% que se desechaba en los exploratorios.

Por otro lado, en la Figura 45, la variable del pH analizada de una manera independiente indica, que a medida que ésta aumenta de 8 a 10, la recuperación lo hace de forma no significativa, en el orden de los 0,54%, mientras que el porcentaje de mica en el producto, disminuye en 3,65%. Por lo tanto, puede considerarse que con el

aumento del pH tienden a mantenerse estables los factores de importancia a que se hace referencia. Por su parte, la masa del concentrado sí disminuye de forma apreciable, lo que señala que, con menor cantidad de material en el producto, se alcanzan similares recuperaciones y porcentajes de mica que a un pH de 8.

Con el aumento de la dosis de amina a 522 gr/ton (Fig. 46), se comprueba que tanto la masa del concentrado como la recuperación, también se elevan, lo que indica que la acción colectora de la amina se hace más selectiva, obteniendo, además de una alta recuperación, un buen porcentaje de mica (87,18%), aun cuando este porcentaje sea menor en 4,43% con respecto al resultado obtenido con la dosis de 395 gr/ton (91,61%).

La acción depresora del silicato de sodio se pone de manifiesto al aumentarse éste a 1400 gr/ton (Fig. 47); con ello se obtiene una mayor recuperación, mayor masa del concentrado y mayor porcentaje de mica en el producto, lo cual denota la especial sensibilidad que tiene esta muestra mineral a la variación de la dosis de este reactivo. Asimismo, se verifica la mayor cantidad de cuarzo que se recoge en las colas expresada en 74,99%.

Del análisis anterior se deduce, que la condición en la cual se consiguen los resultados más propicios para el beneficio de la mica, se encuentra enmarcada en la prueba 2, con un pH de 10; 522 gr/ton (0,12 cc) de amina como colector; y 1400gr/ton (0,19 cc) de silicato de sodio como depresor. A su vez, el proceso resulta efectivo en remover las partículas de sílice, ocurriendo una recuperación del mismo en las colas del 99,2%, lo que produce un concentrado altamente limpio.

Como nota aparte, DUDENKOV (1980) señala, que para la mayoría de los minerales no sulfurosos se observa el máximo de adsorción de la amina con un pH alrededor de 10, con lo que puede obtenerse una mayor flotabilidad del mineral, corroborando la respuesta de la prueba 2 con mejores efectos en los productos.

Cabe destacar, que según los análisis químicos de los productos obtenidos en esta prueba, el concentrado de mica está constituido en un 53% por clorita. Como es sabido, muchos autores no consideran este mineral dentro del grupo de la mica; sin embargo, el grupo de la clorita se constituye por minerales micáceos que cubren un rango de ciertas modificaciones químicas con correspondientes variaciones ópticas. Es una forma de mica que se cuenta dentro de un gran número de especies con variaciones distintas.

CONCLUSIONES

- Las muestras analizadas del material presente en la Cantera Cura, indican que el mismo está constituido por un 54,18% de cuarzo y 45,82% de mica, siendo la naturaleza de ésta última de tipo muscovita y clorita. La humedad se encuentra en 1,12% y se presenta con una granulometría relativamente gruesa, representada por un 62,18% retenido en la malla 8 con una trituración primaria y un 57,94% retenido en la malla 30 con una trituración secundaria. Con la molienda, aproximadamente el 60% del material se retiene en las mallas 70, 100 y 150, para un tiempo de estadía en el molino de 3, 6, 9 y 12 minutos. La misma se libera, en un 90% en la malla 60 con la trituración primaria y en la malla 12 con la secundaria, consiguiendo un 92% de liberación con la molienda en la malla 30.
- La acción de trituración secundaria realizada con los cilindros trituradores no fue la más adecuada, ya que no permitía una liberación óptima para una granulometría relativamente gruesa (malla 8 o malla 10), la cual era requerida para el alimento del posterior proceso de clasificación, por lo que se hizo necesario una posterior disminución de tamaño durante un tiempo corto (30" a 40") en el molino de barras, para adoptar las condiciones que permitieran obtener mayor cantidad de mica liberada.
- El clasificador neumático de laboratorio realizó una clasificación dimensional; separando por tamaños las partículas, debido a que la diferencia de densidad entre la mica y el cuarzo es muy pequeña; 2,85 y 2,65 gr/cm³, respectivamente.

