

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OBTENCIÓN DE CONCENTRADOS DE ÓXIDO DE MAGNESIO, A PARTIR DE MAGNESITA PROVENIENTE DEL ÁREA CERRITO BLANCO EN TINAQUILLO, ESTADO COJEDES.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de
Ingeniero de Minas
por el Br. Pazanin A., Mario Alberto

Caracas, Junio de 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OBTENCIÓN DE CONCENTRADOS DE ÓXIDO DE MAGNESIO, A PARTIR DE MAGNESITA PROVENIENTE DEL ÁREA CERRITO BLANCO EN TINAQUILLO, ESTADO COJEDES.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mónica Martiz

COTUTOR ACADÉMICO: Prof. Manuel García

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Simón Rodríguez

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
INTRODUCCIÓN	

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES.....	7
1.1. Planteamiento del Problema.....	7
1.2. Objetivos.....	8
1.2.1. Objetivo General.....	8
1.2.2. Objetivos Específicos.....	8
1.2.3. Alcance del Trabajo.....	9
1.3. Localización del Yacimiento.....	9
1.4. Geología Regional.....	11
1.4.1. Unidades Estratigráficas Regionales.....	11
1.5. Geología Local.....	14

CAPÍTULO II

2. GENERALIDADES SOBRE LA MAGNESITA.....	15
2.1. Consideraciones Fundamentales.....	15
2.2. Antecedentes de la Investigación.....	15
2.3. Clasificación de la Magnesita.....	16
2.4. Usos y Especificaciones.....	18
2.4.1. Tratamiento de Aguas.....	18
2.4.2. Retardadores de Fuego.....	21
2.4.3. Agricultura.....	22
2.4.4. Cementos Magnesianos y Materiales de Construcción.....	22

2.4.5. Aplicaciones Industriales.....	23
2.4.6. Aplicaciones Industriales Especiales.....	24
2.5. Tipos de Depósitos.....	29
2.5.1. Depósitos de Magnesita en Venezuela.....	31
2.6. Morfología de los Depósitos del Estado Cojedes.....	35
2.7. Aspectos Mineros.....	36

CAPÍTULO III

3. MERCADO Y TENDENCIAS.....	38
3.1. Mercado Mundial.....	38
3.2. Tendencias en el Sector de los Refractarios.....	42
3.3. Situación Venezolana.....	44
3.4. Principales Consumidores en Venezuela.....	50

CAPÍTULO IV

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PREPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE MINERALES.....	52
4.1. Preparación y Concentración de los Minerales.....	52
4.2. Operaciones de Preparación y Concentración.....	53
4.2.1. Escogido a Mano.....	53
4.2.2. Reducción de Tamaño.....	54
4.2.3. Cribado y Tamizado.....	61
4.2.4. Flotación.....	65
4.3. Operaciones Accesorias de Beneficio.....	77
4.3.1. Calcinación.....	77

CAPÍTULO V

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	83
5.1. Esquema de Desarrollo.....	83
5.2. Toma y Preparación de las Muestras en Campo.....	84

5.3. Caracterización de las Muestras.....	84
5.3.1. Descripción Macroscópica.....	85
5.3.2. Análisis Granulométrico.....	86
5.3.3. Difracción de Rayos X.....	87
5.3.4. Análisis Petrográfico.....	89
5.3.5. Conteo de Granos.....	92
5.3.6. Estudio de Moliendabilidad.....	97
5.3.7. Análisis Químicos.....	102
5.4. Ensayos Experimentales de Concentración.....	105
5.4.1. Ensayos Exploratorios de Flotación.....	106
5.4.2. Experimentos de Flotación.....	114
5.5. Ensayos Exploratorios de Calcinación.....	118
5.6. Ensayos Definitivos de Calcinación.....	123
5.7. Análisis de Resultados de los Experimentos de Flotación.....	128
5.8. Análisis de Resultados de los Experimentos de Calcinación.....	130
 CONCLUSIONES	 132
RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	139
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

1. Especificaciones Típicas del Hidróxido de Magnesio.....	21
2. Especificaciones de Uso de la Magnesita.....	28 - 29
3. Producción Mundial de Magnesia Cáustica.....	42
4. Distribución Granulométrica de la Muestra procedente de Mina.....	86
5. Distribución Porcentual de Magnesita en cada malla.....	94
6. Distribución Granulométrica de la Muestra procedente de Mina.....	98
7. Distribución Granulométrica a 3 minutos de Molienda.....	98
8. Distribución Granulométrica a 6 minutos de Molienda.....	99
9. Distribución Granulométrica a 9 minutos de Molienda.....	99
10. Resultados de Análisis Químicos.....	104
11. Condiciones para Ensayos Exploratorios de Flotación.....	108
12. Resultados de los Productos de los Ensayos Exploratorios de Flotación.....	109
13. Reporte de Combinaciones de Variables.....	111
14. Condiciones de los Ensayos de Flotación.....	114
15. Resultados de los Productos de los Ensayos Experimentales de Flotación.....	115
16. Reporte de Combinaciones de Variables.....	115
17. Calcinación a 900° C a 2 horas.....	120
18. Calcinación a 900° C a 4 horas.....	120
19. Calcinación a 1050° C a 2 horas.....	121
20. Calcinación a 1050° C a 4 horas.....	122
21. Calcinación a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.....	123
22. Calcinación a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.....	124
23. Resultados de las Muestras a ser analizadas químicamente.....	124
24. Calcinación a 1050° C a 8 horas.....	126
25. Resultados de Análisis Químicos de Muestras Calcinadas a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Ubicación Geográfica de la Zona de Toma de Muestras.....	10
2. Mapa Geológico Regional.....	13
3. Afloramiento de la Magnesita Vetiforme.....	14
4. Clasificación Industrial de la Magnesita.....	17
5. Depósitos de Magnesita en Venezuela.....	32
6. Zona de Toma de Muestras.....	36
7. Países Exportadores hacia Venezuela.....	45
8. Importación de Magnesita en todos sus productos.....	45
9. Importación de Carbonato de Magnesio Natural.....	47
10. Importación de Magnesita Electrofundida.....	47
11. Importación de Óxido de Magnesio, incluso químicamente puro.....	47
12. Importación de Magnesita Calcinada a Muerte.....	48
13. Producción Mundial de Acero.....	48
14. Producción de Acero en Venezuela.....	49
15. Machacadora de Mandíbulas.....	55
16. Machacadora de Mandíbulas tipo Blake.....	56
17. Trituradora de Rodillos.....	57
18. Trituradora de Rodillos.....	57
19. Diagrama de la sección transversal de un Molino Rotatorio.....	59
20. Molino de Barras.....	59
21. Molino de Bolas.....	59
22. Sacudidor de Tamices (Ro-Tap).....	63
23. Máquina de Flotación.....	76
24. Tiempo de Calcinación para tamaños de 1” a 2” a la temperatura dada.....	79
25. Tiempo de Calcinación para tamaños de 4” a 10” a la temperatura dada.....	79
26. Hornos Verticales.....	80
27. Horno Rotatorio.....	81
28. Esquema General del Desarrollo Experimental.....	83

29. Homogeneización de la Muestra.....	84
30. Representación Gráfica de la Distribución Granulométrica a la Muestra procedente de Mina.....	87
31. Difractómetro de RX convencional, marca Jarrel Ash.....	88
32. Minerales identificados en la Sección Fina.....	91
33. Conteo de Granos.....	93
34. Microfotografías de las Fracciones objeto de Estudio de Liberación.....	95 - 96
35. Gráfico Gaudin – Schuhmann mostrando los resultados obtenidos en el Estudio de Moliendabilidad de la mena de Magnesita.....	101
36. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica.....	103
37. Dilución de Perla.....	104
38. Balones Aforados con la Perla Diluida.....	104
39. Representación Gráfica del Efecto de la Velocidad de Rotación en el Peso de Concentrado.....	112
40. Representación Gráfica del Efecto de la Velocidad de Rotación en el porcentaje de MgO.....	112
41. Representación Gráfica del Efecto de la Velocidad de Rotación en el porcentaje de Recuperación.....	112
42. Representación Gráfica del Efecto de la Densidad de Pulpa en el Peso de Concentrado.....	113
43. Representación Gráfica del Efecto de la Densidad de Pulpa en el porcentaje de MgO.....	113
44. Representación Gráfica del Efecto de la Densidad de Pulpa en el porcentaje de Recuperación.....	113
45. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Emulsión en el Peso de Concentrado.....	116
46. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Emulsión en el porcentaje de MgO.....	116

47. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Emulsión en el porcentaje de Recuperación.....	116
48. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Silicato en el Peso de Concentrado.....	117
49. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Silicato en el porcentaje de MgO.....	117
50. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Silicato en la Recuperación.....	117
51. Escogido a Mano.....	118
52. Tamizado de las Muestras.....	118
53. Horno de Laboratorio para Calcinación.....	119
54. Horno a 1050° C.....	119
55. Muestra Calcinada.....	119
56. Representación Gráfica de la Calcinación de diferentes tamaños del Mineral a 900° C y Tiempo Variable.....	121
57. Representación Gráfica de la Calcinación de diferentes tamaños del Mineral a 1050° C y Tiempo Variable.....	122
58. Resultados de la Pérdida al Rojo en las Muestras a ser analizadas químicamente.....	125
59. Representación Gráfica de la Calcinación de diferentes tamaños del Mineral a 1050° C a 8 horas.....	126
60. Resultados de Análisis Químicos de Muestras Calcinadas a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.....	127

Pazanin A. Mario A.

**OBTENCIÓN DE CONCENTRADOS DE ÓXIDO DE MAGNESIO,
A PARTIR DE MAGNESITA PROVENIENTE DEL ÁREA
CERRITO BLANCO EN TINAQUILLO, ESTADO COJEDES.**

**Tutor Académico: Prof. Ing. Mónica Martiz. Cotutor Académico: Prof. Ing. Manuel
García. Tutor Industrial: Ing. Simón Rodríguez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2002, 142 pp.**

**Palabras Claves: Magnesita, Magnesita Calcinada a Muerte, Magnesita Cáustica,
Periclase, Sinterización.**

Resumen

Con el fin de obtener concentrados de óxido de magnesio, para uso comercial, se extrajeron 110 Kg de material constituido por magnesita vetiforme embebida en una matriz arcillosa de carácter bentonítico, en el área de Cerrito Blanco en Tinaquillo, Estado Cojedes. Se establecieron dos condiciones de trabajo: estudios de flotación y calcinación. La muestra representativa del primer proceso reportó un tenor de 15.23 % de óxido de magnesio y 35.59 % de sílice mientras para el segundo de 39.58 % y 15.69 %, respectivamente. Para el proceso de flotación, el resultado más beneficioso fue un concentrado de tamaño comprendido entre – 100 + 150 mallas con 32.69 % de óxido de magnesio y 23.32 de sílice, a una recuperación de 79.02 %, y 40.43 % de sílice en la cola. El resultado más favorable de calcinación es a tamaños de 4 cm donde el porcentaje de óxido de magnesio y sílice son de 70.86 y 10.92, respectivamente. El primer caso indica la posibilidad de ser usado en la industria de la cerámica, construcción, caucho; mientras el producto obtenido de calcinación, cumple con las tres primeras industrias nombradas anteriormente y para electrodos, debido a las características físicas y químicas presentadas. La magnesita al natural (sin calcinar) puede ser empleada para el sector de la cerámica y la construcción por su alto contenido de carbonato de 82,8 %.

Ante todo a Dios, a
mis padres Beatriz y Marín, a
mi hermana Ivka y a toda mi
querida familia

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Central de Venezuela por abrirme sus espacios para crecer en todos los aspectos de mi vida, a los profesores del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica por su dedicación y aporte para mi formación en esta carrera; especialmente a la profesora Mónica Martiz por apoyarme en toda la etapa de la tesis como tutora académica, ofreciéndome su amistad, confianza y oportunas críticas.

Al Prof. Manuel García, por su apoyo, amistad y acertados consejos y críticas como cotutor académico.

Al Prof. Simón Rodríguez, por su colaboración con la información suministrada y ayuda como tutor industrial.

A Omar Goddelliet por sus apreciaciones en momentos que acudí a su persona.

Al Prof. Ricardo Alezones por su colaboración en el análisis petrográfico.

A la profesora Gladys Martínez por su atención prestada en la fase final del trabajo.

A Maria Teresa por su ayuda en ciertos momentos de la carrera.

A los Lic. Humberto Peña y Miriam Andara por su desinteresada e importante aporte para la realización de los análisis químicos en los laboratorios de Ingeomin e Instituto de Ingeniería, respectivamente.

A la Lic. Venezuela Colmenares de Cerámicas Carabobo C.A., al Ing. Juan Manuel Rodríguez de Cytec México S.A., al Ing. John Patterson de la empresa estadounidense Martín Marietta C.A. y a Cimvicre por la valiosa información prestada.

A las personas que me atendieron en las diferentes industrias que visité, tales como, Firestone C.A., Pfizer C.A., Montana C.A., Venezolana de Pinturas C.A., Purina C.A.

Al personal técnico del laboratorio de la Escuela Metalúrgica.

Al Dr. Andrés Utrera quien junto con su madre la Sra. Isola, que en paz descanse, me hospedaron en su hogar durante cuatro años.

A las familias Cabrera y Ochoa que me trataron durante toda la carrera como uno más de su familia; especialmente a Gustavo por ser tan incondicional y prestarme toda la ayuda que necesité en ciertos momentos, tanto a nivel estudiantil como personal.

A Martha por comprenderme, quererme y ayudarme en todo momento.

A mi bella familia por su incondicional e invaluable apoyo en todos los momentos de mi vida, agradezco enormemente a mis padres Beatriz y Marin por ser quien soy, por apoyarme y quererme de esa manera; a mi hermana Ivka, al cuñado Eduardo y a mi tío.

A mis primos, especialmente a Efrain, por apoyarme en momentos importantes durante la etapa final del trabajo.

A todos los amigos de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica que compartieron conmigo durante estos maravillosos años universitarios, esperando siempre mantener contacto con ellos luego de culminada esta etapa.

Por último, a todas aquellas personas que de alguna manera colaboraron conmigo, tanto en la carrera como en la realización de este trabajo.

INTRODUCCION

La preparación y concentración de minerales conlleva una serie de pasos que permiten recuperar y beneficiar los minerales presentes en la corteza terrestre, tanto metálicos como no metálicos, de manera económica. Debido a este procedimiento se llegan a producir materiales de cierto tipo de especificaciones y calidades para las industrias que los consumen.

Para que la explotación de un mineral se pueda llevar a cabo deben cumplirse los siguientes parámetros en un debido punto de equilibrio, donde todos converjan hacia una mayor rentabilidad económica: ubicación del depósito, reservas, calidad del mineral y mercado. Ocuriendo esto y habiendo un preciso y adecuado beneficio de mineral se pueden llegar a procesar minerales hasta obtener un producto específico con los requerimientos exigidos por la industria, usando los métodos adecuados para cada caso en particular, pudiendo transformar un material estéril en útil en compatibilidad con el ambiente.

El presente trabajo trata sobre la obtención de concentrados de óxido de magnesio a partir de magnesita (MgCO_3), proveniente del área Cerrito Blanco en Tinaquillo, Estado Cojedes, por medio de métodos de beneficio mineral con la finalidad de producirlo para el consumo nacional.

El trabajo está estructurado de un primer capítulo donde se destacan generalidades, entre otras el planteamiento del problema hasta la geología local del yacimiento. Un segundo capítulo con las generalidades del mineral en estudio, tipos y morfología de los depósitos, así como los aspectos mineros. El tercer capítulo de mercado y tendencias. El cuarto capítulo contiene los fundamentos teóricos de la preparación y concentración de minerales. En el quinto capítulo el desarrollo experimental, por último, las conclusiones y recomendaciones.

La realización de esta investigación se fundamenta en la necesidad que tiene Venezuela (importador neto) de producir este mineral, debido a la importancia que posee para las grandes industrias de los refractarios, cerámicas, revestimientos, electrodos, cauchos, productos químicos, pegamento, frenos y alimentos concentrados para animales.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del Problema

A través de los años Venezuela ha sido un importante consumidor de productos provenientes de la magnesita, esencialmente aquellos de grado refractario. Se estima que Venezuela actualmente importa unas 30.000 toneladas de estos productos (Fuente: OCEI).

En la actualidad el país ocupa el tercer lugar en América Latina, después de Brasil y Argentina en producción de acero, con casi tres millones de toneladas de acero producidas durante el año 2000 (Fuente: OCEI).

La producción de ese gran volumen de acero, significa el consumo de una cantidad muy apreciable de magnesita calcinada, para la fabricación de ladrillos refractarios de diferente naturaleza utilizados en diversas secciones de los centros siderúrgicos. Este gran volumen de óxido de magnesio (MgO), el cual ha representado una gran salida de divisas en los últimos años, es usado además en la industria de la cerámica, revestimientos, electrodos, cauchos, productos químicos, pegamentos, frenos y alimentos concentrados para animales. La magnesita también es utilizada natural (no calcinada) para sanitarios, cerámicas, cementos y otros.

Venezuela cuenta con importantes reservas de este mineral, ubicadas en el Estado Cojedes y Nueva Esparta. Desafortunadamente en Nueva Esparta actualmente muchos de los yacimientos se ubican en áreas turísticas o urbanizadas, lo cual es un obstáculo para su desarrollo. Por otro lado, la gran distancia que existe de los yacimientos a las áreas industriales del centro del país. En cambio, el más factible de explotar en la actualidad es el del Estado Cojedes debido a sus excelentes parámetros geográficos y probablemente volumétricos, morfológicos y mineralógicos.

Se presenta la necesidad de realizar estudios de muestras representativas de magnesita provenientes del área Cerrito Blanco, Estado Cojedes para verificar si cumplen con las especificaciones de calidad que exige el mercado, una vez sometidas a procesos de preparación y concentración de minerales.

Sería beneficioso para el país la explotación y obtención de concentrados de magnesita para su debido uso en las industrias nombradas anteriormente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Obtener concentrados de óxido de magnesio a partir de muestras de magnesita, procedentes del área de Cerrito Blanco en Tinaquillo, Estado Cojedes, por medio de métodos de beneficio mineral con la finalidad de producirlo para el consumo nacional.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características físicas, químicas, mineralógicas, granulométricas y de liberación de la muestra representativa del yacimiento.
- Preparar la muestra mediante procesos de reducción de tamaño y clasificación dimensional.
- Efectuar ensayos de concentración por flotación a muestras representativas.

- Realizar ensayos de calcinación a muestras representativas de las diferentes mallas en estudio.
- Evaluar los resultados obtenidos en los ensayos mediante análisis estadístico.
- Especificar el posible uso de la magnesita en Venezuela según los resultados obtenidos.

1.2.3. Alcance del Trabajo

En esta investigación se busca determinar los parámetros más convenientes de preparación y concentración donde el concentrado de magnesita sea de mayor pureza, adecuando este último a las especificaciones de calidad requerida por las industrias consumidoras, para planificar y explotar los depósitos en un futuro.

1.3. Localización del Yacimiento

El depósito de magnesita vetiforme donde fueron tomadas las muestras presenta una excelente ubicación geográfica, al igual que los de Tigre Galán y Las Delicias ubicados en el Estado Cojedes. Conforman una extensa faja desde la Teta de Tinaquillo hasta el Hato Tamanaco, los depósitos se ubican a unos 10 kilómetros al oeste de la ciudad de Tinaquillo, Cojedes Septentrional (Figura 1).

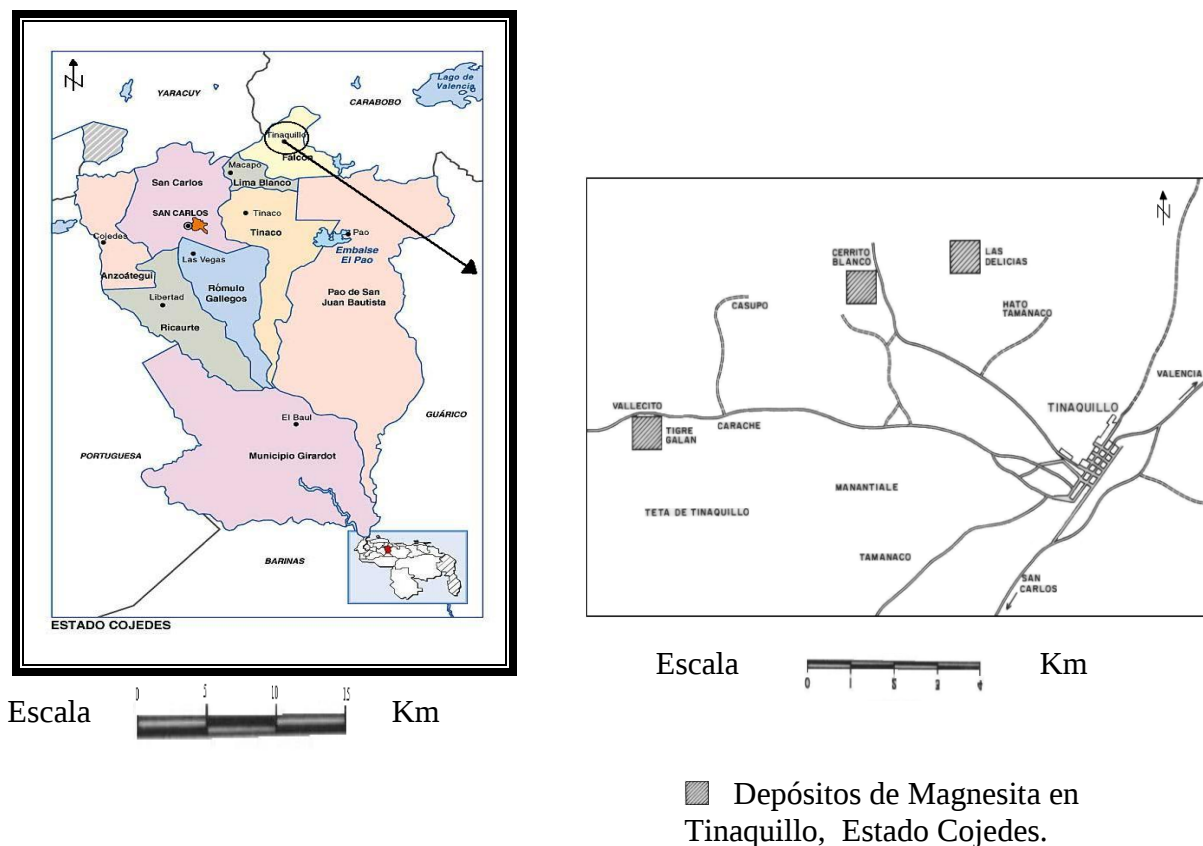


Fig. 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Toma de Muestras.

La zona se encuentra ubicada entre los meridianos $68^{\circ} 30'$ y $68^{\circ} 40'$ de longitud oeste y los paralelos $9^{\circ} 30'$ y $10^{\circ} 00'$ de latitud norte. Los depósitos se localizan a pocos metros de vías asfaltadas de segundo orden como ocurre con los depósitos de Cerrito Blanco, que son cortados por vías en excelentes condiciones. Todas estas vías de acceso se comunican con la Troncal VEN – 5 la cual se dirige desde Valencia hasta San Cristóbal, conformando una de las principales vías del país. Esta carretera comunica al Estado Cojedes con la red central de autopistas y con los principales centros industriales del norte del país.

El yacimiento (además de los de Tigre Galán y Las Delicias, semejantes a los de Cerrito Blanco) se ubica geográficamente cerca de importantes centros consumidores de productos de magnesita. Numerosos sectores de la cerámica,

fertilizantes, procesos químicos, pinturas, vidrio, gránulos, cauchos, aditivos petroleros, electrodos, aislantes y papel, los cuales utilizan un importante volumen de magnesita natural y óxido de magnesio en sus procesos, y el cual es totalmente importado, se ubican en las zonas industriales de Valencia, Maracay, Puerto Cabello, Cagua y Villa de Cura, localizados a menos de 100 kilómetros, vía autopista, de las áreas ricas en magnesita.