En este sentido, la condición donde se consigue un mejor producto en la descarga inferior del clasificador y del colector con mayor recuperación de mica, es a una abertura de la válvula "A" del 33% (62,20 gal/min) y una abertura de la válvula "B" del 50% (82,08 gal/min). De la misma manera, se obtiene un tamaño de corte en la malla 70 (0,212 mm), indicando un producto grueso favorable entre las mallas -8 +70.

- Los análisis químicos del producto del ciclón neumático arrojaron 49,95% de cuarzo y 50,05% de mica, mostrando que el proceso de clasificación empleado optimizó la alimentación de la flotación al eliminarse los finos perjudiciales y aumentar la cantidad de mineral útil micáceo.
- El proceso de flotación catiónica directa aplicado al material proveniente de la Cantera Cura, resulta efectivo para la obtención de concentrados micáceos de calidad industrial, obteniéndose un concentrado final de mica con un porcentaje de 92,37% a una máxima de recuperación del 68,57% y un grado de concentración de 2,70%. El cuarzo en las colas se manifestó en 74,99% con una recuperación del 99,2%, lo cual denota la capacidad del proceso para remover las partículas de cuarzo, produciendo un concentrado altamente limpio.
- Las dosis óptimas de reactivo con las cuales se obtuvieron los resultados mencionados, se sitúan en 522 gr/ton (0,12 cc) de Amina Flotigam EDA-3B; 1400 gr/ton (0,19 cc) de NaSiO_2 ; condiciones de pH 10; y una pulpa de 25% de sólidos, a una velocidad del rotor del equipo de flotación de laboratorio de 1100 rpm.

- Una dosis de amina de 522 gr/ton y una dosis de silicato de sodio de 1400gr/ton obtenidas de los ensayos experimentales, superan las dosis teóricas usuales de estos reactivos empleados como colector y depresor de minerales, ubicadas en 250 gr/ton y 1,2 kg/ton (PELÁEZ, E.,1980). Esto obedece al hecho de que, para la mena micácea objeto de estudio, las dosis consideradas como óptimas resultaron de las pruebas experimentales aplicadas a este mineral. Mientras que, el parámetro teórico indicado, supone condiciones experimentales generales para la realización del proceso de flotación de una amplia gama de minerales.
- Se observa una influencia significativa en la dosis de silicato de sodio para deprimir el cuarzo. Debido a que este reactivo es un depresor de silicatos, componente también esencial para las micas, se ve reflejada su acción en la recuperación del 68,57% de las mismas en el concentrado, advirtiendo la fuga de una parte de ellas hacia las colas.
- El concentrado, producto del proceso de flotación, indica la viabilidad de emplearse principalmente en la industria petrolera venezolana, como un aditivo para prevenir la pérdida de circulación en las operaciones de perforación de pozos petroleros. Esto, debido a que el hábito micáceo que presenta en general los minerales del concentrado, es una de las propiedades físicas mayormente utilizadas en dicha industria, garantizando su penetración en las grietas de los pozos en la mismas condiciones que lo haría la muscovita pura. Según su granulometría, el producto de concentrado puede ser destinado para mica fina, ya que el mismo es aproximadamente 90% pasante de la malla 30 (0,6 mm), la cual se encuentra dentro del rango de utilización en el que es requerido este

mineral (-20+100 mallas). Una granulometría mayor no es posible, debido a su impracticable proceso de beneficio por medio de la flotación.

- El concentrado producido, una vez triturado al tamaño deseado, puede tomar lugar dentro de las industrias venezolanas del caucho, por aprovecharse más por sus propiedades físicas que por sus propiedades químicas, cumpliendo con un tamaño adecuado a los necesitados (-45+325 mallas).
- Para la industria de la pintura, el producto final obtenido no puede cumplir, en algunos casos, con las especificaciones solicitadas por las empresas venezolanas consultadas, ya que la mena no está constituida esencialmente por muscovita, tal y como se necesita para pinturas de alta calidad y de color blanco preferiblemente. Sin embargo, su uso puede extenderse a ciertas pinturas especiales y para exteriores donde se utilizan colores variados, preferiblemente el verde; aprovechando así el resto de sus propiedades.
- Para la industria de electrodos se presenta una situación similar a la de la industria de la pintura, en cuanto a la utilización de este concentrado, en razón a que, la que determina la calidad de los electrodos usados en soldaduras, es la cubierta de mica muscovita.
- De acuerdo a la masa mineral observada en campo, la reserva probable se calculó en 17.000 toneladas de material; por lo que, si ha de beneficiarse, se constituiría en una minería a pequeña escala, favorable a la empresa Canteras Cura S.A. como un subproducto, y de utilidad para todas las industrias de la Región Central que lo consideren de calidad viable para el procesamiento de sus productos.

RECOMENDACIONES

- Se hace necesario la realización de estudios intensos de optimización del proceso de beneficio mineral de la mica presente en la Cantera Cura, con la implementación de ensayos en planta piloto para la observación del comportamiento de dicho mineral en una instalación en marcha, cuyos aparatos se puedan forzar en un sentido u otro, para llegar a los resultados prácticos de mayor conveniencia comercial.
- Por el tipo de investigación exploratorio en que se basa el presente trabajo, es prudente no emprender la instalación de la preparación y concentración de este mineral, hasta tener la seguridad de que la mina ofrece mayores perspectivas de rendimiento económico que justifique la instalación.
- La disminución de tamaño del material proveniente de los cilindros trituradores por un corto tiempo en el molino de barras, exhibe la necesidad de la utilización de un equipo de trituración secundaria más eficiente, si se han de seguir los mismos procesos de clasificación y concentración que se realizan en el presente trabajo. Las trituradoras mayormente utilizadas, son las trituradoras de impacto, las cuales son las indicadas para los minerales micáceos, ya que se adaptan mejor a las condiciones de este mineral, consiguiendo un grado óptimo de liberación de partículas minerales.
- Continuar con los estudios de la aplicación de la operación de flotación a la mena esquisto – micácea de San Joaquín, profundizando en rangos de tamaños del

alimento de flotación, así como en la mayor variación de los porcentajes de sólidos en la pulpa.

- Ejecutar mayor número de pruebas de flotación con los reactivos empleados en el presente trabajo, así como con otros tipos de reactivos, de manera de reducir las dosis a niveles más óptimos, al igual que analizar y comparar las características de la flotabilidad del mineral micáceo y cuarzoso.
- Considerando que el cuarzo recogido en las colas presenta una buena calidad por medio de la observación directa, así como una respuesta positiva a los reactivos de flotación; se recomienda dirigir la atención al estudio de factibilidad de beneficiar esta forma de sílice, de manera que la empresa Canteras Cura, S.A. obtenga otro subproducto de interés que pueda utilizarse como materia prima para otras industrias que así lo requieran.

BIBLIOGRAFÍA

A. BETEJTIN. (1977). Curso de Mineralogía. 3° Edición. Editorial MIR. Moscú. 737pp.

BAKER, Ron. (1979). "Conceptos Básicos de Perforación". Servicio de Extensión Petrolera. Universidad de Texas. Austin, Texas. 230 pp.

BATEMAN, Alan. (1957). Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico. 3° Edición. Ediciones Omega. Barcelona. 975 pp.

BENVENGA, José (1990). "Concentración de Muscovita – Biotita por el Ciclón Neumático a partir de la Mena Esquisto – Micácea del Páramo Peñas Blancas. Estado Mérida". Departamento de Minas, Universidad Central de Venezuela. T.E.G. 92 pp. Inédito.

BERLINER & STAFF. (s/f). "Report on Ground Mica". Informe del Ministerio de Energía y Minas. New York. 12 pp. Inédito.

BOUSO, J. (s/f). "Lavado y Clasificación Hidráulica". Informe Técnico de ERAL S.A. Caracas, 20 pp.

COMITÉ CONJUNTO DEL CONCRETO ARMADO. (1973). "Ensayos de Clasificación de Suelos". 1° Edición. Caracas. 113 pp.