Según Rodríguez, Simón (1994), fisiográficamente, los principales depósitos constituyen parte de las colinas asociadas con el Complejo Montañoso de Tinaquillo, todos son fácilmente accesibles. Por otro lado, las características litológicas de la zona han imposibilitado la formación de niveles edafológicos ricos en material orgánico y nutrientes químicos, razón por la cual la vegetación es sumamente pobre, caracterizada por gramíneas, herbáceas bajas y chaparros. Esto favorece positivamente desarrollos mineros a cielo abierto.

1.4. Geología Regional

1.4.1. Unidades Estratigráficas Regionales

Tres unidades estratigráficas afloran en la zona de Tinaquillo, todas de gran importancia geológica, y dos de ellas presentando yacimientos de gran relevancia económica. Estas unidades regionales son: El Complejo de Tinaco, la Formación Las Brisas y el Complejo de Tinaquillo.

El Complejo de Tinaco constituye una de las principales unidades geológicas de Venezuela Central debido a sus parámetros tectónicos y estratigráficos y a los importantes yacimientos de minerales industriales que posee. El Complejo se extiende desde la población del Tinaco hasta la ciudad de Tinaquillo en Cojedes Septentrional. Litológicamente está conformado por dos unidades básicas, el Esquisto de Tinapú y el Gneis de La Aguadita. El Esquisto de Tinapú aflora extensamente al

sur de San Antonio y al noreste del área de La Aguadita y está conformado esencialmente por filitas grafitosas, anfibolitas esquistas, cuarcitas y esquistos cuarzo-grafitosos. Se encuentra separado de la porción meridional rica en zonas de inyección de El Tinaco a través de la falla de Tinapú (Menéndez, A. 1965).

El Gneis de La Aguadita constituye una secuencia de enorme importancia económica debido a los gruesos intervalos de gneises cuarzo – plagioclásicos que contiene. Aún cuando el Gneis de La Aguadita presenta algunas anfibolitas, cuarcitas y cherts, la casi totalidad del intervalo está constituido por gneises cuarzo – hornabléndicos y cuarzo-plagioclásicos los cuales se intercalan a lo largo de toda la unidad.

La Formación Las Brisas constituye una gruesa secuencia de esquistos, filitas, cuarcitas y calizas lenticulares ubicada al norte de fallamiento de Manrique, en contacto con las rocas ultrabásicas del Complejo de Tinaquillo a través de una gruesa secuencia muy tectonizada y cizallada.

Tanto la Formación Las Brisas, como el Complejo del Tinaco, se encuentran en contacto de falla con el Complejo de Tinaquillo. Este Complejo conforma un macizo de rocas ultrabásicas y básicas parcialmente cizalladas y meteorizadas, de enorme importancia económica debido a los numerosos yacimientos minerales que posee, varios de ellos bajo extracción a cielo abierto. Tectónicamente el Complejo de Tinaquillo constituye una enorme masa aparentemente alóctona ubicada en áreas sumamente cizalladas y fracturadas. De hecho el Complejo es parte del rosario de rocas ultrabásicas alóctonas que se extienden desde Portuguesa (Cerro Pelón) hasta Sucre (Carúpano), constituyendo importantes concentraciones en Yaracuy (Cabimba), Cojedes (Tinaquillo), Carabobo (San Joaquín), Aragua (Villa de Cura y Loma de Guerra) y Miranda (Tacata).

El Complejo de Tinaquillo está constituido por dunitas serpentinizadas, serpentinitas, gabros, hornablenditas y algunos diques de rocas ácidas, pero las rocas actuales de mayor importancia debido a los yacimientos minerales asociados son las serpentinitas. El Complejo Ultrabásico fisiográficamente constituye altos muy característicos rodeados por una secuencia esencialmente esmectítica enriquecida en magnesita, ocre y bentonita (Figura 2).

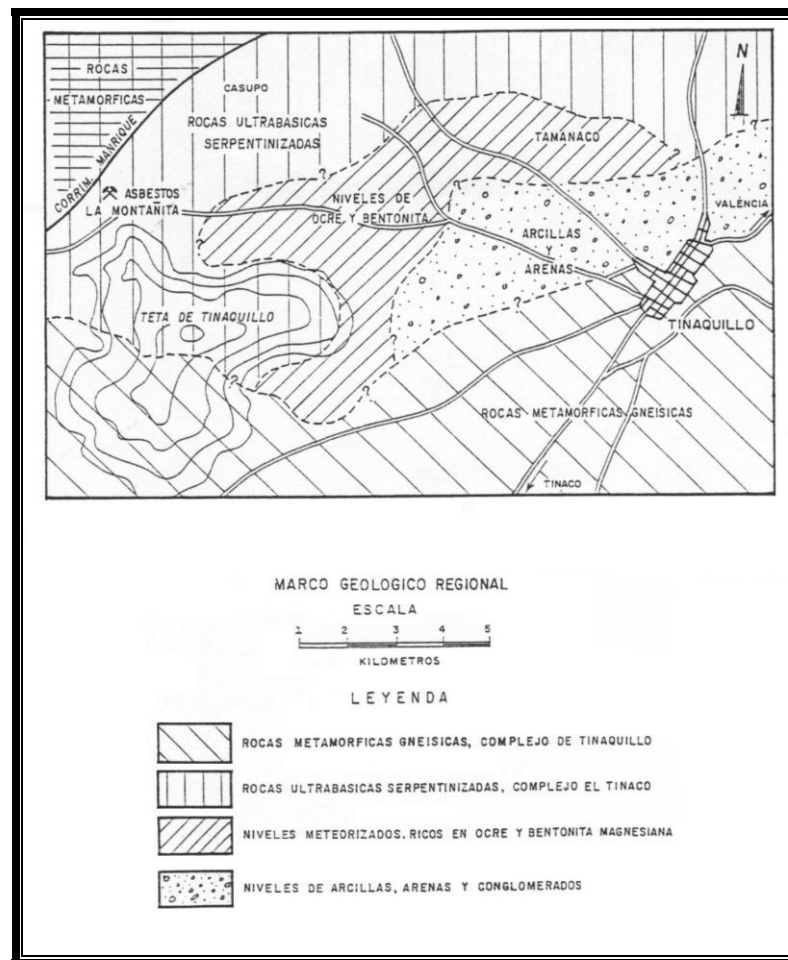


Fig. 2. Mapa Geológico Regional.

Las rocas serpentiniticas del Complejo de Tinaquillo cuando presentan meteorización diferencial constituyen niveles importantes debido a la intensidad de los procesos. La zona de magnesita vetiforme se asocia con serpentinitas inicialmente

esmectitizadas o totalmente esmectitizadas. El ocre constituye mantos gruesos sobre material serpentínico esmectitizado rico en jaspe. La bentonita magnesiana (esmectita) conforma el producto final (Rodríguez, Simón; 1994).

1.5. Geología Local

Según Rodríguez, Simón (1994), el depósito de magnesita se presenta como vetas irregulares entrelazadas de un material blanco y uniforme, embebidas en niveles arcillosos de naturaleza bentonítica, los cuales conforman una típica faja, que se extiende a todo lo largo en forma irregular desde la zona de la Teta de Tinaquillo hasta el Hato Tamanaco, perteneciente al Complejo de Tinaquillo. Se destaca una serpentinita muy meteorizada a nivel esmectítico presentando un alto enriquecimiento en magnesita vetiforme. Este nivel conforma una faja relativamente paralela a las otras de Tigre Galán y Las Delicias presentándose siempre en forma concordante y en contactos transicionales (Figura 3).



Fig. 3. Afloramiento de la Magnesita Vetiforme.

Se observa macroscópicamente la existencia de magnesita asociada a minerales característicos de la zona, tales como, sílice en diferentes variedades, óxidos de hierro, constituyendo la arcilla esmectítica más del 70% del total. El contacto entre la faja litológica de las magnesitas vetiformes en serpentinitas esmectitizadas y el intervalo bentonítico de color verde es totalmente transicional.

CAPITULO II

GENERALIDADES SOBRE LA MAGNESITA

2.1. Consideraciones Fundamentales

La magnesita se le conoce también como carbonato de magnesio, giobertita o espato amargo. Como segregación o elemento integrante, especialmente en rocas de metamorfismo regional, y muchas veces como producto de alteración de silicatos de magnesio o transformación metasomática de calizas y dolomías. Se encuentra como producto de alteración de la serpentina a causa del ataque del agua cargada de CO₂. También puede tener origen metamórfico.

El sistema es trigonal, la estructura cristalina es análoga a la de la calcita, el hábito se presenta en forma masiva o de agregados cristalinamente granulares y masas criptocristalinas compactas parecidas a la porcelana. La dureza generalmente es de 4 - 4,5. El peso específico de 3. Presentando variedad de colores dependiendo del tipo de depósito, desde incoloro, blanco, amarillento o gris. Raya blanca y brillo mate y vítreo.

2.2. Antecedentes de la Investigación

Estudios realizados anteriormente sobre concentración de magnesita no fueron hallados en cantidad, solamente se destaca el estudio de factibilidad realizado por el Ingeniero Geólogo Simón Rodríguez sobre producir óxido de magnesio comercial utilizando magnesita del Estado Cojedes en el año 1994 para Corpocentro/IGCP – MEM. Cabe destacar que no fueron localizados otros proyectos relacionados al tema ni como trabajos especiales de grado ni como páginas informativas en internet. Como objetivo general del proyecto del Ing. Simón Rodríguez era determinar la factibilidad de producir óxido de magnesio a partir de muestras del Complejo de Ultrabásico de Tinaquillo para el consumo de las industrias nacionales.

Las conclusiones del estudio indicaron que el material puede ser perfectamente explotado a cielo abierto con miras a la obtención de magnesita coherente de buena calidad; los análisis químicos ejecutados sobre la mena representativa reflejaron un porcentaje de MgCO_3 superior al 85% con SiO_2 como elemento insoluble y por último, las pruebas de calcinación y micronización realizadas a nivel semi-industrial indicaron la factibilidad de producir MgO para los sectores de los alimentos concentrados para animales, electrodos, pinturas y fertilizantes. Las recomendaciones fueron las siguientes: ejecutar con el sector privado pruebas de calcinación y micronización a nivel industrial de manera de enviar grandes volúmenes a los sectores de los alimentos concentrados para animales, electrodos y fertilizantes, con miras a su utilización.

Se tomaron como base, para los ensayos de flotación que se llevaron a cabo para concentrar la magnesita objeto de estudio, la información suministrada por la multinacional Cytec S.A. (sucursal de México) y datos reportados por la literatura especializada, mientras que el estudio de calcinación fue sustentado con datos bibliográficos y del trabajo realizado por el Ing. Simón Rodríguez.

2.3. Clasificación de la Magnesita

El óxido de magnesio o llamado también magnesia es producido de dos fuentes; natural y sintéticamente. Esta división divide el mundo de la magnesia cáustica, siendo los procesos de producción bastante diferentes, además los dos productos varían en calidad y precio, con la fuente sintética siendo más costosa. El proceso de obtener magnesia natural es más simple y análoga a una operación minera en comparación a las plantas necesarias de procesamiento químico para productos sintéticos. La magnesia de fuente natural alimenta el 82 % de capacidad instalada de la magnesia en el mundo. La fuente dominante es la magnesita (MgCO_3) en sus formas macrocristalina y criptocristalina. De menor importancia:

- Dolomita ($(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$).
- Hidromagnesita ($(3\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$).
- Brucita ($(\text{Mg}(\text{OH})_2)$) y Serpentina ($(\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$).

El material sintético es elaborado del agua de mar y de niveles de salmueras ricas en magnesita. El proceso implica la extracción de magnesio disuelto, el cual tiene una concentración alrededor de 1.3 g/l en agua de mar y de tres a cuarenta veces esa cantidad para las salmueras, este se somete a reacción con cloruro de magnesio y cal o una cal dolomítica para producir hidróxido de magnesio precipitado. Luego el precipitado es lavado y calcinado para dar la magnesita cáustica. (Industrial Minerals, 1997). A continuación se muestra el siguiente flujograma que indica las fuentes para obtención de magnesita y los tipos de productos (Figura 4).

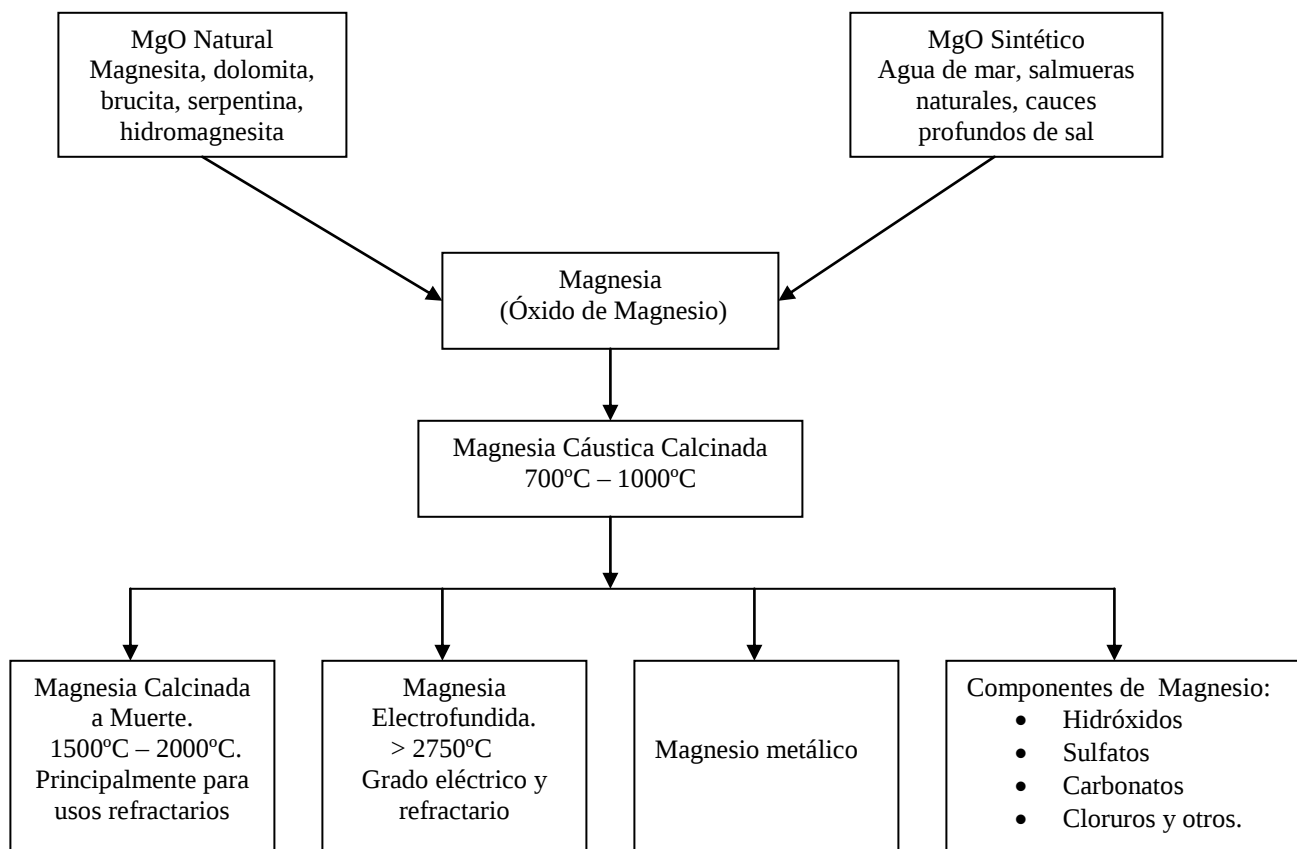


Fig. 4. Clasificación Industrial de la Magnesita.

Fuente: Industrial Minerals, 1997.

2.4. Usos y Especificaciones

La *magnesia cáustica* es únicamente una parte de la familia de la magnesia, este a su vez se puede dividir en magnesia fundida, magnesia calcinada a muerte y muchos otros componentes de magnesia. La magnesia cáustica es producida por la calcinación de la magnesita entre 700°C y 1000°C. Resultando en un producto con alta reactividad química determinada por su gran área de superficie específica. A mayor temperatura de calcinación se produce en gran parte magnesia calcinada a muerte o productos sinterizados los cuales son casi exclusivamente usados en la industria de los refractarios.

El empleo de la forma hidratada de la magnesia cáustica (hidróxido de magnesio) es para las áreas de tratamiento de aguas y retardadores de fuego, ambos para protección ambiental, salud y seguridad. Estas aplicaciones requieren de materiales en bruto muy específicos y de altas calidades, siendo los precios demandados muy altos.

2.4.1. Tratamiento de Aguas

La aplicación de la magnesia cáustica, o más precisamente su forma hidratada (hidróxido de magnesio), para tratamiento de aguas cae dentro de los atributos más importantes de la magnesia, sirviendo como neutralizador de soluciones ácidas.

En USA el tratamiento de aguas ha crecido significativamente por lo tanto los productores de magnesita se han interesado en procesarlo. El crecimiento viene no solamente por una demanda incrementada para el tratamiento de aguas sino también por cambios de los materiales en bruto tradicionales. En el pasado, la soda cáustica, cal y otros álcalis han sido usados para neutralizar aguas de desecho, pero por ciertas razones los consumidores están buscando el hidróxido de magnesio. Sin embargo, otros indican que el reciente crecimiento ha sido más por los problemas de la

industria de la soda cáustica que por la atracción hacia el hidróxido de magnesio. Las principales razones para la conversión a productos de magnesio son:

- Seguridad: a diferencia de la soda cáustica y la cal, el hidróxido de magnesio no causa quemaduras químicas.
- Acción amortiguadora: una corriente de agua de desecho tratada con hidróxido de magnesio tendrá un pH entre 9 y 10 el cual coincide con el límite superior permitido en varios países en la disposición de desechos. Si se adiciona cal en mayor cantidad de lo necesario el pH puede alcanzar 12.5, pero con la magnesia cáustica puede llegar hasta 14. Esto significa que se deben adicionar ácido para bajar y ajustar el pH para cumplir con las especificaciones de descarga. En plantas de procesamiento de aguas residuales y comida, la bacteria crucial de digestión es sensible a altos pH y si estas son eliminadas, el funcionamiento del sistema es reducido. Esto los hace una aplicación ideal para el hidróxido de magnesio, el cual no tiene problemas con la sobre adición.
- Reducción de lodos: durante la neutralización de desechos conteniendo sulfatos, el hidróxido de magnesio forma sulfatos de magnesio solubles comparado al yeso insoluble formado si se usa cal. Si se producen menos lodos, los costos de disposición son obviamente reducidas.
- Remoción de metales pesados: muchos metales pesados tales como plomo, níquel y cobre tienen sus menores solubilidades en un pH entre 8.5 y 10. Amortiguando en esta zona, el hidróxido de magnesio remueve más por precipitación que la soda cáustica o la cal. En resumen, por la baja solubilidad del hidróxido de magnesio, los

cristales de hidróxido de metal crecen más que con la cal o la soda cáustica resultando en un lodo más denso con mayor contenido de sólidos.

A continuación se destacan las principales aplicaciones y especificaciones del *hidróxido de magnesio* (Tabla 1):

- Neutralización de efluentes ácidos industriales.
- Remoción de metales pesados de los efluentes.
- Remoción de amoníaco y fósforo de aguas residuales.
- Control de acidez.
- Tratamiento para suministro de agua municipal.
- Desulfurización de gas de chimenea.
- Tratamiento de lluvias ácidas, tratamiento de suelos.
- Remoción de los tintes de los efluentes.
- Remoción de suspensiones sólidas en efluentes industriales.
- Incineración de desechos sólidos.

<i>Propiedades Químicas</i>	
<i>Como base (%):</i>	%
Mg(OH) ₂ sólidos secos	48.0 - 52.0
Agua libre	52.0 - 48.0
Pérdida de ignición	31.6
<i>Base Seca (%):</i>	
Mg(OH) ₂	97.0 mínimo
CaO	0.3 - 0.4
SiO ₂	0.16 - 0.3
Fe ₂ O ₃	0.10 - 0.15
Al ₂ O ₃	0.02 - 0.10
SO ₃	0.40 - 0.60
Cl	0.08 - 0.14
<i>Propiedades Físicas</i>	
Densidad Volumétrica	1.44 g/cm ³
Viscosidad	400 CPS
Área de superficie	25 m ² /g

Tabla 1. Especificaciones Típicas del Hidróxido de Magnesio.

Fuente: Corporación Nacional de Magnesia Química de USA.

2.4.2. Retardadores de Fuego

La búsqueda para la seguridad y cuidado del ambiente ha permitido desarrollar este importante elemento para dicha aplicación. El uso de retardadores de fuego en compuestos plásticos es un mercado que ha ascendido así como el uso del plástico en la actualidad. El plástico puede ser muy efectivo en reemplazo de la madera, vidrio y metales, pero tiene como inconveniente su alta inflamabilidad. No solamente el plástico se quema y causa daños físicos, además de expulsar humos nocivos los cuales son responsables de muchas muertes que propiamente por el fuego. Es por esta razón que el plástico contiene retardadores de fuego.

En la búsqueda de retardadores de fuego alternativos, diversos minerales o compuestos de minerales han emergido en los últimos años. El compuesto más dominante es el hidróxido de aluminio o alúmina trihidratada (ATH), el cual ha sido establecido desde el año 1920 como un retardador de fuego y ocupa un tercio o la mitad del mercado mundial de este producto. El ATH funciona por un proceso de descomposición endotérmica que absorbe el calor y retarda la combustión.

2.4.3. Agricultura

El hidróxido de magnesio es empleado para alimentos de animales y componentes fertilizantes, siendo la primera el sector más importante. La magnesia cáustica disfruta de una rara posición en el mundo de los minerales industriales, a saber que posee poca o ninguna competencia de otras sustancias para que sean usadas para compuestos de comida.

Una adecuada dosis para la dieta del ganado generalmente es alcanzada por los compuestos alimenticios en tres formas; en grandes láminas minerales o bloques de pasto conteniendo sales, magnesio, y melaza que es colocada en el campo como bolitas de comida conteniendo minerales y ciertos aditivos, o también como polvo, estas dosis ayudan a evitar que el ganado contraiga ciertas enfermedades peligrosas.

2.4.4. Cementos Magnesianos y Materiales de Construcción

Dentro del sector de la construcción, la principal aplicación para la magnesia es en los cementos magnesianos. En estas aplicaciones el magnesio en la forma de magnesia, cloruro de magnesio y sulfato de magnesio son usados para producir cemento los cuales son resistentes al fuego, de puesta rápida, aislante, peso ligero, fuerte y de bajo costo.

Quizás el cemento de magnesio más conocido es el Sorel, o cemento oxiclорuro de magnesio. Este es hecho de una mezcla de magnesia calcinada, cloruro de magnesio (en iguales cantidades), y una pequeña proporción de hexametаfosfato de sodio (0.5%). El requerimiento para el material calcinado es que debe poseer bajo contenido de cal y bajo contenido de hierro si el color es importante.

El uso más importante del cemento Sorel es para pisos de edificios industriales, donde además se beneficia de propiedades repelentes de insectos. Otras aplicaciones para el cemento Sorel son como espesador en la manufactura de compuestos laminares de poliéster, como ligadura en abrasivos, puertas anti – fuego y como capas de acero estructural.

2.4.5. Aplicaciones Industriales

Componentes de magnesio: tales como el oxisulfato de magnesio, hidróxido, oxiclорuro, bisulfito y sulfato. Muchas de las aplicaciones que serán nombradas posteriormente usan un químico magnesiano, procesado de la magnesia cáustica, lo cual explica porque el material cáustico es muchas veces referido como una magnesia química.

La industria del papel y la pulpa: proporciona un mercado para la magnesia cáustica durante un proceso oxigenado de blanqueamiento que toma lugar después que la pulpa con licor ha sido preparada. Granos finos de magnesia cáustica son usados para proteger las fibras celulosas del ataque del oxígeno durante el blanqueamiento, el cual puede debilitar la pulpa. La magnesia, que forma alrededor de 1 % de la mezcla de la pulpa, necesita estar fina para penetrar la fibra celulosa.

Procesamiento de azúcar en remolacha: la magnesia y el hidróxido de magnesio son usados para incrementar el rendimiento de la remolacha, especialmente esta es sucia o de baja calidad. Esta aplicación también ha sido suplida por el

carbonato de sodio o el hidróxido de sodio, pero la magnesia permite un mayor control del pH.