CORPOCENTRO (1991). 1^{ER} Congreso de Desarrollo Minero de la Región Central. Valencia, Estado Carabobo. s/p. Inédito.

CORPOCENTRO (2001). 2^{do} Congreso de Desarrollo Minero de la Región Central. Valencia, Estado Carabobo. s/p. Inédito.

CHAPMAN, George (1983). "Mica". En S. LEFOND (Ed.) Industrial Minerals and Rocks 5th. Edition. Vol. 2. S.M.M.E. Evergreen, Colorado. 1446 pp.

DEER, HOWIE & ZUSSMAN. (1966). An Introduction to the Rock Forming Minerals. Longman Group Limited. London. 528 pp.

DE TONI, Bruno. (1983). "Geología de la Zona de Guacara. San Joaquín. Estado Carabobo". Departamento de Geología, Universidad Central de Venezuela. T.E.G. 180 pp. Inédito.

FERNÁNDEZ, E. (1965). Preparación Mecánica de Minerales y Carbones. 3° Edición. Editorial Dussat, S.A. Madrid, España. 580 pp.

FUEYO, Luis. (1999). Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación. Tecnología, diseño y Aplicación. Editorial Rocas y Minerales. Madrid, España. 359 pp.

GONZÁLEZ, Miguel. (1970). "Concentración del Feldespato y de la Mica del Páramo de Piedras Blancas. (Estado Mérida)". Departamento de Minas, Universidad Central de Venezuela. T.E.G. 130 pp. Inédito.

HERNÁNDEZ, Roberto y colaboradores (1991). Metodología de la Investigación. 2° Edición. Mc Graw Hill. México. 505 pp.

HOWARD, Hartman. (1992). SME Mining Engineering Handbook. 2th Edition. Vol. 2. S.M.M.E. Littleton, Colorado. 2260 pp.

HURLBUT, Dana (1956). Manual de Mineralogía. 16° Edición. Editorial Reverté. Barcelona. 524 pp.

KELLY & SPOTTISWOOD (1990). "Introducción al Procesamiento de Minerales". 1° Edición. Editorial Limusa. México. 530 pp.

MORGAN, B. (1969). "Geología de la Región de Valencia, Carabobo". Boletín Geológico. Caracas, 10 (20): 4 – 136.

PELÁEZ, Eduardo (1980). Preparación y Concentración de Minerales. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 426 pp. Inédito.

RODRÍGUEZ, Simón. (1998). "Excursión Técnica. Yacimientos de Minerales Industriales de la Cordillera de la Costa". Escuela de GMYG. Universidad Central de Venezuela. 15 pp. Inédito.

SIMS, Catherine (1997). "MICA: Building a Future on Dry Ground". Industrial Minerals, (United States). January 1997. 29 – 43 pp.

S. V. DUDENKOV. y colaboradores. (1980). Fundamentos de la Teoría y la Práctica de Empleo de Reactivos de Flotación. Editorial MIR. Moscú. 403 pp.

SOLÁ M., Peré. (s/f). Master a Distancia en Tecnología de Pinturas. Universidad de Barcelona. Asociación Española de Fabricantes de Pinturas y Tintas de Imprimir. CD-ROM. Programa Interactivo.

SKOOG & WEST. (1995). Química Analítica. 6^{ta} Edición. Mc Graw Hill. México. 612 pp.

TAGGART, Arthur. (1966). Elementos de Preparación de Minerales. 1^o Edición. Ediciones Interciencias. Madrid. España. 648 pp.

TANNER, James. (1994). "Mica". En CARR, Donald (Ed.) Industrial Minerals and Rocks. 6th Edition. S.M.M.E. Littleton, Colorado. 1196 pp.

VALJI, Sherm E. (1999). "Process Technology. A key to increasing profits in industrial minerals". Industrial Minerals, (United States). September 1999. 89 - 99 pp.

VINDEL, A. (1985). "Espectroscopía de Emisión por Plasma ICP". Química Industrial. Marzo 1985. 177-182 pp.

WILLS, B.A. (1997). Mineral Processing Technology. 6th Edition. Butterworth Heinemann Edition. Oxford. 486 pp.

WEISS, N. L. (1985). S.M.E. Mineral Processing Handbook. 1° Edition. Colorado. S.M.M.E. 2144 pp.

Web sites:

www.icrmica.com

www.micaindia.com

www.uclm.es

www.uned.es

www.redescolar.ilce.edu.mx.com

www.venvialalta.com

www.vmkaps.com

www.climaxgroup.com

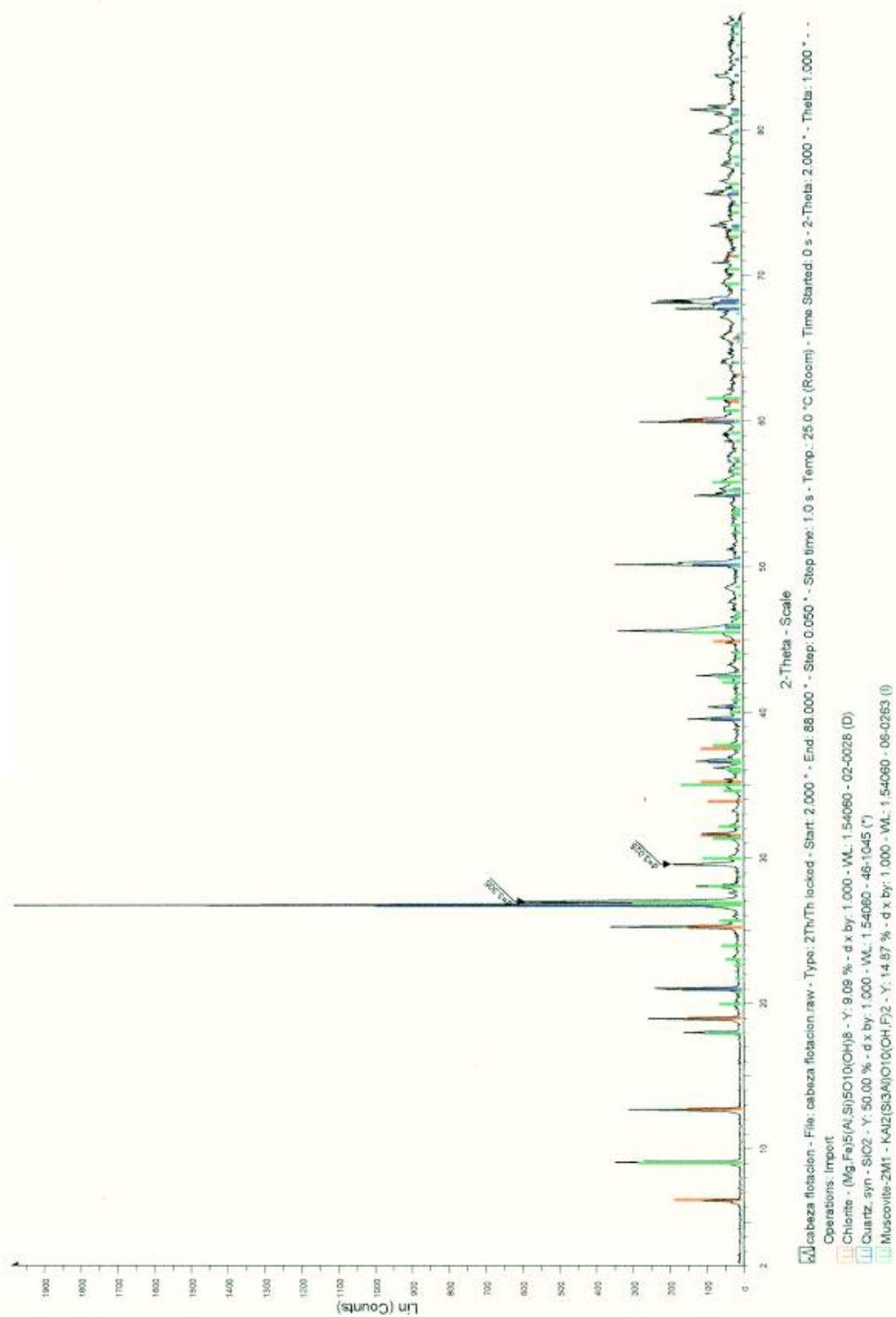
www.igp-group.com

www.ie-rajinder.com

ANEXO 1

Tipos de Mica de Uso Industrial y Producto Micáceo de la Mena en Estudio





ANEXO 2
DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA CABEZA DE LA FLOTACIÓN