2.4.6. Aplicaciones Industriales Especiales

Farmacéutico: la leche de magnesia es quizás el producto de magnesia más obvio usado medicinalmente (es usado como laxante). Es preparado por dilución del hidróxido de magnesio (obtenido del procesamiento de magnesia de agua de mar) con agua a concentraciones de 80 g/l. La magnesia es usada extensamente como un diluyente alcalino en preparaciones bucales y es aceptado como aditivo para comidas en Europa. La magnesia es también usada como un antiácido en tabletas en concentraciones de alrededor de 7 %. Para cualquier aplicación farmacéutica, son esenciales altos grados de pureza y el producto debe ser incoloro, inodoro, fino y libre de algunas impurezas.

Revestimientos de acero con grado eléctrico: esta ha sido una aplicación de la magnesia de hace 25 años y posee requerimientos muy precisos. El acero es revestido con magnesia que reacciona con la sílice para formar una capa vítrea. No solamente debe haber una buena atadura con el acero y crear una especie de barrera, también debe tener propiedades de insolación eléctricas. Las especificaciones físicas y químicas para la magnesia de grado eléctrico son estrictas, los productos deben ser confeccionados para los requerimientos del cliente.

Cauchos, plásticos y aplicaciones adhesivas: magnesia altamente activa es usada en varios procesos de manufactura para cauchos y plásticos para antiabrasivos, como regulador de la proporción de vulcanización y para productos de fricción tales como frenos y forros de embragues.

Aditivos de combustible: compuestos de magnesia son usados en lubricación de aceites y aceites combustibles como detergentes o aditivos de combustibles

básicos. En aceites combustibles, la magnesia y el hidróxido de magnesio son usados para controlar la corrosión de combustibles con alto contenido de vanadio y sulfuro.

Magnesita calcinada a muerte: la magnesita calcinada a muerte de grado premium abarca productos con un mínimo contenido de magnesia (MgO) de 96 %, densidad volumétrica mayor de 3.40 g/cm^3 , una relación de cal : sílice mayor de 2:1, contenido de sílice menor que 0.6 %, y niveles de B_2O_3 menores que 0.015 %. Estos son en gran parte producidos por plantas de agua de mar o salmueras pero también de diversas operaciones basadas en la alta pureza, natural, magnesitas criptocristalinas de grano fino tales como las de Turquía, Grecia y Australia.

Cuando se habla de magnesita calcinada a muerte, la calidad mundial cubre un número de parámetros, cada uno de los cuales influencia el valor del producto y pudiera afectar función refractaria. Para el fabricante de refractarios las variables cruciales (sin ningún orden en particular) son el contenido de magnesia, los niveles de impureza tales como sílice, alúmina y óxidos de hierro, la relación de cal : sílice, contenido de óxido de boro, densidad volumétrica y el tamaño de cristal de periclase.

Para hacer ladrillos refractarios, se usa grado premium (no necesariamente siempre se usa de tan alta calidad) que exige un contenido mínimo de 96 % de MgO (preferiblemente mayor de 96.5 %). La densidad volumétrica es uno de los parámetros más importantes, debe exceder de 3.40 g/cm^3 . Con modernas técnicas densificadoras de multi-etapas se pueden alcanzar valores de hasta 3.45 g/cm^3 en magnesitas calcinadas a muerte sintéticas, además esta es un área donde la magnesia fundida alcanza densidades hasta de 3.50 g/cm^3 . La relación cal:sílice es crucial para el desarrollo de los vínculos del silicato de calcio. La mínima relación de $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ requerido es de 2:1, y puede muchas veces estar de 4:1 o más. Acerca de buscar un nivel bajo de impurezas, aquellas que deben ser reducidas con mayor importancia son el sílice (preferiblemente menor de 0.3 %), alúmina, óxido de hierro y óxido de boro

(menor de 0.015 %). Este último actúa como un fundente poderoso de los vínculos del silicato de dicalcio, destruyendo la resistencia de estos.

En ladrillos de magnesio-carbón, el boro puede reducir la habilidad de la magnesia de resistir la reducción por el carbón. Sin embargo en ciertas formulaciones el nivel de boro puede intencionalmente exceder de 0.1 % para mejorar la resistencia a la hidratación. La importancia de minimizar el contenido de boro puede poner a los productores de magnesia de agua de mar con una ligera desventaja ya que sus productos naturalmente contienen al menos 0.02 % de B_2O_3 .

A través de avances en los procesos de manufactura, tales como, sinterización a temperaturas más altas y duraderas, control cercano de refrigeración; ahora la mayoría de los productores de magnesita calcinada a muerte poseen grandes calidades. En estas, los cristales de periclase deben tener al menos 120 μ de diámetro y puede exceder de 160 μ .

La magnesita calcinada a muerte se emplea principalmente como refractario básico en las escorias básicas de los hornos metalúrgicos, hornos de cemento y para usar frente a materiales corrosivos. El éxito que ha tenido el convertidor básico, el horno básico de solera, y los hornos eléctricos se debe no en pequeña proporción al empleo de este material. El carbonato se calcina a 1500° C, pierde el anhídrido carbónico, y la magnesia se convierte en periclase. Esta se dispone en ladrillos de magnesita o se la emplea en gránulos, que forman los lechos de hogar de los hornos básicos de acero, pero no el techo debido a su tendencia a dilatarse y desconcharse. La magnesita se emplea también en "ladrillos de magnesita no apagada" que resisten el desconchado mejor que el ladrillo ordinario de magnesita.

En la industria de los refractarios, los términos "Magnesita" y "Magnesita Calcinada a Muerte" son indistintamente usados para referirse a aquellos materiales de origen natural o sintético sinterizados a muy altas temperaturas para obtener un

producto químicamente inerte y de máxima densidad, que está constituido principalmente por cristales de óxido de magnesio (periclasa) y en el cual están presentes cantidades variables de óxidos accesorios, tales como, cal, sílice, alúmina, óxido de hierro y de boro. La presencia de estos óxidos y sus cantidades relativas determinan la existencia de diversos compuestos, los cuales a su vez gobiernan el campo de aplicación y el uso final de las magnesitas.

En efecto, la periclasa por su altísimo punto de fusión (2825° C) y excelente resistencia al ataque por fundentes como óxidos de hierro, cal y álcalis, es un material particularmente apropiado para ser usado en la fabricación de refractarios para las industrias del acero, de los metales no ferrosos y del cemento. Durante los últimos años, las condiciones de servicio cada vez más severas que son consecuencia de innovaciones tecnológicas han obligado a los productores de magnesita calcinada a muerte a controlar muy cuidadosamente la cantidad de óxidos accesorios a fin de obtener el máximo beneficio de las propiedades intrínsecas de la periclasa. Es por eso que existen en el mercado distintos tipos de magnesita calcinada a muerte cuya composición y distribución de óxidos accesorios determinan su aplicación final.

A nivel mundial los productos provenientes de la magnesita (Ver Anexo 1) son usados en todas las industrias mostradas en la tabla 2, dependiendo en gran medida en la pureza, densidad y tamaño de granos ofrecidos por los vendedores. En Venezuela, las industrias consumidoras principalmente ocupan el sector de los refractarios (Ver anexo 2 y 3), cerámicas, revestimientos, productos químicos, cauchos, frenos, electrodos y alimentos para animales; siendo el primer sector el más importante, mientras los demás se presentan en menor proporción. A continuación se muestra un cuadro resumen de las aplicaciones de la magnesita en todos sus productos en el mercado mundial, así como la granulometría empleada para tales usos (Tabla 2):

Aplicación	Uso	Malla
Abrasivos	Como una ligadura en ruedas	- 48 + 65
Comida para animales	Fuente de iones de magnesio para aves, ganado y otros	- 20 + 200
Aditivos de combustible	Reduce la corrosión de tuberías de acero	- 325
Tratamiento de aguas	Reduce hierro, sílice y sólidos	- 200 + 325
Químicos	Para la producción de sales de magnesio, tales como, sulfatos y nitratos	- 100 + 200 - 325
Revestimiento en pinturas	Como pigmento en pinturas y barnices	- 200 + 325 - 325
Construcción	En cementos de oxycoloruro usados para paredes y tejas	- 16 + 65
Eléctrica	Semiconductores; elementos aislantes de calor	- 100 + 200
Fertilizantes	Fuente esencial de magnesio para plantas de nutrición	- 20 + 200
Fundición	Catalizador y aceptador de agua en shell molding	- 65 + 150
Manufactura de vidrio	Ingrediente para fibras de vidrio y vidrios decorativos	- 100 + 200
Aislamiento	Esterillas flexibles para aislamiento de tuberías	- 100 + 200
Combustibles lubricantes	Aditivo para neutralizar ácidos	- 200 + 325
Productos farmacéuticos	Grados especiales de hidróxidos de magnesio, óxidos y carbonatos usados en antiácidos, cosméticos, pasta de dientes	- 200 + 325 -325
Manufactura de plásticos	Relleno, aceptador de ácido, catalizador espesador y como pigmento extendido	- 70 + 100
Refractarios y cerámicas	Ingrediente básico en productos para la industria del acero	2'', 1 ^{1/2} '', 4, 6, 10, 16, 100 – 200
Cauchos	Relleno, aceptador de ácidos, ingrediente anti-abrasivo	- 65 + 150
Industria del acero	Revestimientos	2'', 1 ^{1/2} '', 4, 6, 10, 16, 100 – 200

Tabla 2 Especificaciones de Uso de la Magnesita.
Fuente: Martín Marietta Magnesia, 2002

Aplicación	Uso	Malla
Procesamiento de uranio, galio y boro	Iniciador de precipitación por neutralización ácida	- 200 + 325 -325
Tratamiento de aguas de desecho	Neutralizador de flujos ácidos, precipitador de metales pesados	- 120 + 200 -325

Tabla 2. Especificaciones de Uso de la Magnesita.

Fuente: Martín Marietta Magnesia, 2002 (Continuación).

2.5. Tipos de Depósitos

Desde el punto de vista genético, tres tipos de magnesita pueden ser reconocidos: las secuencias estratiformes asociadas con mármoles y dolomitas o magnesita cristalina; la magnesita asociada con los procesos de depositación a partir de soluciones ricas en magnesio y la magnesita vetiforme relacionada con los procesos de serpentización o denominada también magnesita criptocristalina.

- a) Las secuencias estratiformes de magnesita constituyen probablemente las mayores reservas de MgCO_3 a nivel mundial. Normalmente se asocian por reemplazamiento de gruesos intervalos metamórficos de dolomitas, mármoles y esquistos, conformando depósitos de gran volumen, caracterizados por una magnesita de alta calidad, con bajos valores de sílice. La magnesita se encuentra estrechamente asociada con la actividad intrusiva. Se ha sugerido que la actividad ígnea ha sido la fuente de las soluciones iniciales de sustentamiento de CO_2 . La mineralogía de estos tipos de depósitos indican una alta temperatura de formación. Los depósitos cristalinos suplen aproximadamente cerca de dos tercios de la magnesita usada comercialmente. El origen geológico de la dolomita es visto como sedimentario, y algunas investigaciones han sugerido también un origen sedimentario tanto para la magnesita como para dolomita, pero una aprobación de un consenso secundario destaca que la magnesita reemplaza a la dolomita preexistente por

acción hidrotermal. Son importantes los yacimientos de este tipo de magnesita en Austria, Brasil, Canadá, Australia, Corea del Norte, Nepal, China, Checoslovaquia España, Rusia y Estados Unidos. Hasta los momentos depósitos de este tipo no han sido ubicados en Venezuela.

- b) La magnesita asociada con depositación a partir de soluciones ricas en magnesio en áreas cerradas, ricas en niveles esmectíticos constituye uno de los yacimientos menos conocidos y relativamente raros a nivel mundial. Conforman niveles irregulares, poco uniformes y relativamente de alta calidad asociados íntimamente con arcillas bentoníticas. A nivel mundial depósitos importantes de este tipo se han ubicado en Turquía y Australia (Industrial Minerals, 1987). En Venezuela depósitos de este tipo han sido ubicados en las zonas de La Peluda y Tamanaco, Estado Cojedes.
- c) La magnesita vetiforme, asociada con serpentinitas muy meteorizadas y parcialmente cizalladas, y las cuales forman parte de grandes complejos normalmente alóctonos y de tipo alpino, constituye en la actualidad una de las principales fuentes de $MgCO_3$. La magnesita criptocristalina o amorfa se presenta como una alteración de serpentina o rocas que han sido sujetas a la acción de agua carbonática. La serpentina es producto de la alteración de rocas ultrabásicas. El modo de formación de la magnesita limita las cantidades de impurezas a cantidades relativamente pequeñas de hierro, cal y sílice.

Los depósitos de magnesita vetiforme son de dos tipos, el primero está íntimamente asociado con masa de serpentina donde la magnesita ocurre como venas de varios espesores, y como cuerpos masivos y masas lenticulares o como stockwork con venas irregulares desde pocos centímetros hasta varios metros de espesor. El segundo se encuentra también asociado con rocas ultrabásicas como la fuente de magnesio, pero en este la roca caja ha estado a la intemperie, erosionada, transportada, y depositada en ambientes lacustrinos. En este punto la descomposición

ha sido completada y la magnesita precipitada en una matriz lodosa junto con impurezas. Subsecuentemente, una recrystalización toma lugar y la magnesita se acumula para formar nódulos y cantos rodados (terrón) sobre las orillas de los lagos de lodo, resultando esto en depósitos a gran escala de magnesita secundaria. Los depósitos son beneficiados por proceso de beneficio natural y son normalmente de alta pureza.

En ambos tipos de depósitos criptocrystalinos la reacción del agua sobre la serpentina es necesaria. La relación entre la temperatura y la presión de dióxido de carbono es crítica para la formación de la magnesita. Las zonas más cercanas a la superficie de la Tierra están más favorablemente situadas para que ocurra esta reacción, por lo tanto, la mayoría de los depósitos de este tipo de magnesita son encontrados cerca de la superficie, con una extensión en profundidad limitada (Industrial Minerals, 1994).

La ocurrencia de este tipo de magnesita es comúnmente encontrada a través del mundo, pero por su tamaño limitado, con la excepción notable de aquellos presentes en Grecia, India, Turquía, Yugoslavia y Australia, son explotados comercialmente.

Actualmente depósitos de este tipo se explotan en México, Cuba, Estados Unidos, Grecia, Turquía, Yugoslavia y la India. Venezuela presenta depósitos económicos de magnesita vetiforme en los Estados Cojedes y Nueva Esparta (MacKenzie, 1960; Bellizzia, 1967; Pantin, 1967 y Rodríguez J. Y Velasco C., 1987).

2.5.1. Depósitos de Magnesita en Venezuela

Venezuela presenta cuerpos ultrabásicos serpentinizados en numerosos Estados del norte del país, esencialmente asociados con complejos básicos tipo alpino y ubicados en zonas tectónicamente activas de la Cordillera de la Costa, sólo muy

pocos de esos cuerpos ubicados en Cojedes y Nueva Esparta poseen depósitos comerciales de magnesita, aún cuando presentan otros yacimientos de gran importancia económica (Figura 5).

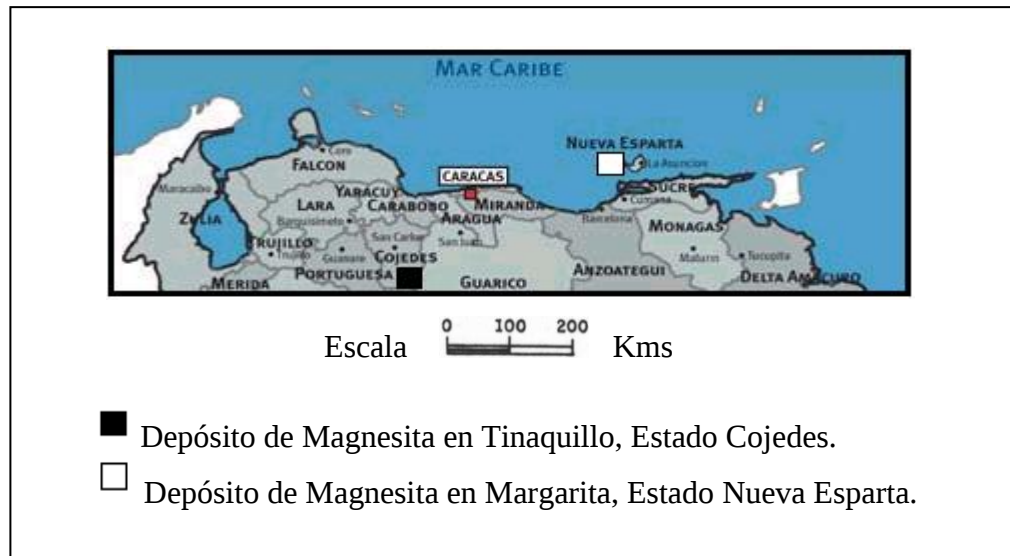


Fig. 5. Depósitos de Magnesita en Venezuela.

Hasta los momentos se han ubicado complejos de rocas ultrabásicas serpentinizadas en las zonas de Tausabana – El Rodeo, Estado Falcón; Cabimba, Yaracuy; San Joaquín, Carabobo; Villa de Cura, Aragua; Carúpano, Estado Sucre; Loma de Hierro, Estado Aragua; Tinaquillo, Estado Cojedes y Loma de Guerra – La Asunción, Estado Nueva Esparta. Los Complejos Ultrabásicos de Tausabana – El Rodeo, Paraguaná, Falcón, conforman niveles complejos de dunitas, piroxenitas, garbos y serpentinitas con una dirección preferencial casi este-oeste. Estudios ejecutados por el Ministerio de Energía y Minas indicaron la presencia de depósitos comerciales de cromita y atapulguita, pero no existen concentraciones económicas de magnesita. (Rodríguez, S. 1989). El Complejo Ultrabásico de Cabimba, Estado Yaracuy, aún cuando presenta depósitos comerciales de talco y esteatita, las concentraciones presentes de magnesita son subeconómicas (Martín, C. Y Bellizia, A. 1967).

Los cuerpos ultrabásicos de San Joaquín, Carabobo; Villa de Cura, Aragua y Carúpano, Sucre, configuran masas de serpentinitas muy cizalladas intrusionadas como cuerpos fríos en zonas tectonizadas delimitando napas estructurales en la Cordillera de la Costa. En ninguno de esos cuerpos se detectaron concentraciones económicas de magnesita.

La zona de Loma de Hierro, Aragua, conforma un extenso cuerpo de hazburguita serpentinizada enriquecida en garnierita, un silicato hidratado de níquel. Estudios ejecutados por el Ministerio de Energía y Minas definieron un depósito económico de mena de níquel con más de 30 millones de mena con un contenido de Ni cercano al 2 %. El depósito actualmente está en explotación para la producción de ferroníquel. El yacimiento no presenta manifestaciones económicas de magnesita.

Nueva Esparta es muy rico en cuerpos ultrabásicos serpentinizados. Masas de serpentinita, sumamente cizalladas y aflorando entre la Asunción y Loma de Guerra, presentan importantes depósitos de magnesita vetiforme. Se estima que el Estado puede contener más de 20 millones de toneladas de magnesita, pero el intenso desarrollo turístico y urbanístico de la zona impide cualquier desarrollo de los mismos a gran escala (Pantín, 1967).

El Complejo de Tinaquillo, Estado Cojedes, presenta muy probablemente los mejores depósitos de magnesita del país en cuanto a parámetros geográficos, logísticos y cualitativos se refiere. Los depósitos constituyen una extensa faja que se extiende desde la Teta de Tinaquillo al sur, hasta el área del Hato Tamanaco, ubicándose las principales concentraciones en el área de Tigre Galán, Cerrito Blanco y Tamanaco, los cuales pueden en forma sistemática ser explotados a cielo abierto por métodos normales de extracción.

Depósitos de Magnesita del Estado Cojedes

Según Rodríguez, J.A y Velasco, C. (1987), la zona norte del Estado Cojedes guarda una importante reserva de magnesita vetiforme asociada con el Complejo Ultrabásico de Tinaquillo. Estudios realizados por la Dirección de Geología del Ministerio de Energía y Minas entre 1986 y 1989 indicaron la presencia de dos distritos de magnesita asociados con procesos afectando las rocas ultrabásicas de la zona. Un distrito de magnesita vetiforme “primaria” conforma una extensa faja, extendiéndose desde la zona norte extrema de la Teta de Tinaquillo hasta el Hato Tamanaco (Represa Las Delicias). Una zona de magnesita secundaria, asociada íntimamente con el grueso nivel de arcillas esmectíticas (bentonita) orientales del Complejo Ultrabásico. Estos últimos depósitos conforman masas poco uniformes y difíciles de explotar debido a su morfología y a la íntima asociación con las arcillas bentoníticas.

De acuerdo a los estudios de campo ejecutados por el Ministerio de Energía y Minas, los principales yacimientos se ubican al norte de la Teta de Tinaquillo, en el área Las Delicias y Cerrito Blanco pertenecientes al Hato Tamanaco (Ver Anexo 4), siendo este último el objeto de estudio del presente trabajo. Los depósitos de magnesita “primaria” se presentan como importantes concentraciones vetiformes de material blanco, uniforme, de alta calidad, cortando serpentinitas totalmente meteorizadas a arcillas esmectíticas de color verdoso amarillento.

Depósitos de Magnesita del Estado Nueva Esparta

Margarita Oriental, Estado Nueva Esparta, presenta numerosos cuerpos ultrabásicos afectando secuencias metamórficas de mediano grado. Estos cuerpos están representados por dunitas sumamente serpentinizadas y fracturadas, normalmente ubicadas en zonas muy tectonizadas (Pantín, 1967).

La magnesita es blanca, de bastante pureza, densa y con fractura astillada. Es de grano fino o concoide si es criptocristalina. Su dureza es de 4 a 4.5. El mineral se presenta en bolsones, vetas o filones enrejados a lo largo de una serpentina pobremente meteorizada, lo cual puede significar problemas durante los procesos de separación y concentración de la mena. A diferencia de los yacimientos ubicados en el Estado Cojedes, las serpentinas meteorizadas de Margarita Oriental no presentan gruesas secuencias de arcillas esmectíticas, muy probablemente debido a factores fisiográficos y ambientales locales. De acuerdo a los estudios ejecutados en Margarita Oriental, se han ubicado depósitos económicos de magnesita vetiforme en las áreas de Loma de Guerra, La Estancia, Valle de Pedro González, Manzanillo y La Sabana. Los depósitos de Loma de Guerra se encuentran a unos 9 Km de la Asunción. En la actualidad muchos de los yacimientos se ubican en áreas turísticas o urbanizadas lo cual es obstáculo para su desarrollo. Por otro lado la gran distancia de los yacimientos a las áreas industriales del centro del país podría ser negativo para su desarrollo.

2.6. Morfología de los Depósitos del Estado Cojedes

Morfológicamente, de acuerdo a los estudios de campo ejecutados tanto por el Ministerio de Energía y Minas (Dirección de Geología) como por la Corporación de Desarrollo de la Región Central, CORPOCENTRO, entre 1986 y 1991, han mostrado que los yacimientos de magnesita vetiforme asociados con serpentinitas extremadamente meteorizadas y esmectitizadas del Complejo de Tinaquillo, constituyen una faja relativamente uniforme que se extiende desde el norte de la Teta de Tinaquillo hasta el Hato Tamanaco, por más de 9 kilómetros. Depósitos importantes han sido ubicados en las zonas de Tigre Galán – Carache, Cerrito Blanco y Las Delicias (Hato Tamanaco). La extensión individual de las fajas económicas supera normalmente los 100 – 200 metros y la anchura de las mismas, dependiendo de factores genéticos locales y la fisiografía local, pueden en muchos casos superar los 50 metros. Siempre la zona económica se presenta en forma paralela a rocas

serpentiníticas poco meteorizadas a los niveles de bentonitas verdosas plásticas extremas orientales.

En el caso del depósito ubicado en el área de Cerrito Blanco las reservas fueron medidas a partir del mapa base, tomando en cuenta el espesor promedio dado en los estudios del Ministerio de Energía y Minas y una densidad para la magnesita de 3 ton/m^3 . Las reservas probables aproximadamente son 2.045.145 toneladas o 681.715 m^3 , pudiendo estas en un futuro ser explotadas, beneficiaría al consumo interno del país (Figura 6).



Fig. 6. Zona de Toma de Muestras

2.7. Aspectos Mineros

Las características litológicas y morfológicas de los yacimientos de magnesita vetiforme por ser de la forma natural, asociadas a la intensa serpentización y esmectitización de las rocas ultrabásicas, indica la posibilidad de planificar y ejecutar la extracción a cielo abierto con miras a la obtención de concentrados de magnesita.

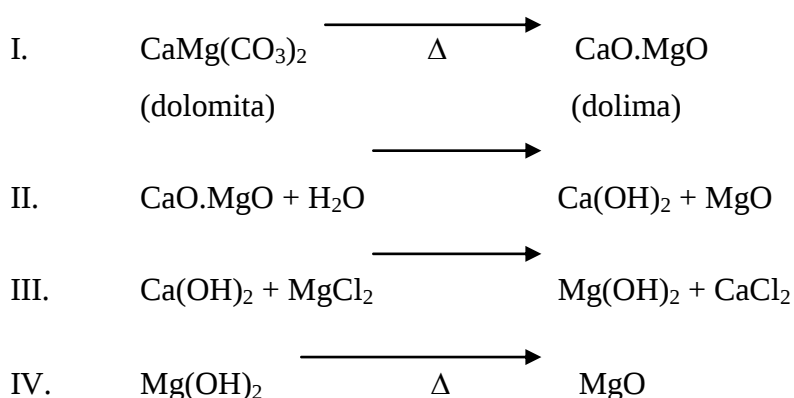
El carácter no consolidado de la roca mineralizada permitiría extraer el material en forma continua sin necesidad de utilizar explosivos. Como consecuencia de la profunda esmectitización sufrida por la serpentinita, la roca ha sido

transformada en un producto arcilloso donde la magnesita coherente y vetiforme constituye vetas enrejadas en el material no consolidado. La extracción se ejecutaría en forma continua, preferiblemente durante la época seca de manera de evitar problemas con el material arcilloso húmedo. Durante este lapso se podría acumular un volumen alto de material seco con miras a su tratamiento.

Este material, luego de un escogido a mano y lavado, sería transportado a la planta de tratamiento, cabe destacar que dependiendo de si se aplicara el método de concentración en estudio para obtener las especificaciones exigidas por el mercado, se agregaría al circuito del procesamiento del mineral, aumentando considerablemente los costos.

Además de la magnesita natural; para obtener magnesita sintéticamente a partir de agua de mar o salmueras el procesamiento no es precisamente como el natural, sino que presenta muchas diferencias. El proceso de obtención usado generalmente es el siguiente:

Primeramente un factor crucial es disponer de una salmuera de alta concentración en MgCl_2 (aproximadamente 20%) y un bajo contenido en boro. Entre los diferentes procesos conocidos se destaca el correspondiente con la reacción con CaO.MgO (dolima). El proceso completo puede representarse por cuatro reacciones químicas relativamente simples:



CAPITULO III

MERCADO Y TENDENCIAS

3.1. Mercado Mundial

Dependiendo del punto de vista en que sea observado, el mercado de la magnesia cáustica pudiera estar bastante estancado sin haber cambiado mucho en los últimos años, o verse como una lid excitante ofreciendo numerosas oportunidades. La opinión depende de la especie de magnesia que obtiene el productor o por la naturaleza de los clientes que se desean atraer. Debido a esto ciertamente la industria de la magnesia cáustica está dividida.

De un lado existe el producto final en el mercado, luchando contra la competencia, previendo en exceso, e intentando suplir la magnesita calcinada a muerte para alcanzar cierta participación entre los productores tradicionales. La magnesita calcinada a muerte es el producto de alto volumen y bajo valor en el mercado, habiendo reducidos desarrollos. En contraste, los productos más específicos en el mercado parecen tener más acción. Los suplidores son menos, los productos están enfocados para aplicaciones más particulares, y se han desarrollado últimamente más, aunque lentamente. Estos productos son de alto valor y bajo volumen y son realizados por algunos productores de magnesita calcinada a muerte debido a las altas inversiones que se deben hacer para los equipos necesarios para poder competir con productores ya establecidos.

Parte de la razón por la cual la competición está tan ajustada en el producto final puesto en el mercado es que es atractivo para los productores de magnesia de grado refractario probar con las demás tendencias. Los productores de magnesita calcinada a muerte se encuentran en gran parte confiados por la industria del acero, pero se mantienen pendientes por la posible pérdida de esa dependencia sobre una industria que ha reducido su consumo refractario.

La tendencia comenzó a principio de la década del 90 cuando ciertas compañías a nivel mundial prestaron su interés a otros productos específicos calcinados a muerte, así como el mercado de la magnesia cáustica e hidróxido de magnesio. Varias compañías ya han hecho la transición mientras otras mantienen su interés por desarrollarlo a futuro para competir en el mercado tan exigente.

Para la magnesita calcinada a muerte grado premium, los mercados maduros tales como, el oeste de Europa, Norteamérica y Japón, es probable que no exista crecimiento, sino un declive marginal en la demanda de corto a largo plazo en el consumo de refractario por tonelada de acero. Por otro lado, sin embargo, la demanda por acero más limpio favorece en gran parte para materiales refractarios de alta pureza, y los productores de magnesita calcinada a muerte de grandes cristales deben competir con la magnesia fundida. Es probable que el crecimiento de la demanda se fortalezca para los productos de magnesia Premium para el desarrollo de las industrias del acero en regiones como, el Sureste de Asia, India y Sur América. Siendo manejado no solamente por el alza de la producción de acero sino también por los requerimientos de calidad más altos.

En el área de hidróxido de magnesio, frecuentemente el aspecto económico dicta a la decisión final para convertir la magnesia para refractarios en otros tipos de magnesia, como el hidróxido de magnesio. Algunos productores dicen que una vez hecha la conversión al hidróxido de magnesio se observan los beneficios que este producto conlleva. El crecimiento en el consumo de este producto no ha sido tan rápido como los productores desean, pero ha ido en aumento. El mercado en Estados Unidos es más fuerte que en Europa.

En Norteamérica, los mayores productores son The Dow Chemical Co., American Premier Inc., National Magnesia Chemicals, Martín Marietta Magnesia Specialities y CircleMag. En México, el grupo Los Peñoles. En Japón, el uso de hidróxido de magnesio para desulfurización de gas es una aplicación de continuo

crecimiento. La Ube Material Industries tiene un gran campo en este mercado, repartiendo alrededor de un tercio de su capacidad de producción total a este sector. La regulación en Japón está abriendo la industria de generación de energía hacia compañías privadas, que tienden a usar combustible de hi – sulfuro; representando una oportunidad al mercado emergente para el hidróxido de magnesio. En Gran Bretaña, Redland Aggregates está supliendo la demanda y estudia la posibilidad de extender su mercado hacia países europeos. Mientras que Magnesitas Navarras en Europa están realizando ensayos para tratamiento de efluentes ácidos y de lluvias ácidas.

En estadísticas recientes acerca del hidróxido de magnesio usado como retardador de fuego, se estima que el mercado total mundial de este producto es de solamente 10.000 a 15.000 tpa en contra del tamaño de mercado de los retardadores ATH que poseen una cantidad de 300.000 a 475.000 tpa. El crecimiento en la demanda que algunos analistas esperaban para unos años atrás, todavía no ha ocurrido. Sin embargo, cabe resaltar que el potencial todavía existe y un número de productores están tratando en lo posible de expandirlo.

Existen tres principales productores: Kyowa Chemical, Dead Sea Periclase y Magnifin Magnesia produkte Gessellschaft mbH. Siendo la primera la mayor productora con 10.000 a 12.000 tpa. Martin Marietta, Incemin, Duslo Sala, Alcan Chemicals Europe son otros productores, pero a menor escala.

El mercado en Gran Bretaña de la magnesia cáustica aplicada a alimentos de animales es del orden de 45.000 tpa, siendo en los Estados Unidos probablemente el doble de este. El nivel anual de demanda está caracterizado por variaciones de ± 10 %, estando cercanamente asociado al clima y al éxito de las cosechas. Sin embargo, en Gran Bretaña el mercado ha tenido otros contratiempos en los recientes años, entre otros, y quizás más dramáticamente, la encefalopatía espongiforme bovina (vacas

locas), la consolidación en la industria, los precios competitivos, influenciando todos a una atmósfera más intensa de competitividad.

Desde el principio de los años noventa, la industria de los alimentos ha tenido importante consolidación, resultando en pocas pero grandes compañías responsables de comprar el producto. La competitividad en los precios ha puesto presión sobre los productores para reducir los precios, de hasta 10 % menos. La competencia principal viene de las grandes cantidades de material chino a bajo costo hacia el Reino Unido o hacia otros países europeos.

Para los materiales de construcción, cementos magnesianos, papel, pulpa, en procesamiento de remolacha azucarada, para productos farmacéuticos, revestimientos de acero de grado eléctrico, cauchos, plásticos, aplicaciones adhesivas y aditivos para combustibles; existen mercados más reducidos pero con gran potencial por desarrollar (Industrial Minerals, 1996).

En la tabla 3 se observa que los principales productores de magnesia cáustica son China, Corea del Norte, Turquía y Estados Unidos, aunque este último no esté en la tabla proporcionada por la fuente, se sabe que este país es un gran productor por otras bibliografías consultadas. Los demás países poseen producciones en menor cantidad, manteniéndose a un nivel constante a través de los años (Anexo 5).

País	1995	1996	1997	1998	1999
Australia	263.249	237.707	245.192	360.113	195.000
Austria	784.000	624.000	650.000	650.000	650.000
Brasil	315.978	305.737	294.629	308.300	310.000
Canadá	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000
China	2.050.000	2.100.000	2.400.000	2.400.000	2.450.000
Colombia	10.500	10.500	10.500	10.500	10.500
Grecia	565.720	682.346	623.050	650.000	650.000
India	335.189	373.306	362.929	355.033	360.000
Irán	40.000	40.000	40.000	40.000	40.000
Corea del Norte	1.600.000	1.600.000	1.600.000	1.600.000	1.000.000
México	250	200	231	274	275
Pakistán	16.891	3.202	4.057	3.157	3.000
Filipinas	700	700	700	700	700
Polonia	21.500	19.300	6.403	5.745	6.000
Rusia	1.000.000	1.000.000	1.040.000	851.845	900.000
Serbia y Montenegro	75.000	89.000	95.000	100.000	30.000
Slovakia	814.500	824.800	863.600	877.840	850.000
África del Sur	84.639	71.358	76.669	74.300	75.000
España	491.397	483.726	500.000	500.000	500.000
Turquía	1.928.064	2.339.138	1.409.768	2.703.343	2.500.000
Zimbabwe	5.597	10.659	13.050	4.321	4.000
Total	10.583.174	10.995.679	10.415.778	11.675.471	10.714.475

Tabla 3. Producción Mundial de Magnesita Cáustica

Fuente: Mineral Industry Surveys, USGS.

3.2. Tendencias en el Sector de los Refractarios

Las tendencias en la industria de los ladrillos refractarios basados en magnesita pueden ser resumidos de la siguiente forma:

- Mejoras en el desempeño refractario y nuevas técnicas en la fabricación del acero han incrementado considerablemente la vida de los revestimientos de los hornos de oxígeno básico. La tendencia continúa, pero a una proporción más lenta que antes.
- La producción de acero en hornos de arco eléctrico continúa en crecimiento, pero los ladrillos basados en magnesita tienen oportunidades limitadas.
- La demanda por ladrillos de magnesita-carbón y otros tipos basados en magnesita para recipientes secundarios en la fabricación de acero está en crecimiento. Japón lidera el desarrollo de técnicas de revestimientos, usando principalmente alúmina – espinela, restringiendo la aplicación de ladrillos basados en magnesita y otros tipos.
- La demanda de ladrillos de MgO – Cr ha caído dramáticamente desde el comienzo de la década de 1990. Sin embargo, volúmenes considerables son todavía usados, particularmente en ciertos sectores de la industria de los metales no ferrosos.
- Los productos de magnesita – espinela han sido beneficiados por el declive de los ladrillos de MgO – Cr.
- La disponibilidad de precios bajos de la magnesita fundida china ha estimulado el reemplazo de magnesita calcinada a muerte de alto grado por granos fundidos en un número de productos. Si el precio sigue, la tendencia continuaría.

- Los fabricantes de refractarios en China han desarrollado grandes avances en la calidad del producto y por consiguiente han realizado más exportaciones en nuevos mercados.
- El desarrollo de nuevos tipos de ladrillos de magnesita basados en MgO – CaO – ZrO_2 , por ejemplo, y mejoras de las formulaciones existentes, tales como, la resistencia a la oxidación, ofrecen oportunidades de crecimiento para los suplidores.

3.3. Situación Venezolana

Para Venezuela los productos derivados de la magnesita (natural, calcinada sinterizada y no sinterizada) son de gran importancia, debido a su utilización en refractarios, cementos magnesianos, cerámicas, productos químicos y otros en menor escala. Los depósitos conteniendo magnesita vetiforme pudieran ser explotados a pequeña escala para cubrir en cierta parte la importación total del mineral por el país, sabiendo que las especificaciones requeridas por las industrias sean satisfechas por las ofrecidas por el depósito luego del debido tratamiento y beneficio de este.

Venezuela es un importador neto de productos derivados de la magnesita en su totalidad, siendo los países de mayor exportación hacia el país Alemania, China, Estados Unidos, Brasil, Italia, Países Bajos y otros en menor proporción. En la figura 7, se observa que China es el principal país de exportación hacia el país, dominando por un 61.62 % de la cantidad total importada, en segundo lugar Estados Unidos con un 15.34 %, Alemania 13.45 % y México con 9.60 %. Mientras los demás países poseen una cantidad no representativa, aproximándose hasta al 0 %, debido a la mínima cantidad que estos exportan en comparación a los otros países. A través de los años de la última década estos países han mantenido de cierta manera su producción constante como exportación para Venezuela, mientras otros fluctúan de tal forma, que en ciertos años no aparecen como países exportadores hacia el país,

debido posiblemente a la competencia con los países dominantes en cuanto a calidad, precios, factores políticos y otros.

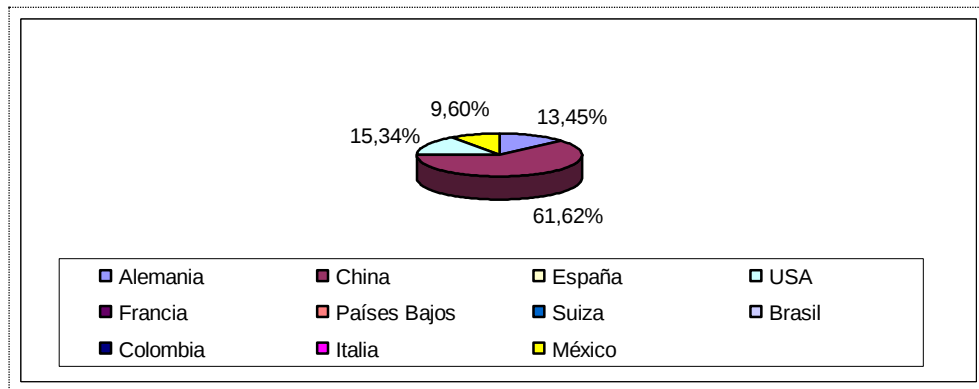


Fig. 7. Países Exportadores hacia Venezuela.

El consumo de productos para refractarios depende en gran medida a la producción de acero perteneciente al país y a las exigencias en los requerimientos de las tecnologías que procesan este. En la figura 8, se destaca la importación total y el valor monetario para la década de 1990.

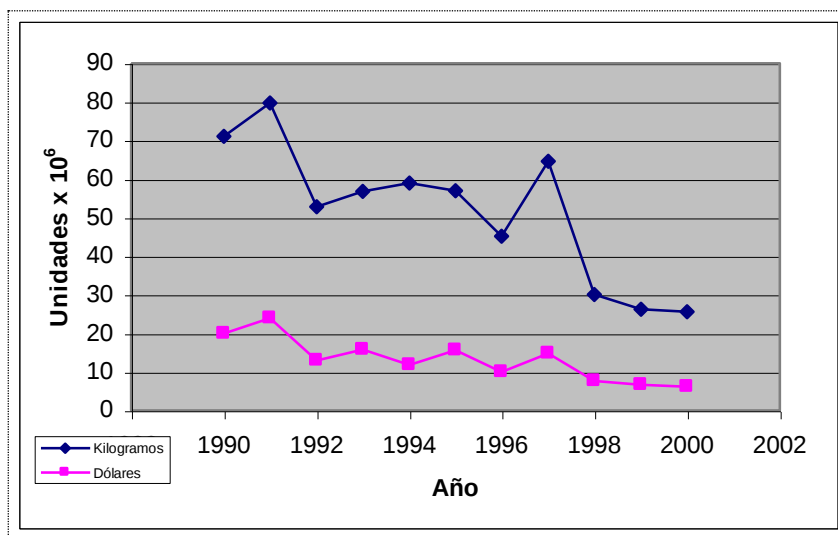


Fig. 8. Importación de Magnesita en todos sus productos.

De la figura 8, se observa en la década de los noventa la inconstante linealidad, destacándose el alto consumo habido a comienzos de ésta, en el año 1991 se incrementa de una manera relativamente importante con un aumento aproximado de 10.000 unidades. A partir de este año existe una baja que se mantiene hasta 1995, luego en 1996 sigue su descenso hasta que aumenta vertiginosamente en 1997 pero posteriormente se agudiza la situación al caer a uno de los niveles más bajos en 1998 manteniendo un cierto declive hasta el 2000. La figura 8 nos muestra la falta de constancia de las importaciones de los productos de magnesita aunque sigue siendo una importante cantidad de unidades necesitadas por las industrias.

En las figuras 9, 10, 11 y 12, se destaca que las mismas se comportan de manera semejante a la de importación total de productos de magnesita, manteniendo en la mayoría de los casos las tendencias de esta, tanto positivas como negativas. Se destacan las importaciones relevantes de magnesita como carbonato de magnesio natural y como óxido de magnesio (no sinterizado), que mantienen las pendientes con respecto a la figura 8, pero en los últimos años (1998 – 2000) se observa un ligero crecimiento.

Los productos más ligados directamente a la industria refractaria muestran también el mismo comportamiento en los primeros y subsiguientes años con respecto a la figura 8, a diferencia que en el periodo 1998 – 2000 existe un declive que se acentúa y agudiza más para la magnesita calcinada a muerte, debido posiblemente a la baja en la producción de acero en el país, además a las sustituciones que se desarrollan continuamente para buscar reemplazos a los ladrillos basados en magnesita.

Por ejemplo, en la actualidad Venezuela produce un enorme volumen de ladrillos refractarios a partir de materia prima nacional, esencialmente del tipo aluminosilicato en plantas de Refractarios Carabobo y Refractarios Venezolanos.

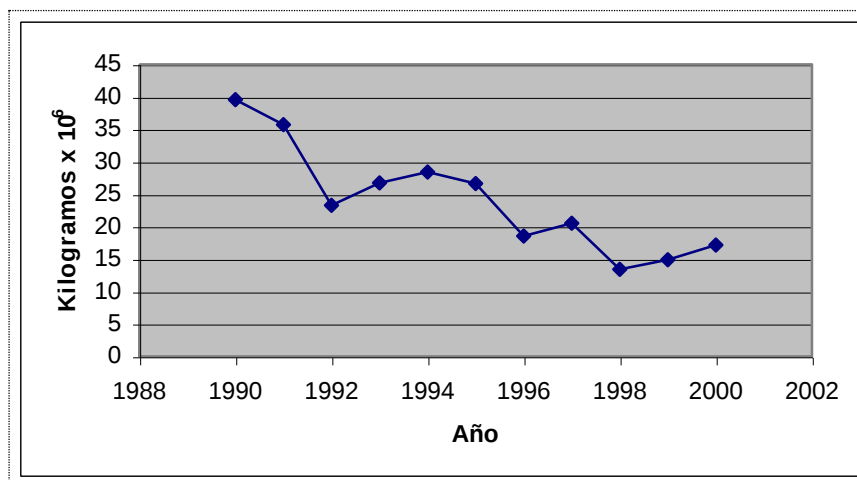


Fig. 9. Importación de Carbonato de Magnesio Natural.

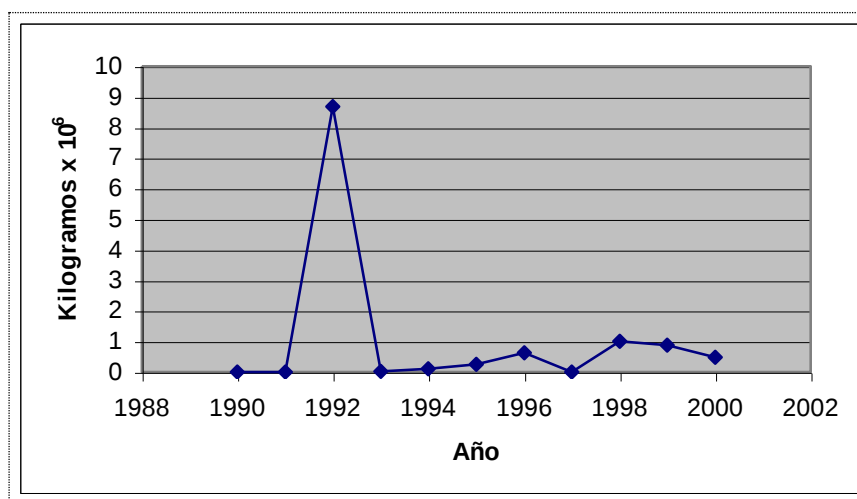


Fig. 10 Importación de Magnesita Electrofundida.

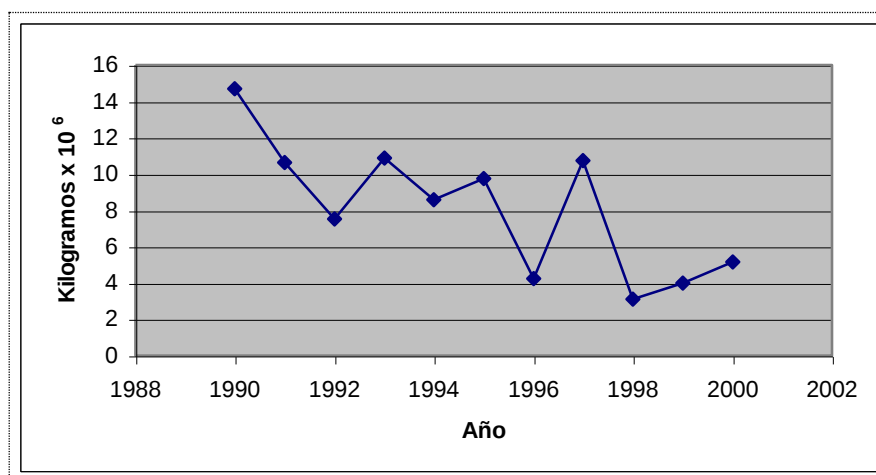


Fig. 11. Importación de Óxido de Magnesio, incluso químicamente puro.

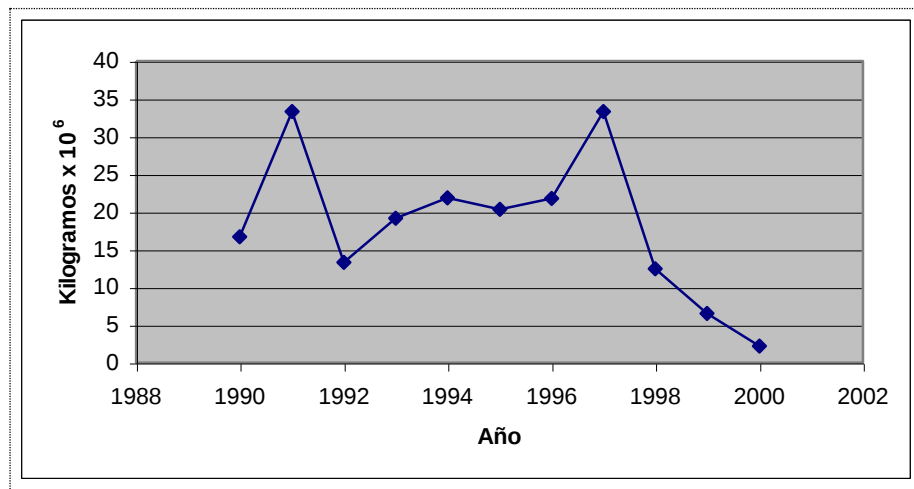


Fig. 12. Importación de Magnesita Calcinada a Muerte.

A continuación se muestra la producción de acero tanto a nivel mundial como en Venezuela (Figuras 13 y 14):

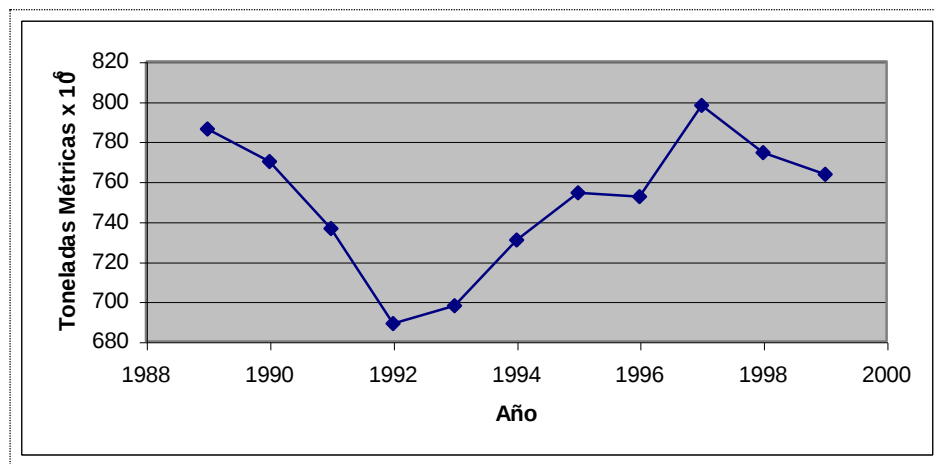


Fig. 13. Producción Mundial de Acero.

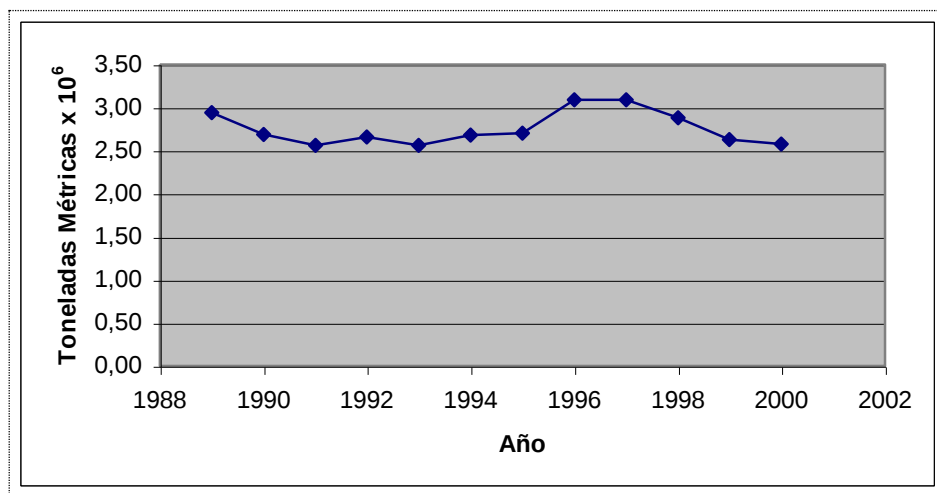


Fig. 14. Producción de Acero en Venezuela.

De las figuras 13 y 14, se observa la constante fluctuación a través de los años de la producción de acero tanto a nivel mundial como en Venezuela. Del período 1998 – 2000 se visualiza un comportamiento negativo, debido al decrecimiento de la producción. Pudiéndose destacar la directa proporcionalidad que suele existir entre la producción del acero y la fabricación de productos refractarios para el revestimiento de los altos hornos y equipos usados en las siderúrgicas. Por lo tanto, se puede indicar que las importaciones de magnesita en Venezuela han mantenido una serie sucesiva de fluctuaciones tanto positivas como negativas, siendo negativas en los últimos años para productos refractarios, mientras como producto de carbonato de magnesio natural y óxido de magnesio no sinterizado ha tenido un cierto aumento. A pesar de todo se sigue importando una significativa cantidad de material en general, lo cual representa una importante salida de divisas del país. Esto se refleja aún más sabiendo que en la última década se ha importado un promedio anual de 51.612.313 Kg a un valor promedio de 300,95\$. Todo lo anterior da una clara idea de la importancia (aún del declive presentado) que tiene para el país la producción de productos magnesianos a partir de magnesita. Con depósitos comerciales de magnesita localizados en Cojedes Norte, sin lugar a duda, que investigar en detalle las posibilidades de producir MgO a partir de esa mena es de importancia para el país.

3.4. Principales Consumidores en Venezuela

A continuación se presentan las principales empresas importadoras de productos derivados de magnesita, destacándose además el producto obtenido:

- Adhesivos y Gomas de Venezuela C.A. (Óxido de magnesio).
- Aga Venezolana C.A. (Magnesita).
- A P Green de Venezuela C.A. (Óxido de magnesio).
- Bayer Químicas Unidas (Magnesita, óxido de magnesio).
- Central Azucarera Portuguesa (Óxido de magnesio).
- Central El Palmar S.A. (Óxido de magnesio).
- Científica Zulia C.A. (Óxido de magnesio).
- Cerámica Carabobo C.A. (Magnesita, magnesita calcinada, magnesita calcinada a muerte).
- Couttenye & Co S.A. (Óxido de magnesio liviano).
- Didacta C.A. (Óxido de magnesio).
- Even Esponjas Venezolanas C.A. (Magnesita, óxido de magnesio).
- Farma S.A. (Óxido de magnesio pesado).
- Fior de Venezuela S.A. (Óxido de magnesio).
- Firestone Venezolana C.A. (Magnesita sintética).
- Frenos Venezolanos (Óxido de magnesio).
- Goodyear de Venezuela C.A. (Óxido de magnesio).
- Henkel Venezolana S.A. (Óxido de magnesio liviano).
- Industrias Wyeth S.A. (Magnesita, óxido de magnesio).
- Laboratorios Elmor S.A. (Óxido de magnesio extraliviano).
- Laboratorio Palenzona C.A.I. (Óxido de magnesio pesado).
- La Emiliana C.A. (Magnesita, óxido de magnesio).
- Manufacteras de Aparatos Domésticos (Óxido de magnesio).
- Manufactera Malectra (Magnesia electrofundida).
- Metro Química S.A. (Óxido de magnesio).

- Oterca Maquinarias C.A. (Óxido de magnesio).
- Pegas Bel Powr C.A. (Magnesita, óxido de magnesio).
- Refractarios Venezolanos S.A. (Magnesita, magnesita calcinada a muerte, óxido de magnesio).
- Regal Industrial Rubber Co C.A. (Óxido de magnesio).
- Resimón C.A. (Óxido de magnesio).
- Suramericana de Refractarios C.A. (Magnesita, óxido de magnesio).
- Suramericana de Revestimientos C.A. (Magnesita, magnesita cáustica calcinada, óxido de magnesio).
- Suelatex C.A. (Óxido de magnesio).
- Suministros Químicos C.A. (Óxido de magnesio).
- Technical Representaciones S.A. (Óxido de magnesio).
- Venezolana Industrial Piel y Artículos Químicos (Óxido de magnesio).

CAPITULO IV

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PREPARACIÓN Y CONCENTRACIÓN DE MINERALES

4.1. Preparación y Concentración de los Minerales

La preparación de minerales es el conjunto de operaciones a que son sometidas las menas y minerales industriales para obtener productos que satisfagan los requisitos del mercado. Generalmente durante el tratamiento se separan y recogen los minerales útiles y se descartan la mayoría de los inútiles o ganga, efectuándose una concentración.

Entre los motivos que obligan a someter las zafras a un tratamiento de preparación pueden implicarse que la mena sea de baja ley, por tener ganga en proporción mayor de la conveniente; que la mena sea compleja, es decir, conteniendo varios minerales útiles; o que el mercado exija determinadas condiciones de tamaño, forma, color o similares.

Por consiguiente, y de acuerdo con los motivos anteriores, debe ser necesario en cada caso eliminar la mayor parte de la ganga para obtener un producto de mayor ley; separar entre sí y concentrar las diversas partes útiles; concentrar la parte útil y eliminar la sustancia perjudicial, con la finalidad de cumplir los requisitos exigidos por el mercado.

La importancia de la preparación y concentración de minerales se debe a que depósitos de ciertos minerales pueden ser yacimientos económicamente explotables, al ser aplicado convenientemente el debido proceso. Cada año la preparación y concentración de minerales adquiere mayor importancia, para satisfacer la creciente demanda de minerales es necesario explotar yacimientos cada vez peores y más pobres.

4.2. Operaciones de Preparación y Concentración

4.2.1. Escogido a Mano

Es un método de concentración en el todouno aplicado a la fracción de una mena de tamaño comprendido entre 4 y 45 cm aproximadamente. El objeto de esta operación es el de separar una fracción enriquecida para la fusión directa con una recuperación del mineral de valor de la mena superior a la que se lograría con un costo equivalente por el tratamiento subsiguiente, o bien desechar los estériles a un costo total inferior que el que representaría un proceso ulterior, o ambas cosas.

Las características estructurales esenciales para un proceso de escogido eficaz son la presentación de modo continuo ante los escogedores de una corriente de carga en movimiento en tales condiciones que los trozos de zafra sean fácilmente visibles y reconocibles, así como los dispositivos necesarios para facilitar el depósito adecuado de las partículas seleccionadas. La carga de alimentación puede resbalar a lo largo de una superficie inclinada o impulsada por una excéntrica, o bien permanecer en una superficie que se encuentra en movimiento.

El escogido se basa fundamentalmente en las propiedades ópticas que determinan el color y el brillo y, por tanto, para que la operación se realice con el máximo rendimiento es preciso que las diferencias de estas características se acentúen todo lo posible. Para lograr esto, el género debería lavarse primero para eliminar las lamas y el polvo que pueda arrastrar consigo; la alimentación en la mesa de escogido debiera tener una profundidad no superior a la de un trozo y el tamaño de estos debe ser lo suficientemente uniforme para que los más grandes no oculten a los más pequeños. Por último, la velocidad del desplazamiento de la carga a lo largo de la zona en que se verifica la separación debe ser lo suficientemente lenta para permitir una breve revisión de los trozos dudosos (Taggart, 1966).

4.2.2. Reducción de Tamaño

La reducción de tamaño, o conminución, es una etapa importante en el procesamiento de la mayoría de los minerales, en cuanto que puede usarse:

- Para producir partículas del tamaño y la forma requeridas.
- Para liberar minerales valiosos de la ganga para que puedan concentrarse.
- Para incrementar el área de superficie disponible para exhibirse a la reacción química.

En la industria minera, la mayor parte de la reducción de tamaño inicial (trituración) se realiza con trituradoras de compresión, empleando molinos de tambor giratorio para la subsecuente reducción a tamaños más finos (molienda).

Los métodos de reducción de tamaño pueden agruparse de varias maneras, pero como la reducción ocurre en etapas, el tamaño de las partículas aporta el método primario de agrupamiento. Si el cuerpo de mineral es de carácter masivo, el minado o extracción es en realidad la primera etapa de reducción de tamaño, y generalmente se realiza con explosivos, aunque pueden usarse medios mecánicos en los minerales más blandos. Tanto la trituración como la molienda pueden subdividirse aún más en etapas primarias, secundaria, terciaria, y a veces hasta cuaternaria (Kelly & Spottiswood, 1990).

Al grado de reducción de tamaño que se logra por medio de cualquier máquina se le describe por la relación de reducción, la cual puede definirse en sentido amplio como el tamaño de la alimentación dividido entre el tamaño del producto.

Las trituradoras primarias son las máquinas que toman el todouno de la mina o cantera y empieza la reducción de tamaños. Deben ser, en instalaciones bien proyectadas, capaces de admitir el bloque máximo que pueda salir en el todouno de la

mina. Las trituradoras que realizan la segunda trituración, se denominan trituradoras secundarias y las que les siguen son trituradoras terciarias o de finos.

Las quebradoras o machacadoras de mandíbulas (Figura 15) ocasionan la fractura por compresión, ya que es éste el método más práctico de aplicar la fuerza de fractura a las partículas grandes. Esto significa a su vez que la máquina debe construirse en tal forma que las aberturas impongan limitaciones al tamaño de la alimentación y del producto: la capacidad depende, por lo tanto, del tamaño de la abertura de descarga y de la velocidad de la máquina. Por otra parte, el tamaño fijo de las aberturas de entrada y salida se traduce en que estas machacadoras tengan una relación de reducción limitada (Taggart, 1966).

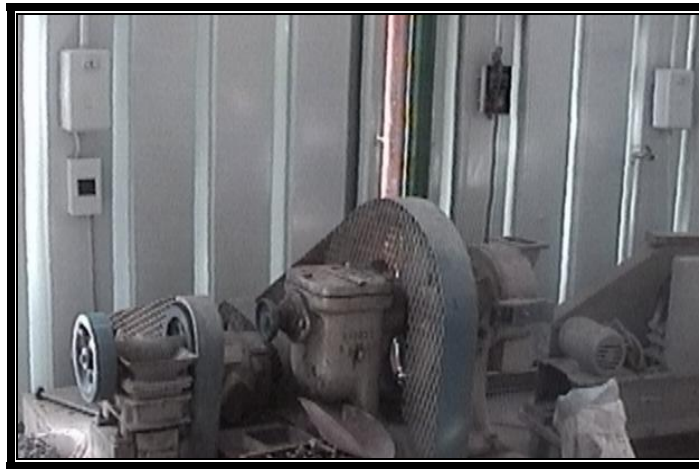


Fig. 15. Machacadora de Mandíbulas.

La machacadora de mandíbulas típica es la de Blake (Figura 16), la zona de trituración, A, es el espacio en forma de cuña que se encuentra entre la mandíbula móvil, C, la fija, B, y dos paredes paralelas fijas, D, todas ellas recubiertas, dado su desgaste, por forros de placa cambiables. El resto de la máquina comprende una concatenación multiplicadora de fuerzas y un bastidor, robusto, pesado y rígido que soporta todos los elementos móviles y las reacciones obligadas de los órganos que aplican las fuerzas de trituración a la roca.

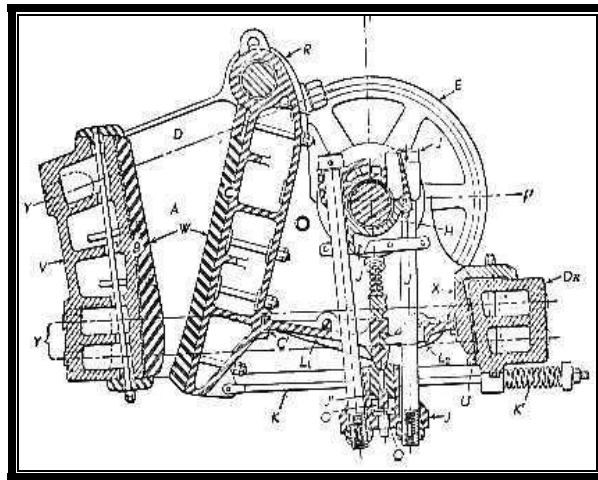


Fig. 16. Machadora de Mandíbulas tipo Blake.

Debido a que la mandíbula móvil tiene una cara de trabajo, la machacadora de mandíbulas sólo actúa la mitad del tiempo sobre la roca, que se encuentra en la zona de trituración. Si no hubiera compensación, la energía consumida fluctuaría de modo correspondiente. Este inconveniente se obvia haciendo que la polea E sea del tipo y peso de un volante y montando otro volante compensador en el otro extremo del eje motor. Como estos volantes almacenan energía, reducen la aceleración durante el retroceso de C, y, al reducir también la desaceleración en el avance, restituyen a la mandíbula la energía antes almacenada.

La distancia horizontal medida en el sentido longitudinal de la máquina a través de la zona A de fragmentación es la abertura de admisión de la machacadora, y el área horizontal de la zona que se encuentra a este nivel se conoce con el nombre de boca. La abertura de descarga se conoce con el nombre de abertura de salida o garganta, y varía desde cuando la mandíbula móvil se encuentra en la posición extrema de avance, que se conoce con el nombre de posición cerrada, a su opuesta, con el de posición abierta. El ajuste de estas distancias, para adaptarlas dentro del intervalo de desgaste corriente de los forros de las mandíbulas, se verifica modificando el espesor de los forros, U; en cambio, las modificaciones grandes exigen cambiar las riostras. La amplitud de movimiento es la distancia recorrida por

la mandíbula móvil en la abertura de salida, y sólo puede modificarse sensiblemente variando el conjunto excéntrica-biela (Taggart, 1966).

En las figura 17 y 18 se presenta un triturador típico de rodillos, usado como *trituradora secundaria*, cuyos elementos fundamentales de trabajo son los dos rodillos A. Al girar en sentidos opuestos al encuentro por arriba, estos cilindros forman una cámara de trituración en V, a la que son arrastrados los trozos por fricción contra las caras de los rodillos hasta que se rompen por la compresión ejercida por estos. Los rodillos van montados en los ejes, B y C, soportados por un bastidor muy resistente, D. El eje B gira en los cojinetes fijos, E, y el otro en los cojinetes de tipo deslizante, F, retenidos a través de varillas tensoras, N, por los resortes resistentes, G. El juego entre rodillos se fija mediante las piezas intercalares, H, que se sitúan entre cojinetes fijos y los movibles. Ambos rodillos son impulsados por poleas con volantes pesados, I y J. Pero, en los modelos más pequeños, la polea I, correspondiente al rodillos fijo, es lo bastante grande para transmitir las energía necesaria para el funcionamiento, en cuyo caso, el C se impulsa por una polea más pequeña, meramente calculada para tenerlo a una velocidad igual a la del otro rodillo.

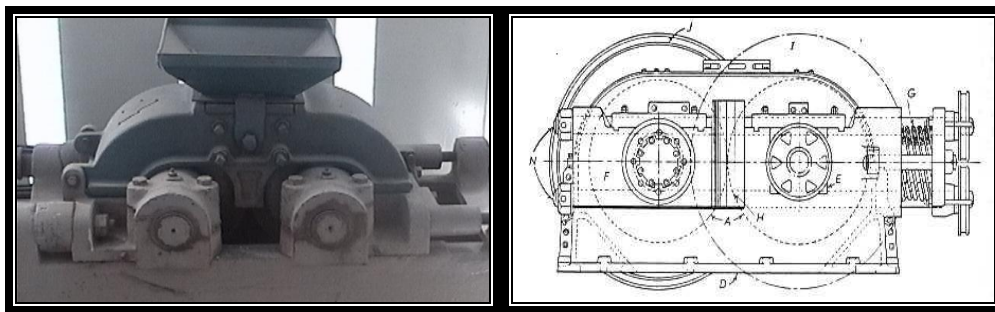


Fig. 17 y 18. Trituradora de Rodillos.

Ambos se mueven desde el mismo eje de transmisión, y la correa que va a la polea más pequeña está cruzada. Los rodillos grandes y pesados están provistos de poleas motrices en ambos ejes, cada uno de los cuales está mandado por su motor, porque, cuando la máquina trabaja a plena carga, ambos motores tienen que estar

funcionando a la vez. El desgaste provocado por la trituración recae sobre las bandas circulares (camisas), K, de acero al cromo o al manganeso o de algún material similar, que están firmemente sujetas a los núcleos de fundición de hierro o de acero, L, que a su vez, están calzados a los ejes de los rodillos. Generalmente el interior de estas bandas tiene la forma de un doble cono que se ajusta con L, antes de colocar el anillo L' en su sitio. Después, se monta éste y se aprieta todo lo posible con una serie de pernos, M, y a continuación, K se calienta uniformemente para lograr la expansión deseada, y L' queda firmemente sujeto en su sitio (Taggart, 1966).

La solución moderna al problema de aplicar una pequeña fuerza de fractura a un gran número de partículas, lográndose el efecto mediante el uso de medios de molienda para que se produzca predominantemente fractura por estallido, es el molino rotatorio. Este consiste esencialmente en un tambor cilíndrico o cónico montado sobre un eje horizontal de giro y cargado 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.

Cuando éste empieza a girar, estos cuerpos duros y pequeños ascienden por el lado que sube del tambor hasta que la masa adquiere una posición de equilibrio dinámico (Figura 19), en la que los cuerpos que están en contacto con la pared del tambor, o en las capas próximas a ésta, se mueven en la dirección de dicho tambor, mientras que los que se encuentran en las capas más alejadas de la pared lo hacen en sentido opuesto. El resultado es el movimiento general rotatorio de la masa alrededor de un núcleo horizontal más o menos estacionario, que se indica por el óvalo determinado por la línea de trazos. Cuando, en el funcionamiento normal de un molino, los cuerpos que descienden ruedan sencillamente por encima de la masa ascendente, el régimen de marcha se llama de caída en cascada; mientras que, cuando se registra una caída libre apreciable, el fenómeno se designa como caída en catarata.

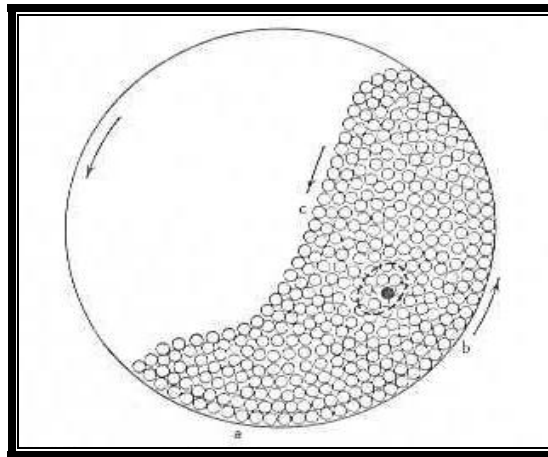


Fig. 19. Diagrama de la sección transversal de un Molino Rotatorio.

Generalmente, la operación se realiza casi siempre en húmedo, y para cerrar el circuito de acabado se intercala un clasificador mecánico o, menos frecuentemente, una criba que suele ir en los primeros circuitos. Se distinguen por razones obvias, los molinos de barras y los de bolas (Figura 20 y 21). Los molinos tubulares son aquellos en los que el tambor tiene una longitud de por lo menos el doble de la del diámetro, para obtener una molienda fina; los molinos que se cargan con cuerpos moledores no metálicos se llaman molinos de guijarros.

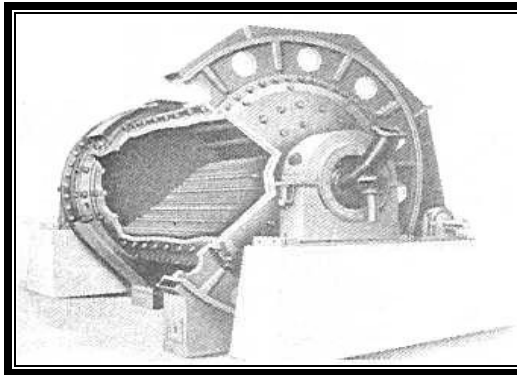


Fig. 20. Molino de Barras.

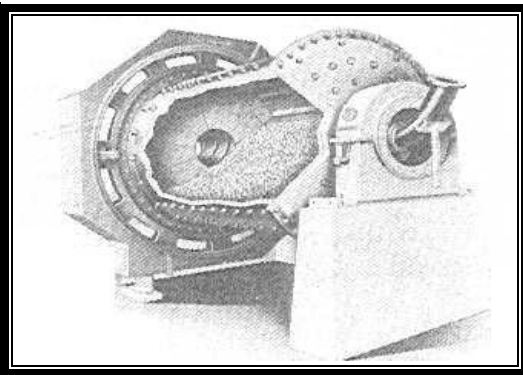


Fig. 21. Molino de Bolas.

La molienda ejerce un efecto decisivo sobre todos los tipos de concentración fina. En la flotación, el circuito hace, además, las veces de depósitos acondicionadores de agitación y aireación para las pulpas espesas y diluidas con un

factor de tiempo diferencial entre los minerales pesados y ligeros y los duros y blandos. El molino añade más de medio kilo de agente reductor fuerte (en forma de hierro metálico) por tonelada de material, así como también oxígeno y anhídrido carbónico en cantidades desconocidas, y cantidades también desconocidas de diversos iones que resultan de la reacción de los compuestos mencionados y de otros reactivos añadidos conocidos, con las superficies nacientes formadas durante la molienda.

Las bolas o barras constituyen el elemento esencial de estos molinos, y todos los demás detalles del circuito, tanto estructurales como operativos, sólo tienen importancia en cuanto al grado en que influyen sobre el movimiento de aquellas y/o sobre los efectos de dicho movimiento sobre las partículas de mena. Las barras son invariablemente de acero de elevado contenido en carbono, lo suficientemente duras y frágiles para romperse cuando se desgastan sin deformarse ni doblarse, lo que motivaría un trabamiento de la carga. Las bolas son de acero aleado forjado, de fundición de acero o hierro.

Como las barras son mucho más pesadas que las bolas, se recurre a los molinos de barras cuando el factor importante en la rotura de las partículas es el impacto (para los géneros más gruesos), y dichos molinos giran con tanta mayor rapidez cuanto mayor grado de acción de cizallamiento y de caída libre se requiere para desmenuzar las partículas grandes y tenaces. Sin embargo, el material intersticial grueso que se encuentra en el extremo de alimentación conserva a las barras algo separadas entre sí, manteniéndolas abiertas en toda su longitud e imposibilitando una molienda fina. Además, una carga de barras de peso dado tiene mucha menos superficie que otra de bolas del mismo peso, por cuya razón aquellas son menos eficaces que estas para moler finos. Como consecuencia de todo esto, el molino de barras es, sobre todo, una trituradora de finos donde se obtiene un producto granular ideal para alimentar con un solo paso a un molino de bolas (Taggart, 1966).

Cuando el procesamiento subsecuente ha de ser realizado en medio húmedo (por ejemplo, contracción por flotación o por gravedad), la molienda en medio húmedo es la elección lógica, y como consecuencia, la mayoría de los minerales se muelen en medio húmedo (Kelly & Spottiswood, 1990).

4.2.3. Cribado y Tamizado

El cribado y el tamizado son separaciones mecánicas de partículas basadas en el tamaño. Estas separaciones se logran utilizando una superficie perforada uniformemente que actúa como un calibrador múltiple de pasa – no – pasa. Idealmente, las partículas que son más grandes que las aberturas quedan retenidas sobre la superficie, mientras que las partículas más pequeñas (en dos dimensiones por lo menos) pasan por la tela. El material retenido sobre la superficie es el material de sobretamaño o sobremedida; el que pasa por la tela es el material de subtamaño o infratamaño; y el material que pasa por una superficie pero que es retenido por una superficie subsecuente, es el material intermedio.

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.

Ensayos de tamizado a nivel de laboratorio

Muchas especificaciones de producto pueden indicar tamaños definidos del material en términos de un porcentaje dado que pase (o que sea mayor que) un cierto tamaño de abertura, y la verificación de esa indicación deberá hacerse por medio de tamices estándar. Un tamiz de laboratorio consiste de una superficie de tamizado, que es normalmente de alambre tejido, que forma aberturas cuadradas.

La 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. 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. De este proceso se determina el análisis granulométrico que da una serie de pesos que corresponden a los tamices empleados en el análisis. Para comparar estos pesos se expresan en porcentajes. Esta distribución por tamaños en la fase final de un proceso de reducción de tamaño es de considerable importancia.

Sacudidores de tamices

Existen varias máquinas para sacudir los conjuntos de tamices, que además de eliminar gran parte del tedio del tamizado, dan resultados más consistentes (Figura 22). En general, estas máquinas transmiten 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 el “cegamiento” u obstrucción de las aberturas por partículas ligeramente más grandes que éstas. Aún así, generalmente, ocurre el cegamiento, y para obtener resultados exactos, la cantidad de material que queda retenido en cualquiera de los tamices al final de una prueba no debe tener un espesor mayor de una a dos partículas.



Fig. 22. Sacudidor de Tamices (Ro – Tap).

Tamizado manual

Cuando no se dispone de un sacudidor de tamices, tienen que recurrirse al tamizado manual. Si bien el proceso es muy laborioso, debe aplicarse un procedimiento regular como el recomendado por la American Society for Testing and Materials (ASTM) si se pretende obtener resultados representativos.

Tamizado en húmedo y en seco

Un problema común en el tamizado es la adherencia de las partículas muy finas a las partículas más grandes o entre ellas mismas, que ocurre como resultado de la atracción electrostática o de la tensión superficial que se origina por la presencia de pequeñas cantidades de humedad. La mejor solución para este problema consiste en hacer un tamizado inicial en húmedo de una muestra llevada a la condición de pulpa en la tela más fina que ha de usarse, utilizando el agua adicional que sea necesaria. Tanto las fracciones de sobretamaño como las de subtamaño se recuperan y secan, y la primera se tamiza luego en la forma normal.

Cribado

Comúnmente se utilizan cribas para la separación por tamaños en conjunto con las operaciones de trituración. El equipo de cribado puede clasificarse en general como estacionario o dinámico, dependiendo de que superficie de cribado sea fija o móvil. Ambas cribas, la estacionaria y la dinámica, pueden subdividirse también en cribas convencionales o de probabilidad, dependiendo de que el paso de las partículas sea determinado por principios de restricción o estadísticos. Las cribas dinámicas pueden a su vez caracterizarse aún más de acuerdo con el movimiento más significativo que se imparte a la superficie de cribado (Kelly & Spottiswood, 1990).

La capacidad para una superficie de clasificación dada es tanto mayor cuanto más grande es la relación de la anchura a la longitud de la superficie de cribado. La eficacia de cribado se mide de dos formas generales: en una de ellas se determina de acuerdo con la calidad del rechazo, basándose en la proporción de éste que atraviesa una criba de ensayo de la misma abertura que la de la criba de trabajo cuando dicha criba de ensayo, cargada con material seco, se la manipula según las normas fijadas. Partiendo de esta base, si retiene el 95 % indica un cribado comercial sumamente eficaz tratándose de cualquier género, a excepción de los sumamente finos; el 85 % es un rendimiento normal tratándose de una criba a plena carga que tamiza un producto cuya proporción de paso es del 50 al 75 %. Por último, las cribas sobrecargadas o aquellas otras con alimentación de finos que contienen humedad en proporciones que produzca aglomeración pueden acusar retenciones del 50 al 60 % en la criba de ensayo (Taggart, 1966).

Las cribas comerciales se clasifican, de acuerdo con el método de efectuar el movimiento relativo entre el lecho de alimentación y la superficie clasificadora en: cribas fijas (rejilla fija), cribas giratorias, cribas de sacudimientos y cribas vibratorias. Las cribas vibratorias son las que más se emplean actualmente, y se han diseñado en una gran variedad.

El rendimiento es tanto menor cuanto más fina es la malla, ya que ello tiende a disminuir los efectos de la fuerza de gravedad. Con respecto a la capacidad, el consumo de energía es inferior al que exigen los otros dos tipos de cribas, y prácticamente despreciable para las acciones por energía eléctrica o por leva. La vigilancia que exigen las cribas vibratorias es prácticamente nula, a no ser que se presente una aglomeración de las partículas por efecto de la humedad. El costo más importante está determinado por la renovación de los tamices gastados (Taggart, 1966).

4.2.4. Flotación

La flotación es un proceso de concentración de minerales que aprovecha la diferente aptitud, natural o adquirida, que tienen los componentes de una mena para adherirse a burbujas de aire. Se sirve, por consiguiente, de las diferencias que en sus propiedades físico-químicas superficiales presentan los citados componentes.

La mayoría de los minerales se mojan con facilidad cuando su superficie está limpia, prefiriendo el agua al aire, pero esta preferencia se puede invertir en el mineral que interesa si se cubre su superficie con un producto repelente al agua, como pudiera ser la grasa, aceite, parafina u otros hidrocarburos semejantes. Para conseguir este resultado en la concentración de menas es preciso utilizar reactivos químicos específicos y controlar las condiciones de la pulpa en la que se efectúa el proceso, por lo que éste se fundamenta en una compleja combinación de las leyes y principio de la química de superficies, la química coloidal, la cristalografía y la física (Peláez, 1980).

A grandes rasgos, para efectuar la separación, se muele la mena en agua a menos de la malla 48 y el producto se diluye hasta que el porcentaje de sólidos en la pulpa esté comprendido entre 25 % y 45 %. La adición a esta pulpa de ciertos reactivos en determinadas dosis permite mantenerla de ordinario en condiciones apropiadas para que de los minerales presentes, solamente uno, el que interesa,

absorba un reactivo que lo recubra parcialmente con una película aerófila unimolecular, sin que dicho reactivo sea absorbido por los demás componentes de la mena. De esta forma, al hacer burbujear aire a través de la pulpa, las partículas recubiertas serán atraídas hacia la interfase aire-agua de las burbujas y éstas las transportarán a la superficie, quedando el resto de los minerales en la pulpa. Para que las burbujas formen en la superficie una espuma estable es necesario añadir a la pulpa un reactivo con ese fin.

En el proceso de flotación lo corriente es que el mineral útil que se quiere extraer se recoja en la espuma, mientras los demás permanecen en la pulpa, denominándose este caso flotación directa. En caso contrario, es decir, que se flote la ganga, el proceso suele llamarse flotación inversa. La flotación es en la actualidad uno de los métodos más importantes de concentración, ya que permite explotar yacimientos pobres y complejos.

En cualquier proceso de concentración es necesario aprovechar las diferencias existentes entre las partículas de útil y de ganga, aumentándolas con un tratamiento adecuado si dichas diferencias no fueran suficientes para la separación o incluso creándolas si no existieran. Así, en flotación, la diferencia entre las energías superficiales que posean las partículas servirá para separar entre sí los componentes de la mena, por lo que es necesario considerar las tres fases presentes, sólida, líquida y gaseosa, y las correspondientes interfases, ya que a través de ellas se han de producir las reacciones que modificarán el comportamiento de las partículas.

Las tres fases citadas están representadas en flotación, respectivamente, por la mena, el agua de la pulpa y el aire necesario para formar las burbujas; la primera es muy variable de un caso a otro, mientras que las dos últimas son prácticamente invariables. Además de estos componentes, que son los fundamentales, existen en la pulpa, por una parte, reactivos que se añaden con el fin de producir cambios

favorables en el proceso y, por otra, sustancias perjudiciales que lo dificultan y que pueden proceder de la mena, del agua, o haberse originado en el propio tratamiento.

Función de la Doble Capa Eléctrica

La presencia en la superficie de las partículas que poseen cargas eléctricas se debe por una parte a las operaciones de fragmentación y por otra a la diferente energía con que reaccionan las moléculas de agua, una vez que el mineral está en la pulpa, con los distintos iones de la superficie mineral. Algunos de estos iones se disuelven con más rapidez que otros y debido a ello pasan a la solución en mayor cantidad. Como consecuencia, la superficie mineral adquiere una carga eléctrica de signo contrario a la de los iones que se disolvieron en mayor número, y que, para facilidad de la explicación, supondremos que fueron los cationes. La superficie mineral va quedando cargada negativamente y a medida que aumenta esta carga eléctrica va siendo más difícil para los iones de signo contrario el pasar a la solución y se frena con ello la disolución de los que aún pertenecen a la red cristalina.

Como consecuencia se llega finalmente a un equilibrio entre la superficie del sólido y la solución, quedando rodeado el mineral de una doble capa eléctrica. La doble capa desempeña un papel importante en flotación, pues influye en la adsorción de los reactivos sobre la superficie de los minerales y en que el sólido se moje o no. (Peláez, 1980).

Fenómenos de adsorción en la interfase sólido – líquido

Para poder efectuar la flotación de las partículas que interesan es preciso que se fijen en ellas los iones que con ese fin se han añadido a la fase líquida. Para ello es necesario que exista en la superficie de las partículas una fuerza de atracción suficiente para vencer la inercia del sistema y los iones sean absorbidos sobre aquella.

La adsorción es inversamente proporcional a la solubilidad y depende de la valencia del ión, su propensión a la hidratación y la solubilidad del compuesto que se forme al ser absorbido por el sólido. La adsorción se produce por una acción recíproca entre fuerzas eléctricas del reactivo absorbido y la partícula que lo absorbe. Puede ser de naturaleza física o química. Ambas tienen características comunes, como por ejemplo, el ser espontáneas y que se reduce la energía libre. La diferencia principal entre ambas es que en la adsorción química la sustancia absorbida se integra a la red cristalina y constituye una unidad con ella, mientras que en la adsorción física el sólido y la sustancia absorbida constituyen dos sistemas distintos.

Por eso, en este caso donde la unión con la red cristalina se debe a fuerzas de atracción intermoleculares (la fuerza de unión es relativamente débil), mientras que en la adsorción química, donde hay una incorporación o paso de electrones de una sustancia a otra, la fuerza de unión es considerable. Debido a ello, en el caso de adsorción física, una disminución en la concentración del reactivo provoca su retorno a la solución, incluso hasta dejar libre de él a la superficie de la partícula, mientras que si se trata de adsorción química la capa absorbida no puede eliminarse de esa forma.

La adsorción física es menos selectiva, se produce con rapidez y en ella el reactivo se distribuye más uniformemente. En cambio, la adsorción química muestra gran selectividad, el tiempo para que se produzca varía entre amplios límites y comienza por los puntos donde la superficie del sólido es más activa, por lo que se distribuye sobre este de forma menos uniforme.

Reactivos de Flotación

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 absorba y proporcione la superficie hidrofóbica requerida.

La regulación de la química de la solución puede abarcar la adición de reactivos; ya sea activadores, que aumentan la selectividad intensificando la adsorción del colector, o deprimentes, 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, o el uso de carbón activado para remover de la solución los iones o moléculas indeseables. Finalmente, la regulación de la química de la solución puede incluir el control de pH para asegurar que habrá de existir el colector 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 (Kelly & Spottiswood, 1990). Atendiendo a su función, los reactivos utilizados en flotación pueden clasificarse en dos grupos:

- Principales: espumantes y colectores.
- Auxiliares: deprimentes, activantes, reguladores de pH, modificadores.

El primer grupo está formado por los reactivos de los que no se puede prescindir, pues el espumante se necesita para obtener la espuma, modificando el medio, y aunque algunos minerales poseen gran flotabilidad natural sin necesidad de utilizar colector, son sin embargo tan pocos y su importancia en flotación tan relativa y limitada, que puede considerarse también a los colectores como imprescindibles.

El segundo grupo lo constituyen los reactivos que se utilizan como modificadores o reguladores de las delicadas reacciones que intervienen en el proceso, como por ejemplo los que sirven para aumentar la selectividad de los colectores, preparando las superficies de los minerales para que, según su composición, los absorban o no.

Otra manera de clasificar los reactivos es de acuerdo a su ión activo, en neutros, catiónicos y aniónicos, pues aunque casi todos son electrolitos, es decir, sustancias polares, hay algunos que no se ionizan. Si se procediese así, los reactivos reguladores del pH, por ejemplo, se incluirían en un grupo u otro según la importancia que tuviera en la flotación el H^+ o el OH^- .

Colector: el colector es el más decisivo de los reactivos de flotación. Los colectores son moléculas o iones orgánicos que se adsorben selectivamente sobre las superficies minerales. Tienen que convertir en hidrofóbica la superficie del mineral para que, en equilibrio haya adherencia entre burbuja y partícula, y además deben reducir el tiempo de inducción, para asegurarse de que ocurra adherencia en la colisión entre burbuja y partícula.

La mayoría de los colectores son ácidos débiles, bases o sus sales. Son heteropolares y puede considerarse que tienen dos extremos funcionales, uno iónico, que puede ser adsorbido en la superficie mineral ya sea por reacción química con los iones de la superficie mineral (quimiadsorción) o por atracción electrostática a la superficie mineral (adsorción física), y el otro una cadena o grupo orgánico, que proporciona la superficie hidrofóbica al mineral. Algunos colectores, empero, son compuestos no ionizantes; una vez adsorbidos, vuelven al mineral hidrofóbico en la misma forma que los colectores heteropolares. Algunos colectores usados para varios minerales son, xantatos, ditiosfosfatos, tiocarbanilida, dixantógenos, ácido oleico, oleato sódico, aminas y sus sales, siendo estos sólo una minoría de la variedad que se comercializa. Uno de los colectores más usados para beneficio de varias menas, tales como, anhidrita, barita, casiterita, celestita, fluorita, rutilo, magnesita y otros es el Tetrasodio N – (1,2 – dicarboxietil) – N – octadecil sulfosuccinamate; o denominado simplemente Aero – 845 del tipo aniónico, fabricado por una empresa especializada en estos productos.

Para mejor control y recuperación, el uso de este colector con Fuel Oil beneficia en mayor proporción ciertos minerales, para otros, se mezcla con sulfonatos de petróleo y pocas veces con ácidos grasos. Funciona en minerales no metálicos en pulpas sin deslamar sin requerir alto acondicionamiento de sólidos para un efecto óptimo, tal como es aplicado por otros colectores. Entre sus características destacan: la solubilidad en agua pudiendo ser diluido a conveniencia para la alimentación a la flotación, densidad de 1.12 g/cm^3 y pH de 7 a 8.

Espumantes: son reactivos orgánicos solubles en agua que se adsorben en la interfase aire-agua. Son moléculas heteropares, con un grupo polar que da la solubilidad en agua, y un grupo hidrocarbonado no polar.

El espumante es necesario para formar una espuma arriba de la pulpa, que sea lo suficientemente estable para evitar la desintegración de la misma y el retorno subsecuente de las partículas a la pulpa antes de que aquella sea removida. Es importante, empero, que la espuma se desintegre rápidamente una vez que se remueve, ya que de no ser así, se tienen problemas en el bombeo de la pulpa y en los subsecuentes pasos de procesamiento.

Otro requisito importante de un espumante es que no se adsorba sobre las partículas minerales: si un espumante actuara como colector, se reduciría la selectividad del colector en uso. Algunos colectores, como los ácidos grasos, exhiben ciertamente propiedades espumantes. Sin embargo, para lograr un buen control de la planta, debe minimizarse la interacción del agente espumante con el colector. Los principales espumantes son, el aceite de pino, ácido cresílico, algunos alcoholes de peso molecular alto y los sintéticos, tales como, metil isobutilcarbinol y los éteres del polipropileno glicol (Kelly & Spottiswood, 1990).

Reguladores: bajo este nombre se agrupan los reactivos que se añaden a la pulpa con objeto de crear en ella las condiciones apropiadas para que se modifiquen

las propiedades superficiales de los minerales, de tal forma que solamente los deseables pasen a la espuma.

Su forma de actuar es muy variada; en unos casos influyen sobre la disociación y concentración iónica de las pulpas, en otras lo hacen directamente sobre la adsorción o desadsorción de los reactivos, en ocasiones reaccionan químicamente con el mineral; pero siempre su función específica es crear en la pulpa las condiciones apropiadas y preparar las superficies de las partículas de la mena para que, según su naturaleza, adsorban un determinado reactivo y pueda efectuarse satisfactoriamente la flotación. Según el papel que desempeñen, se pueden clasificar los reactivos reguladores en: modificadores del pH, reforzadores, deprimentes, activantes y dispersores.

Modificadores del pH: la regulación del pH es fundamental en flotación, pues la mayoría de los minerales flotan bien dentro de un determinado intervalo de pH y fuera de él es imposible conseguir su adherencia a las burbujas. Al valor del pH por encima del cual el mineral ya no flota se llama “pH crítico” varía con la temperatura de la pulpa, la dosis y la naturaleza del reactivo.

La alcalinidad se aumenta con cal, carbonato sódico y ocasionalmente, con hidróxido sódico o amoníaco, mientras que para acidificar se usan los ácidos sulfúrico o sulfuroso. Aunque estos reactivos tienen como propósito fundamental mantener una determinada relación entre los iones de la pulpa, pueden sin embargo algunos de ellos producir también otros efectos, a veces no deseables.

Reforzadores: se emplean para acentuar la aptitud para flotar de minerales que no se han sometido a la acción de los deprimentes, pues en ese caso se llamarían activantes. Por ello un mismo reactivo puede ser utilizado como activante o reforzador, pero el calificativo indica el fin con que se emplea. Los reforzadores más empleados en la industria son el sulfato de cobre y el sulfuro sódico.

Deprimientes: son los reactivos que se emplean para anular por más o menos tiempo la flotabilidad natural de un mineral, por lo general, hay que destruir su acción posteriormente para poder recuperar el mineral que fue necesario deprimir. Esta anulación de la acción deprimente se consigue añadiendo a la pulpa otro reactivo, llamado activante. Los deprimentes tienen que impedir la flotación de los minerales que no se quieren por el momento.

Casi todos son iónicos y por lo general su ión activo es del mismo signo que el del colector. En algunos casos su acción está limitada a las zonas no ocupadas por el colector, pero otras veces se extiende a éstas. Los deprimentes más importantes son los cianuros de sodio o potasio, sulfato de zinc, ferrocianuros, ferricianuros, sulfuros sódicos, bicromatos alcalinos y otros más; para deprimir los silicatos es usado comúnmente el silicato de sodio, para la calcita y la dolomita es aplicado ácido tánico y almidón para el talco en ciertas proporciones y condiciones.

Activantes: el objeto de los reactivos activantes es modificar la superficie de los minerales deprimidos. En la mayoría de los casos se trata de que el colector pueda fijarse sobre la partícula y por ello, para flotar un mineral que ha sido deprimido, hay que someterlo sucesivamente a la acción de un activante y de un colector. Los principales activantes que se utilizan son el sulfato de cobre y los ácidos minerales.

Dispersores: son los reactivos que se emplean para dejar limpia de lamas la superficie de las partículas del mineral útil. Entre los dispersores más utilizados está el silicato sódico y el carbonato sódico comercial.

Lo corriente es añadir los dispersores a la pulpa antes de los colectores, pero después de haber eliminado o hecho inocuos a los “venenos” de flotación presentes en aquella, es decir, a los compuestos e iones que la dificulten (Peláez, 1980).

Equipo de Flotación

La concentración por flotación puede considerarse en términos de dos grupos de variables. Primero, las condiciones químicas: la interacción de los reactivos químicos con las partículas minerales para dar lugar a un producto selectivamente hidrofóbico. Segundo, las condiciones físico – mecánicas, las cuales las determinan las características de la máquina 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. Para lograr esta función, una máquina de flotación debe:

1. Mantener todas las partículas en suspensión. Esto requiere que las velocidades ascendentes de la pulpa sobrepasen a la velocidad de asentamiento de todas las partículas presentes (incluso las más grandes y las más pesadas).
2. Asegurar que todas las partículas que entren en la máquina tengan la oportunidad de ser flotadas. Debe minimizarse el desvío de corrientes y la formación de corto circuitos en el interior de la máquina. De modo semejante, es indeseable el espacio muerto porque reduce el volumen efectivo de la máquina.
3. Dispersar burbujas finas de aire en el seno de la pulpa. El grado de aereación necesario depende del sistema mineral en particular y de la fracción de masa que ha de flotarse.

4. Promover el contacto partícula – burbuja de manera que las partículas hidrofóbicas puedan adherirse a las burbujas y elevarse a la espuma. Esto puede hacerse mediante agitación vigorosa, flujo a contracorriente o precipitación de aire (gas) en disolución.
5. Proporcionar una región de pulpa en quietud inmediatamente debajo de la espuma para minimizar el arrastre de pulpa hacia la espuma y la disolución turbulenta de la capa de espuma.
6. Proporcionar suficiente espesor de espuma para permitir que ocurra el drenaje de las partículas arrastradas.

La selección de un tipo particular de máquina de flotación para una aplicación dada no es, por supuesto, una tarea fácil. Los factores principales a considerar al calificar el rendimiento de la máquina son:

1. Rendimiento metalúrgico, representado por la ley y la recuperación.
2. Capacidad, en toneladas métricas por hora de alimentación y por unidad de volumen.
3. Costos de operación por tonelada de alimentación, incluyendo la energía consumida, el mantenimiento y la mano de obra directa.
4. Facilidad de operación (la cual puede bien ser subjetiva, basada en la experiencia anterior).

Máquinas de flotación para laboratorio

En el diseño inicial de un proceso se requieren pruebas de flotación en laboratorio, 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 aislada, como la utilizada en esta investigación. Estas aceptan entre 500 y 2000 gramos de mineral. Para fines de investigación de carácter más básico se han diseñado diversas celdas de flotación muy pequeñas. La máquina utilizada en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento de Minas, posee un rotor que gira dentro de una carcasa, el aire es admitido por un tubo vertical en torno al guía de rotor y es introducido a través de este (Figura 23).



Fig. 23. Máquina de Flotación.

4.3. Operaciones Accesorias de Beneficio

4.3.1. Calcinación

La calcinación se limita, principalmente, a eliminar el agua combinada químicamente en las menas de óxido y carbonato, así como también en las arcillas, y a la combustión de piedra caliza, dolomita y magnesita. Las reacciones ocurridas en esta etapa del procesamiento mineral son de tipo endotérmico, exigiendo la aportación de gran cantidad de calorías. La calcinación difiere del secado en que las temperaturas empleadas son más altas.

Los carbonatos han de calentarse a una cierta temperatura antes de que empiece la calcinación. Exceptuando el caso en el que se emplean hornos de cuba para la calcinación de los carbonatos, los dispositivos y modos de tratamientos son muy parecidos a los utilizados en el secado. La mayor parte de las sustancias hidratadas con las que se encuentran la metalurgia, ceden al agua por debajo de los 300° C, pero los carbonatos exigen el empleo de una temperatura de 600° C a 800° C, y los sulfatos y sustancias arcillosas, temperaturas entre 600° C y 1000° C. En el caso de los carbonatos, hay que adoptar las precauciones necesarias para separar el anhídrido carbónico con objeto de desplazar el equilibrio químico, evitando que la reacción se verifique en sentido inverso.

Cuando los carbonatos son calentados suficientemente se descomponen, desprendiendo CO_2 y dejando los óxidos correspondientes. La temperatura de disociación depende del carbonato, el cual determina la presión de disociación y la presión parcial de disociación de CO_2 en la atmósfera circundante. La presión de disociación del CaCO_3 viene a ser 760 mm a 900° C (la disociación ocurre a esta temperatura en una atmósfera de CO_2). La temperatura correspondiente para el MgCO_3 es aproximadamente de 760° C. La temperatura para la dolomita depende de los porcentajes relativos presentes de los dos carbonatos, la mezcla tiende a actuar

como una sal doble, dando las temperaturas de descomposición inciertas entre estos para los carbonatos puros. Sin embargo, si la presión parcial de CO_2 en los alrededores es menos de 760 mm como invariablemente es el caso en un horno en operación donde un contenido de 40 % de CO_2 en la llama es alta, la temperatura de disociación inicial es menor.

Temperatura de calcinación: la inferencia natural de la curva de relación que opera en las temperaturas de los hornos debe ser tan alta como los revestimientos lo permitan, debe sin embargo, ser modificadas porque temperaturas excesivas producen cal que se hidrata lenta e incompletamente, en el caso de la caliza, y magnesita de la magnesita. Tales productos se denominan sobrecalcinados. Estos son más densos que los normales, la densidad más alta corresponde a empaquetamientos más cercanos de los átomos incidentes sobre las unidades de cristal más grandes. Estos contienen partículas cubiertas y hasta cierto punto impregnado por cristales y/o conchas cristalinas compactas, capas y gránulos que cierran los poros de la cal o magnesita dificultando o previniendo el acceso de agua en la hidratación. Estas capas se forman debido al hecho que en las rocas en la naturaleza contienen impurezas teniendo características ácidas (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2), que reaccionan con los óxidos básicos a las temperaturas de calcinación para formar compuestos fundidos. La cantidad de tales compuestos formados dependen de la cantidad presente de impurezas y la temperatura de calcinación. Prácticamente no existe sobrecalentamiento a 1000°C , hasta a una exposición larga y constante. Ciertas temperaturas de calcinación para minerales en hornos no son conocidas. El rango reportado para calcinar calizas en hornos verticales es de 1250°C a 1650°C , semejante para la magnesita, las temperaturas para dolomitas son menores. En general, también, para partículas de mineral pequeñas de una composición dada las temperaturas son menores que para las grandes. El tiempo de calcinación para partículas de varios tamaños, fue compilado por Knibbs (Figuras 24 y 25).

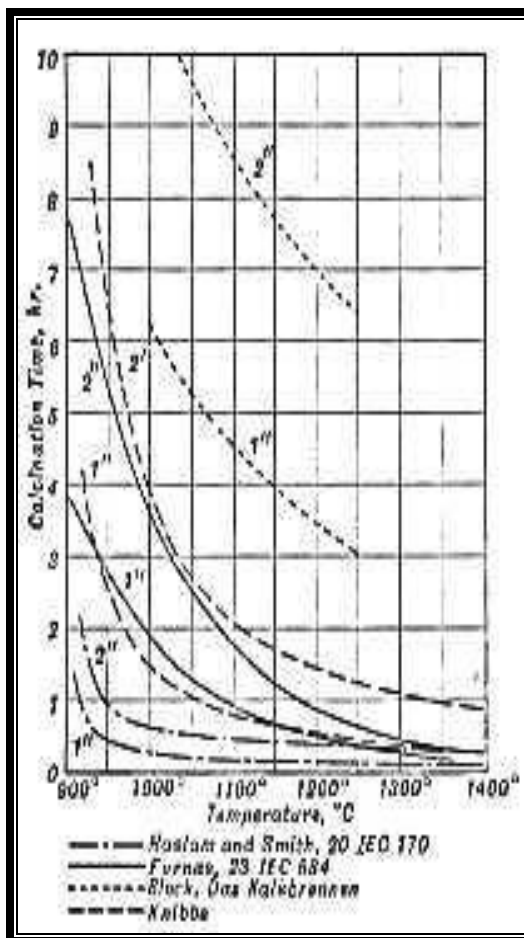


Fig. 24. Tiempo de Calcinación para tamaños de 1'' a 2'' a la temperatura dada

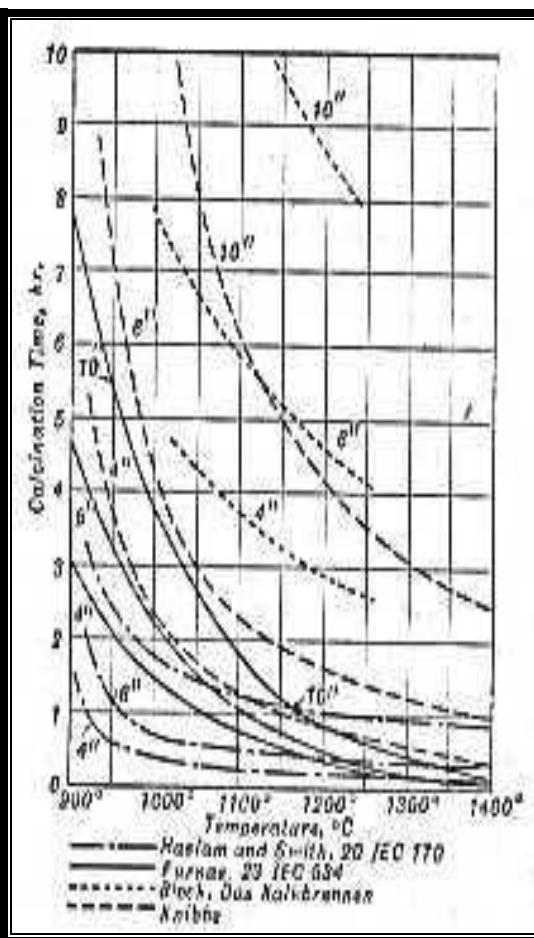


Fig. 25. Tiempo de Calcinación para tamaños de 4'' a 10'' a la temperatura dada.

Hornos de calcinación

Los hornos para carbonatos son de tipo verticales o rotatorios; los primeros son usados para capacidades pequeñas, mientras que los rotatorios usualmente son para grandes capacidades.

Hornos verticales

El horno consiste de tres zonas definidas: 1. Una zona de precalentamiento, extendiéndose en el descenso desde el nivel de carga a la altura en la cual la partícula

alcanza la temperatura de disociación. 2. Una zona de calcinación, abarcando el espacio donde la disociación activa ocurre, extendiéndose verticalmente desde el final de la zona de precalentamiento hasta el final de la zona de combustión activa o de la inserción del gas caliente. 3. Una zona de refrigeración, extendiéndose desde el final de la zona de calcinación hasta el punto de descarga (Figura 26).



Fig. 26. Hornos Verticales.

La zona de precalentamiento debería tener suficiente volumen para permitir la transferencia hacia la partícula de la mayoría del calor del gas desprendido en la zona de calcinación; la zona de calcinación debe tener suficiente volumen para mantener la partícula hasta que la calcinación sea completada; y la zona de refrigeración debe ser lo suficientemente grande para mantener el carbonato bajo radiación y conducción, reduciendo la temperatura de este permitiendo el manejo del material sin una refrigeración adicional.

Hornos rotatorios

Originalmente adoptados de la práctica del proceso para hacer cemento calcinando los finos producidos de la masa de cal quebrada de los hornos verticales,

ahora son usados generalmente en su mayoría para la producción de óxidos como CaO y MgO. (Figura 27).



Fig. 27. Horno Rotatorio.

Tamaño de partícula: es muy importante desde ciertos puntos de vista. En un horno vertical este determina la resistencia del gas a fluir y consecuentemente la uniformidad del calor y la energía que debe ser expendida en conjunto con la corriente de aire. Mientras sea más grande la partícula más debe ser expuesta al calor para una completa calcinación, y mayor la temperatura diferencial que debe ser mantenida para conducir el calor desde la superficie del óxido expuesto hasta la superficie del núcleo. Si la masa es muy grande, las temperaturas en la superficie deben ser tan altas que esta se sobrecalcina mientras todavía el núcleo no es calcinado. El tamaño máximo usual es de 15 cm (6 pulgadas) de espesor. Rangos más grandes de alimentación tienen menos volumen intersticial que rangos pequeños, manteniendo menos gas caliente (y menos calor) a un tiempo, a diferencia de los tamaños más reducidos. Además esto ofrece mayor resistencia al fluido del gas a circular. Los rangos pequeños finos también dan resistencia al fluido del gas. En general, 6.35 a 7.62 cm (2½ a 3 pulgadas) es el espesor de la partícula mínima para hornos verticales. Si la alimentación es de tamaños grandes y es muy calcinada en un horno vertical, es mejor alimentar con material a un rango más reducido a un cierto tiempo, o cargar tamaños diferentes en capas.

Los hornos rotatorios están limitados a alimentaciones más reducidas que los hornos verticales, porque estos no están adaptados para proporcionar el factor tiempo necesario para grandes tamaños. El tamaño máximo usual es de 3.8 a 5 cm ($1\frac{1}{2}$ a 2 pulgadas) de malla cuadrada, correspondiendo 2.29 a 3 (0.9 a 1.2 pulgadas) de espesor; el mínimo usual es 0.64 cm ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de malla cuadrada. Si existe suficiente material fino como para justificar rangos pequeños, calcinándose separadamente; o si la alimentación entera es fina, la calcinación es fácilmente posible.

Temperatura: en hornos rotatorios, la temperatura está bajo control mucho más rápida y efectivamente en el operador en comparación a los hornos verticales. La transferencia de calor es efectuada por radiación directa por la llama, por radiación de la pared expuesta, por conducción del gas. El calor principal suministrado en la zona de calcinación es la energía radiante de la llama, sujeta a la variación tanto en intensidad y extensión a lo largo del horno.

Diseño del horno: conlleva primeramente considerar el tamaño y la pureza del óxido a producir (CaO, MgO); el tonelaje a ser tratado; el carácter de la alimentación; el combustible disponible; y si el CO₂ es recuperado. El horno rotatorio debido a su costo y a los costos de operación por tonelada de producto es más favorable que el horno vertical, por lo cual debe ser seleccionado. Si la alimentación disponible es fina, o si es gruesa, estos pueden desintegrarse bajo la calcinación, en estos casos se debe usar un horno rotatorio. Todos los combustibles son adaptables a cualquier tipo de horno, lográndose obtener altas concentraciones de CO₂ en los gases salientes con cualquier tipo, siendo el diseño y tipo de operación del horno vertical mejores en la recuperación del CO₂.

CAPITULO V

DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Esquema de Desarrollo

Es de gran importancia planificar los pasos a seguir para conseguir un preciso y eficiente desarrollo experimental. A continuación se representa de forma esquemática las etapas necesarias para cumplir con el fin deseado en el presente trabajo (Figura 28):

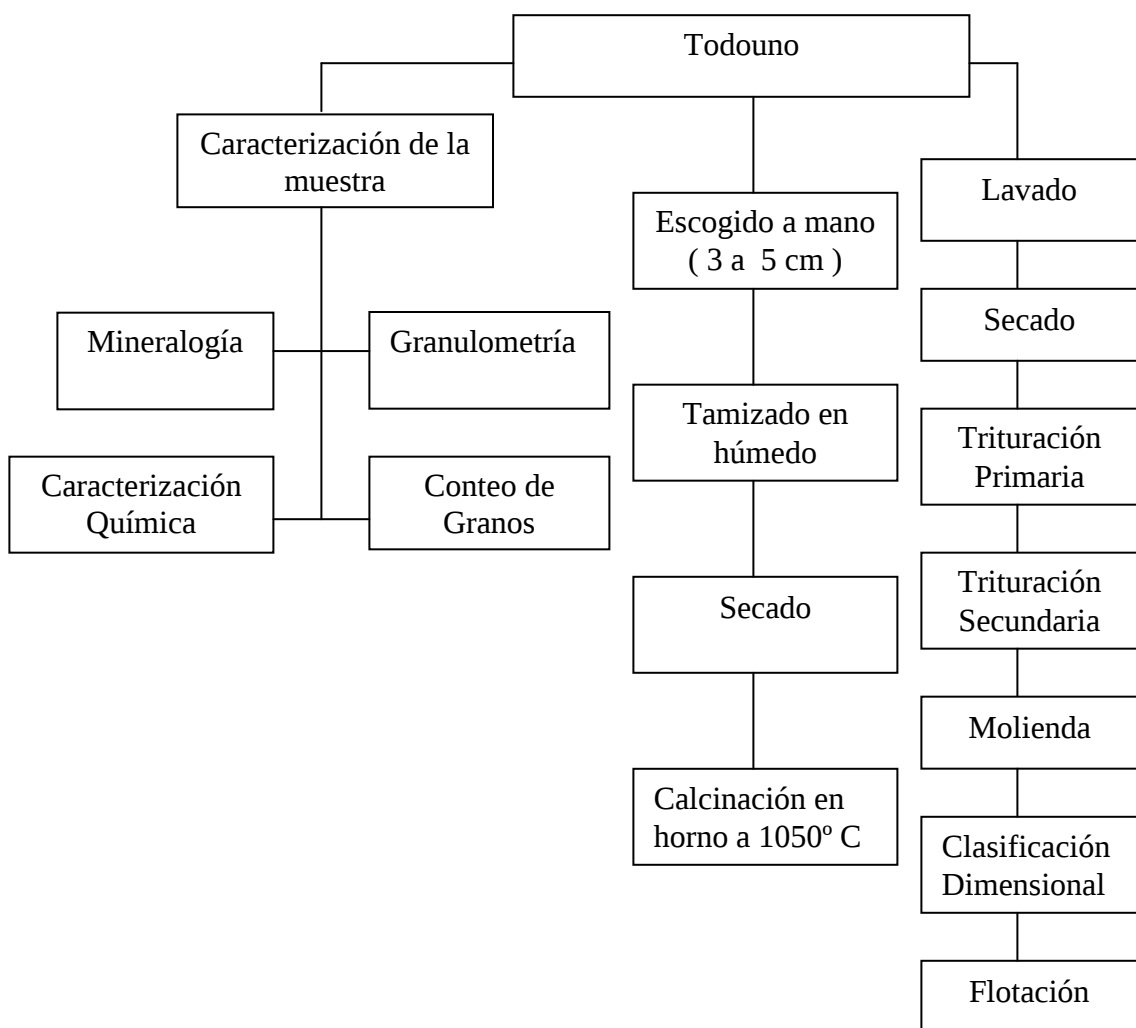


Fig. 28. Esquema General del Desarrollo Experimental.

5.2. Toma y Preparación de las Muestras en Campo

De la muestra objeto de este estudio se tomaron un total aproximado de 110 kg del depósito ubicado en Tinaquillo, Estado Cojedes, específicamente en el área de Cerrito Blanco. El muestreo se realizó de la forma tradicional a lo largo de un afloramiento de unos 20 – 25 m de longitud con herramientas de uso común.

Una vez llevado el material al Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, fue extendido para secado natural por dos días para eliminar el contenido de humedad presente. Luego fue homogeneizado, roleado y cuarteado con la finalidad de obtener muestra representativa para hacer los análisis de caracterización que serán especificados más adelante (Figura 29).



Fig. 29. Homogeneización de la Muestra.

5.3. Caracterización de las Muestras

El conocimiento de las cualidades físicas y químicas es indispensable para que el producto mineral obtenido cumpla una especificación dada, así como conocer cualitativamente las diferencias de comportamiento entre uno u otro mineral para un determinado proceso, ya sea por su forma y tamaño de partícula, contenido

mineralógico, composición química o grado de liberación, entre otros. Es necesario la realización de los siguientes pasos que se detallarán a continuación para ejecutar la caracterización de la muestra.

5.3.1. Descripción Macroscópica

Se observó un material vetiforme muy fracturado y cizallado de color de meteorización verde oscuro a negro con zonas rojas identificando posiblemente la presencia de óxido de hierro y color fresco blanco, de forma irregular y medianamente frágil, textura botroidal, hábito masivo, fractura concoidea, brillo mate, con zonas rugosas y sedosas al tacto. La magnesita se presenta en la mayoría del material con ópalo diseminado fácilmente visible en los fragmentos mayores de 3 cm y rodeada por arcillas esmectíticas (bentoníticas) que pueden ser fácilmente eliminadas con un lavado. Cabe destacar que los tamaños promedios de la magnesita vetiforme eran de 3 a 12 cm aproximadamente, además se presentaban en cantidades significativas en toda la muestra tamaños menores de 1 cm.

Para la determinación del contenido de humedad, se realizó por duplicado el ensayo para tomar la media como resultado final. La primera muestra húmeda pesó 1079.4 gr junto con el peso del recipiente utilizado de 84.2 gr. La segunda muestra húmeda pesó 1404.5 gr junto con un recipiente de 397.2 gr de peso. Estas muestras se sometieron a una temperatura de 105° C en un horno por 6 horas continuas siguiendo el procedimiento normal para ensayo de humedad. Posteriormente de haberse secado las muestras, se dejaron enfriar y se pesaron. El resultado para la primera muestra fue de 17.79 % y para la segunda de 18.00 %, siendo el contenido de humedad definitivo la media de estos dos resultados. El contenido de humedad presentado por el material fue de 17.90 %.

5.3.2. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico es uno de los ensayos primordiales para realizar una correcta caracterización, debido a la importancia de conocer el tamaño de grano o partículas. El análisis fue realizado en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas por vía húmeda con los tamices A.S.T.M.

Se colocó 1.8 Kg representativo del material del todouno (sin tratamiento previo) durante 30 minutos en el Ro – Tap con tamices desde $\frac{3}{4}$ " a 200 mallas y luego el material fue secado y pesado (Tabla 4 y Figura 30).

Malla		Retenido			Pasante
A.S.T.M.	Abertura (mm)	Peso (g)	%	Σ (%)	Σ (%)
# 3/4"	19,05	359,2	22,17	22,17	77,83
# 1/2"	12,70	96,4	5,95	28,12	71,88
# 3	6,688	108,2	6,68	34,8	65,2
# 6	3,350	110	6,79	41,59	58,41
# 10	1,998	90,6	5,59	47,18	52,82
# 16	1,180	116,4	7,18	54,36	45,64
# 25	0,706	81,2	5,01	59,37	40,63
# 40	0,419	67,9	4,19	63,56	36,44
# 70	0,212	92,4	5,7	69,26	30,74
# 100	0,150	42,6	2,63	71,89	28,11
# 120	0,125	62	3,83	75,72	24,28
# 150	0,100	21,4	1,32	77,04	22,96
# 200	0,075	91,4	5,64	82,68	17,32
# -200	< 0,075	280,4	17,3	100	0
Total		1620,1	100		

Tabla 4. Distribución Granulométrica de la Muestra procedente de Mina.

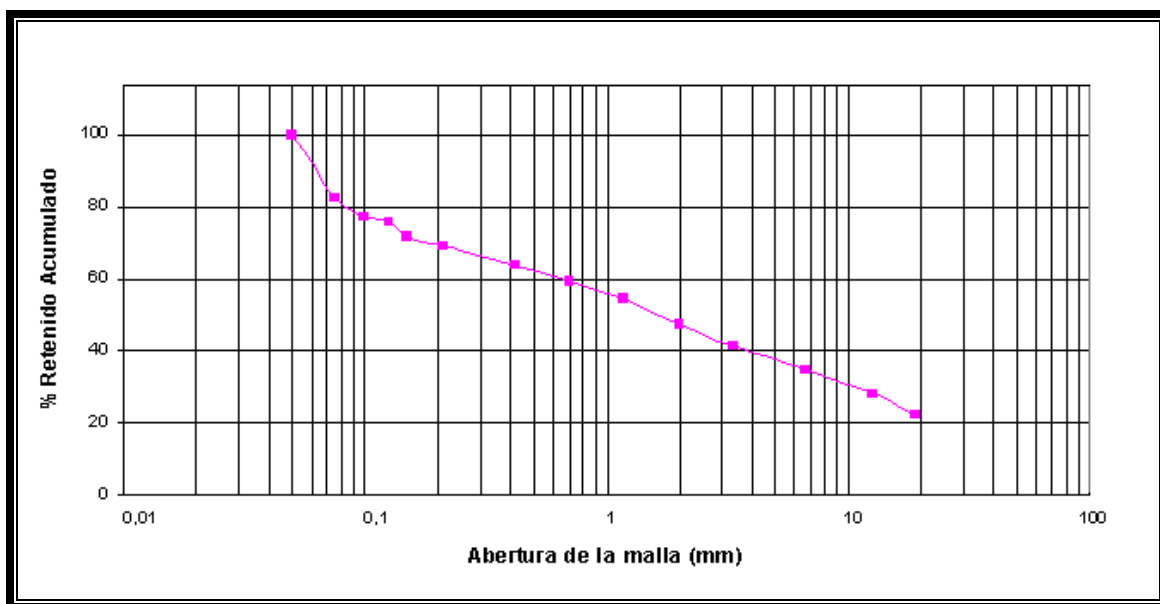


Fig. 30. Representación Gráfica de la Distribución Granulométrica de la Muestra procedente de Mina.

De la curva granulométrica se observa que el material se distribuyó en un 54.36% por encima de la malla # 16 (abertura 1.18 mm). Hubo un 17.30% pasante de la malla 200, observando macroscópicamente se deduce que la mayoría son arcillas esmectíticas.

5.3.3. Difracción de RX

La difracción de RX es una herramienta de gran utilidad para la determinación semicuantitativa de la composición mineralógica presente en la muestra de estudio, siendo importante para continuar con los pasos establecidos de la caracterización. Posteriormente esta información debe ser verificada por análisis químicos para obtener resultados más confiables.

Entre los métodos aplicados para la difracción de rayos X se encuentran, el método de Laue, los métodos de rotación (de Weissenberg y de precisión) y el método del polvo. Siendo este último el más usado.

El método del polvo encuentra su aplicación principal en mineralogía como una técnica de identificación. Se puede utilizar en este caso sin conocimiento de la estructura o simetría del cristal. Cada sustancia cristalina da lugar a su propio diagrama de polvo, que al depender de la estructura interna, es característico de la sustancia dada. Se dice a menudo, que el diagrama de polvo constituye la “huella dactilar” del mineral, porque difiere del diagrama de cualquier otro mineral. De esta manera, si se sospecha que un mineral desconocido es el mismo que otro conocido, se obtiene un diagrama de cada sustancia.

En los últimos años la utilidad del método de polvo ha crecido considerablemente y su campo se ha extendido con la introducción del difractómetro de polvo de rayos X (Figura 31). Este poderoso instrumento de investigación utiliza radiación monocromática y una muestra finamente pulverizada.



Fig. 31. Difractómetro de RX convencional, marca Jarrel Ash.

La muestra fue analizada por INGEOMIN, (ver anexo 6 y 7). Los resultados obtenidos indicaron que la muestra presentó abundante cantidad de magnesita y dolomita, muy escasa cantidad de serpentina, esmectita y trazas de muscovita, tomando en consideración la siguiente escala:

- Muy abundante (> 65%)
- Abundante (64 – 35%)

- Menor Proporción (34 – 15%)
- Escaso (14 – 5%)
- Muy Escaso (4 – 1%)
- Trazas (<1%).

5.3.4. Análisis Petrográfico

La petrografía tiene por objeto el estudio de la composición, estructura, relaciones mutuas, formación y alteración de las rocas.

El estudio petrográfico fue realizado en el Laboratorio de Mineralogía y Petrología Ígneo – Metamórfico de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica. A continuación se destaca la composición mineralógica, además descripciones de la sección fina de la muestra representativa , donde el tamaño promedio de los granos es de 1 micra:

Composición Mineralógica

Esenciales (E), Accesorios (A), Trazas (Tz)

1. Magnesita _____ 95% (E)
2. Ópalo _____ 2% (E)
3. Talco _____ 2% (E)
4. Muscovita _____ 1% (A)
5. Calcita _____ Tz (A)
6. Cuarzo _____ Tz (A)

Facies Metamórfica: Esquistos Verdes

Protolito: Igneo

Rango de Presión: 4 – 6 Kb

Rango de Temperatura: 200 – 300° C

Relación P/T: Intermedia

Nombre de la Roca (Mineralógico – Textural): Magnesita.

Los minerales esenciales observados se describen a continuación:

Magnesita: bajo nícoles paralelos el mineral magnesita es incoloro, mientras que bajo nícoles cruzados presenta un color similar al del carbonato de calcio, entre rosado y marrón pálido. A lo largo de toda la muestra se observa un hábito masivo, es decir no se observan cristales definidos, a su vez los cristales que se encuentran son de grano muy fino tamaño arcilla. El mineral está distribuido de una forma regular a lo largo de toda la sección delgada y presenta un patrón de fracturas bien definidas, las cuales se encuentran rellenas por ópalo, talco y muscovita en la mayoría de los casos; pero existen fracturas sin mineralizaciones. La magnesita se halla asociada a la muscovita, al ópalo y en menor grado a los minerales traza.

Ópalo: este polimorfo de cuarzo, bajo nícoles paralelos, se observa incoloro, mientras bajo nícoles cruzados presenta un color gris claro y blancuzco, su hábito es masivo en forma de relleno de fracturas. Su distribución a lo largo de la sección delgada es irregular y se encuentra asociado a la magnesita y al talco.

Talco: bajo nícoles paralelos es incoloro y bajo nícoles cruzados es de color blanquecino. Se encuentra distribuido a lo largo de la sección delgada de forma irregular con hábito de finos agregados fibrosos. El talco en la muestra se observa asociado en mayor grado a la magnesita y en algunos casos al ópalo.

Muscovita: esta mica bajo nícoles paralelos es incolora, mientras que bajo nícoles cruzados presenta colores amarillo y naranja. El hábito por lo general es de cristales alargados con fragmentos escamosos, que se distribuyen irregularmente a lo largo de la muestra. Se encuentra asociado a la magnesita y en algunos casos al talco

y al ópalo. A continuación se destacan los minerales identificados en la sección fina (Figura 32):

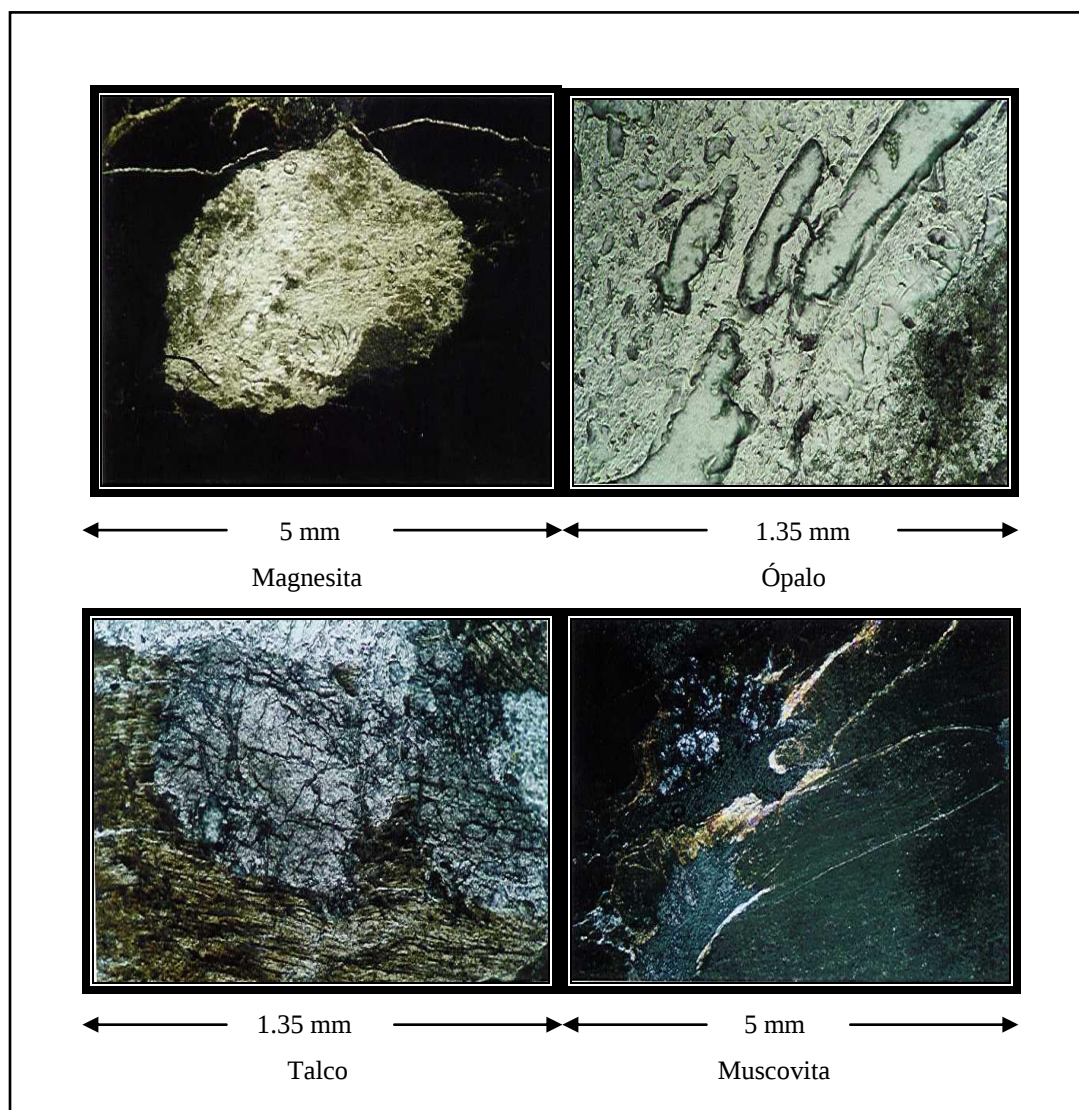


Fig. 32. Minerales identificados en la Sección Fina.

Los resultados obtenidos por difracción de RX y por petrografía coinciden en la mayoría de los minerales. Se observa que la magnesita en los dos análisis está presente de forma abundante, siendo mayor porcentaje en la petrografía debido a que la muestra representativa fue seleccionada entre los tamaños de 10 a 12 cms, a los parámetros exigidos por este estudio para poder realizar la sección fina, por lo tanto la

muestra representativa estaba libre de arcillas esmectíticas. Mientras en la difracción de rayos X, la muestra era del todo uno sin tamaños mayores a 3 μ m de magnesita, conteniendo arcillas esmectíticas y otros minerales accesorios. El talco se presentó en la petrografía, mientras en la difracción fue dolomita ofreciendo cierta disparidad. Hubo importante contenido de ópalo (2%) calificado como mineral esencial, el cual no se presenta en la difracción debido que el ópalo no desarrolla cristalinidad, por lo que no es detectado por el difractómetro. La muscovita se presenta en la petrografía como mineral accesorio (1%), mientras en la difracción como probable, indicando que se encuentra pero en poca cantidad. El cuarzo no es detectado en la difracción y en la petrografía como traza, así como la calcita.

5.3.5. Conteo de granos

Un prerequisite esencial para la separación de un mineral en sus fracciones de útil y ganga, es la liberación de los granos de mineral de valor de los granos de mineral de estéril. El grado de liberación es el porcentaje de un mineral dado que existe en la forma de partículas libres, es decir, partículas que contienen sólo ese mineral. Las partículas que contienen a la vez los minerales de útil y ganga se conocen como partículas no liberadas o mixtas, y gran parte de las dificultades que se experimentan en la separación de minerales radica en el tratamiento de estas partículas.

El análisis de liberación o conteo de granos fue realizado en el Laboratorio de Mineralogía y Petrología de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Se tomaron las masas retenidas en los diferentes tamices utilizados en la granulometría hecha por vía húmeda, y se llevó a cabo un cuarteo sistemático de cada una para obtener una fracción representativa de la muestra original.

Las fracciones de las mallas # 6, 10, 16, 25, 40, 70, 100, 120, 150, 200 y pasante de 200 fueron colocadas debidamente encima de una hoja cuadriculada

sostenida en el portaobjetos del microscopio utilizado. Se utilizó una lupa Ernst Wetzlar marca Leitz (Germany 4X) (Figura 33) para los tamaños de grano relativamente gruesos y el microscopio HM – Pol marca Leitz para los tamaños de granos finos a la vista.



Fig. 33. Conteo de Granos.

Se procedió a hacer un conteo de granos de lo útil, intermedio y ganga. Se fijó la posición horizontal y se realizó un barrido vertical en las diferentes cuadrículas, marcándose el número de granos contados de útil y de ganga en un contador. Se observó una característica muy importante en todas las mallas y era su grado de liberación total, o sea de 100 %.

Se observó que los granos de magnesita con su hábito masivo, brillo mate estaban siempre separados de los minerales ganga como el ópalo que se presentaba como gris claro, con su brillo característico vítreo y aspecto masivo; óxidos de hierro con colores rojizos, tonalidades oscuras y negra, serpentina con color verde, esmectitas de color amarillo verdusco, dolomita de color blanco y brillo graso y la muscovita con brillo vítreo y color blanquecino (Figura 34). En ninguna malla se observaron partículas mixtas. El ópalo se encontraba como partícula mixta con

respecto a otros granos de ganga pero no al útil (aunque este se presenta en el interior de la magnesita, según los análisis químicos realizados posteriormente).

Se asumió la siguiente categoría numerada que agrupa los granos y partículas de minerales observados para destacar la distribución porcentual de magnesita en cada malla (Tabla 5):

Categoría 1. 100% Útil: magnesita + ópalo.

Categoría 2. 50% Ganga mixto: ópalo + serpentina + óxidos de hierro + esmectita + dolomita + muscovita.

Categoría 3. 25% Ganga: ópalo.

Categoría 4. 100% Ganga: serpentina + óxidos de hierro + esmectita + dolomita + muscovita.

Malla A.S.T.M.	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Porcentaje de útil
6	104	33	62	101	34.66
10	62	34	75	129	20.66
25	43	41	96	120	14.33
40	43	62	122	72	14.33
70	23	38	117	122	7.66
100	25	30	129	115	8.33
120	31	33	177	58	10.33
150	21	26	202	55	7.00
200	17	20	223	32	5.66
-200	12	36	230	22	4.00

Tabla 5. Distribución Porcentual de Magnesita en cada malla.

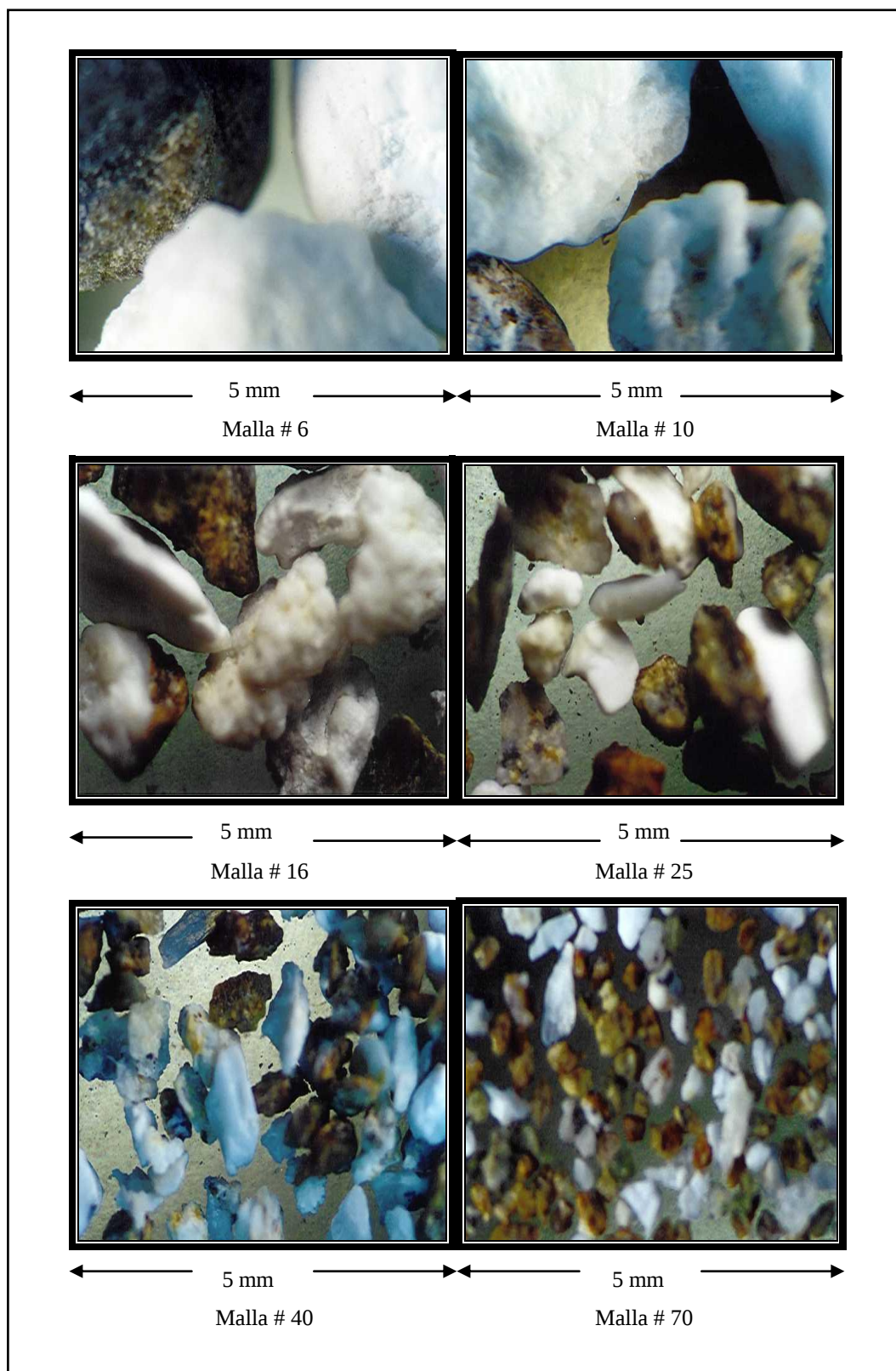


Fig. 34. Microfotografías de las Fracciones objeto de Estudio de Liberación

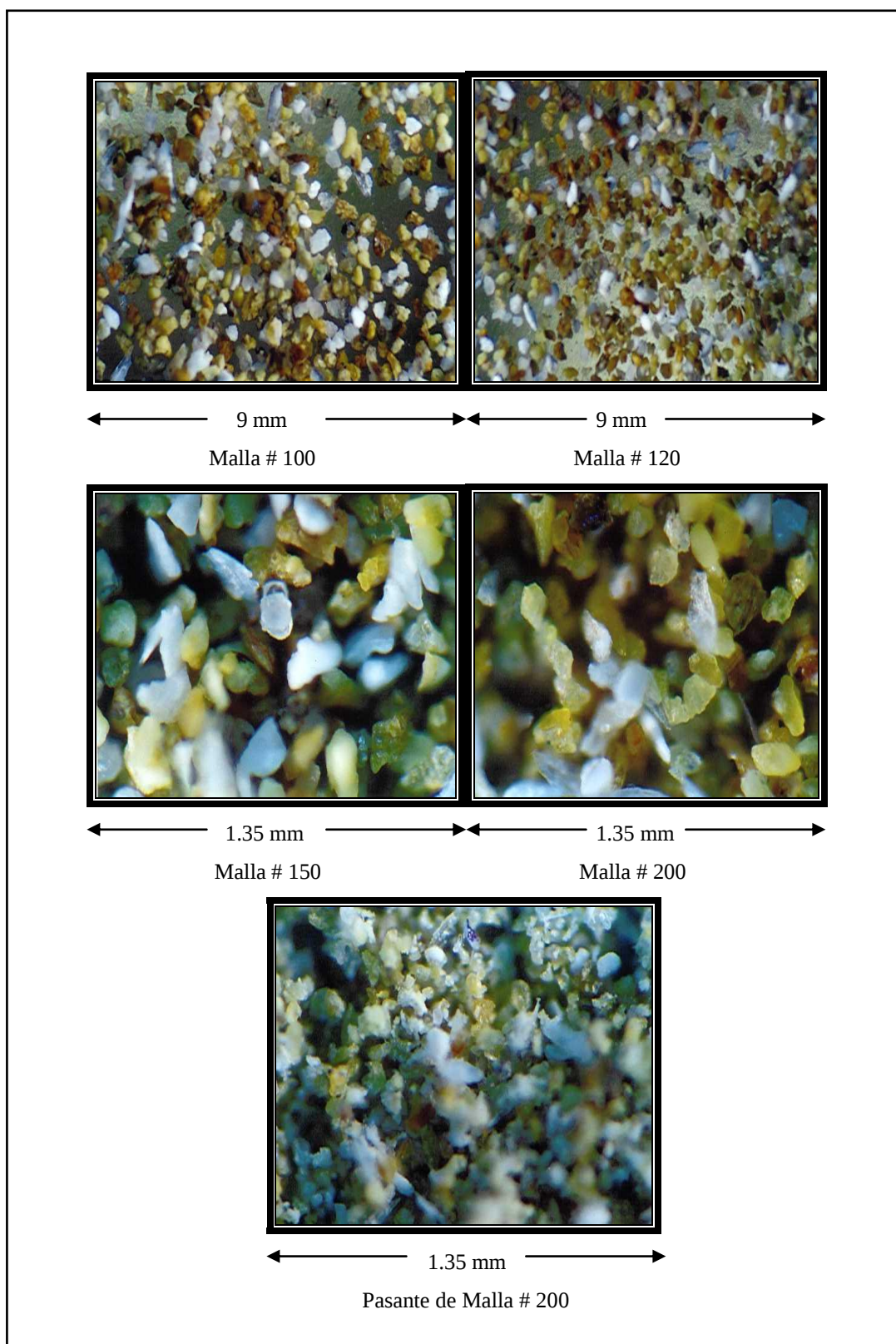


Fig. 34. Microfotografías de las Fracciones objeto de Estudio de Liberación. (Continuación).

Se observa que la mayor cantidad de útil está retenido en la malla # 6, y en menor proporción en la # 10, 25, 40 y 120, bajando en las mallas inferiores; la ganga con ópalo se mantiene relativamente constante, mientras el ópalo aumenta a medida que aumenta el número de malla y la ganga sin ópalo empieza con un porcentaje considerable en las primeras mallas y luego baja abruptamente.

5.3.6. Estudio de Moliendabilidad

Luego de la etapa de trituración secundaria a la muestra en estudio, esta se presenta en condiciones físicas no aptas para el tratamiento posterior, por lo que se hizo necesario realizar una tercera etapa de molienda del mineral para reducir el tamaño y observar el comportamiento del mineral.

Se realizó el estudio de moliendabilidad para determinar el tiempo necesario para obtener material 80 % pasante de la malla # 70, debido a la significativa cantidad presente de magnesita en las mallas inferiores; como se muestra en la tabla 5.

Se prepararon 3 kilogramos de material para alimentar el molino de barras marca Denver, comprendido por 10 barras de 30 cm de longitud. Se hicieron pasadas por el molino de 1 kilogramo a razón de 3 minutos, para determinar la distribución granulométrica en cada caso y así construir la gráfica Gaudin – Schuhmann (Figura 35) con el reporte del ensayo realizado. Además se reporta la distribución granulométrica de la muestra procedente de mina (Tablas 6, 7, 8, 9).

Malla		Retenido			Pasante
A.S.T.M.	Abertura (mm)	Peso (g)	%	Σ (%)	Σ (%)
# 3/4"	19,05	359,2	22,17	22,17	77,83
# 1/2"	12,70	96,4	5,95	28,12	71,88
# 3	6,688	108,2	6,68	34,8	65,2
# 6	3,350	110	6,79	41,59	58,41
# 10	1,998	90,6	5,59	47,18	52,82
# 16	1,180	116,4	7,18	54,36	45,64
# 25	0,706	81,2	5,01	59,37	40,63
# 40	0,419	67,9	4,19	63,56	36,44
# 70	0,212	92,4	5,7	69,26	30,74
# 100	0,150	42,6	2,63	71,89	28,11
# 120	0,125	62	3,83	75,72	24,28
# 150	0,100	21,4	1,32	77,04	22,96
# 200	0,075	91,4	5,64	82,68	17,32
# -200	< 0,075	280,4	17,3	100	0
Total		1620,1	100		

Tabla 6. Distribución Granulométrica de la Muestra procedente de Mina.

Malla		Retenido			Pasante
A.S.T.M.	Abertura (mm)	Peso (g)	%	Σ (%)	Σ (%)
# 12	1,7	5,20	0,57	0,57	99,43
# 16	1,180	27,80	3,05	3,62	96,38
# 25	0,706	124,6	13,68	17,31	82,69
# 40	0,419	130,5	14,33	31,64	68,36
# 70	0,212	120,3	13,21	44,85	55,15
# 100	0,150	97,40	10,69	55,55	44,45
# 120	0,125	36,20	3,98	59,52	40,48
# 150	0,100	37,60	4,13	63,65	36,35
# 200	0,075	81,60	8,96	72,61	27,38
# 270	0,053	47,10	5,17	77,78	22,22
# 325	0,045	75,00	8,24	86,02	13,98
# 400	0,038	12,50	1,37	87,39	12,61
# -400	< 0,038	114,8	12,61	100	0
Total		910,6	100		

Tabla 7. Distribución Granulométrica a 3 minutos de Molienda.

Malla		Retenido			Pasante
A.S.T.M.	Abertura (mm)	Peso (g)	%	Σ (%)	Σ (%)
# 12	1,7	3,00	0,33	0,33	99,68
# 16	1,180	11,00	1,18	1,50	98,50
# 25	0,706	54,70	5,85	7,35	92,65
# 40	0,419	137,00	14,65	21,99	78,00
# 70	0,212	136,80	14,63	36,62	63,38
# 100	0,150	79,20	8,47	45,09	54,91
# 120	0,125	24,40	2,61	47,69	52,30
# 150	0,100	46,00	4,92	52,61	47,39
# 200	0,075	79,30	8,48	61,09	38,91
# 270	0,053	53,90	5,76	66,85	33,14
# 325	0,045	76,50	8,18	75,03	24,96
# 400	0,038	26,50	2,83	77,86	22,13
# -400	< 0,038	207,0	22,13	100	0
Total		935,3	100		

Tabla 8. Distribución Granulométrica a 6 minutos de Molienda.

Malla		Retenido			Pasante
A.S.T.M.	Abertura (mm)	Peso (g)	%	Σ (%)	Σ (%)
# 25	0,706	17,90	1,82	1,82	98,18
# 40	0,419	112,8	11,46	13,28	86,72
# 70	0,212	140,4	14,26	27,54	72,46
# 100	0,150	74,40	7,56	35,10	64,89
# 120	0,125	44,90	4,56	39,66	60,34
# 150	0,100	11,70	1,19	40,85	59,15
# 200	0,075	52,60	5,34	46,19	53,80
# 270	0,053	128,6	13,06	59,26	40,74
# 325	0,045	64,20	6,52	65,78	34,21
# 400	0,038	24,90	2,53	68,31	31,69
# -400	< 0,038