ANEXO 3

Descripción

La esquistosidad se encuentra marcada por las micas; los cristales de cuarzo y minerales opacos en general se disponen con su eje más alargado paralelo a la dirección de las micas. Pueden observarse unos pequeños clivajes de crenulación en la muestra donde se genera una “segunda” foliación angular a la principal. Esta segunda foliación es paralela a los planos axiales de la crenulación. Pueden observarse cristales granudos de cuarzo “arropados” por micas, aunque no es estrictamente una textura tipo “sombra de presión”. Si estuviese orientada la muestra, entonces se podría establecer la dirección de cizallamiento.

Descripción Mineralógica

Cuarzo: bajo cristales paralelos es incoloro, amorfo, granudo. Bajo nícoles cruzados se observa gris de primer orden, con extinción ondulatoria, aunque la extinción total es la generalizada; los cristales se muestran alargados en dirección de la foliación, aunque pueden hallarse sitios dentro de la muestra donde el cuarzo es prácticamente granoblástico. Tamaño de grano promedio 0,12 mm. Es la especie mineral más abundante dentro de la muestra. Las fracturas no son un rasgo importante dentro de los granos de esta muestra. Entre los planos de foliación pueden observarse “pseudo planos de foliación” angulares respecto al plano principal. El ángulo entre ambos planos es de aproximadamente 45 grados. Se asemeja a una zona de cizalla con fracturas en “echelon” asemejando dominos.

Muscovita: bajo nícoles paralelos se presenta incolora, cristales laminares/aciculares, forma irregular. Bajo nícoles cruzados presenta azules hasta rojos de primer orden, con extinción recta característica. Son los minerales que definen la dirección preferencial de la foliación. En muchos de los casos, se encuentran deformadas (plegadas), muestra en algunos sectores clivaje de crenulación y desarrollo de una segunda dirección preferencial (dada precisamente por la parte apical de cada clivaje crenulación). Es la segunda especie mineral más abundante dentro de la muestra.

Minerales Opacos: orientados en la dirección de la foliación. Tienden a ser prismas rectangulares. Algunos cristales se encuentran envueltos por cristales de muscovita, mientras que otros se encuentran con los cuarzos. Estos minerales opacos corresponden pirita y hematita (óxido de hierro).

Los epidotos son muy escasos (al igual que los minerales opacos), Son cristales granudos de alto relieve de color verde muy pálido. Al igual que los opacos se encuentra distribuido de manera muy irregular.

Las esfenas también son muy escasas. Son fragmentos de cristales de color marrón, de alto relieve. Su distribución es irregular dentro de la muestra.

Petrológicamente, la muestra es una roca metamórfica que puede ser ubicado dentro de las facies de los esquistos verdes, subfacies de la clorita (la subfacies de más baja relación P/T) por la mineralogía que presenta cuarzo+muscovita+epidoto puede mencionarse que el protolito fue de origen sedimentario (posiblemente se trataba de una arenisca de grano fino).

ANEXO 4

Expresiones de Cálculo de Composición Porcentual

Para determinar el porcentaje de mica y cuarzo presente en cada muestra analizada por ICP, a partir de sus óxidos, se establece una composición porcentual de los componentes mayoritarios, en base a la composición mineralógica de las muestras. Dicho procedimiento se le conoce como Aritmética Química, Estequiometría o simplemente, Gravimetría. A continuación se ejemplifica dicho análisis con la muestra cabeza del ciclón.

Se desea determinar el porcentaje de micas muscovita (M) y Clorita (C), así como el mineral de ganga; cuarzo (Q), en la muestra cabeza, entonces:

$$\begin{aligned}Q + M + C &= 100\% \\Q + fg M + fg C &= \%SiO_2 \\0 + fg M + fg C &= \% Al_2O_3\end{aligned}$$

en donde fg = factores gravimétricos

$$\frac{PM(SiO_2)}{PM(M)} = \frac{60,09}{398,31} \times \frac{3}{1} = 0,4525$$

$$\frac{PM(SiO_2)}{PM(C)} = \frac{60,09}{609,59} \times \frac{2,6}{1} = 0,2562$$

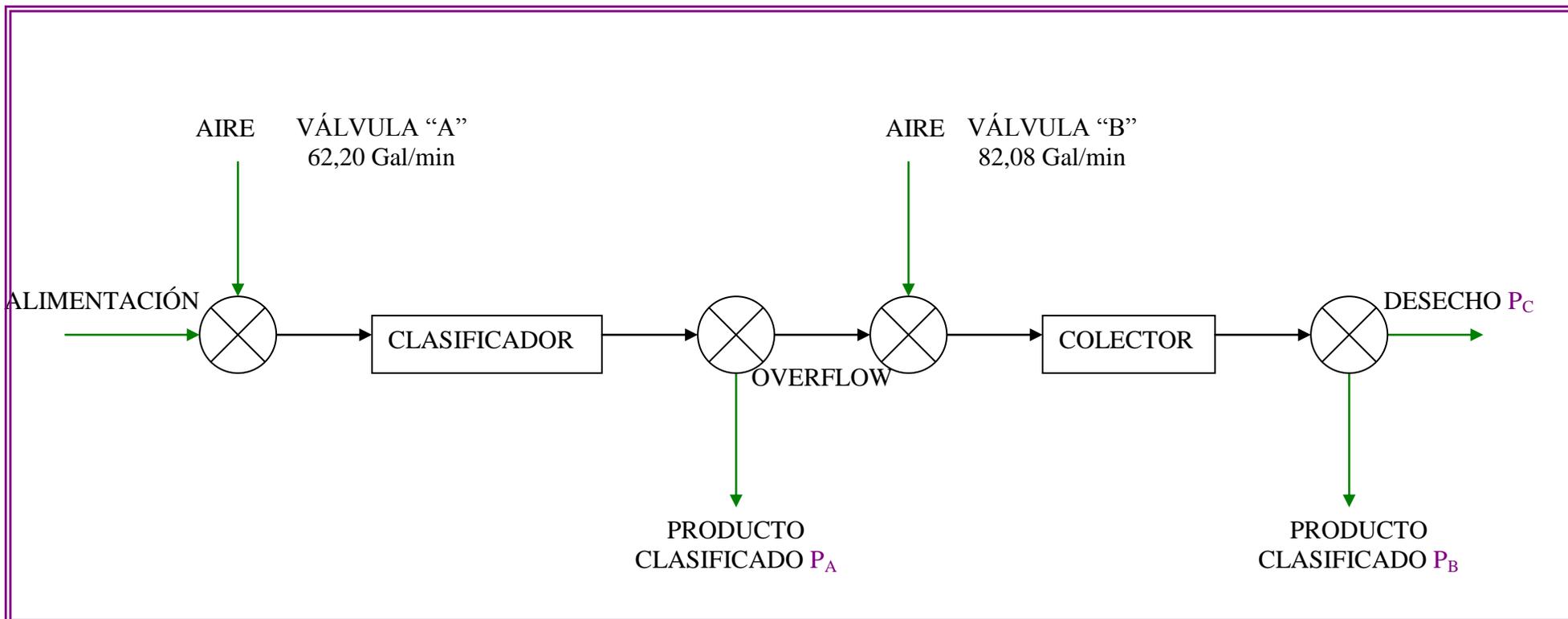
$$\frac{PM(Al_2O_3)}{PM(M)} = \frac{101,96}{398,31} \times \frac{3}{2} = 0,3839$$

$$\frac{PM(Al_2O_3)}{PM(C)} = \frac{101,96}{609,59} \times \frac{3,22}{2} = 0,2692$$

Con lo cual se conformará un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas, para obtener:

$$\% \text{ Mica} = 45,82 \%$$

$$\% \text{ Cuarzo} = 54,18\%$$



ANEXO 5

DIAGRAMA DE PROCESO DEL CICLÓN NEUMÁTICO DE LABORATORIO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA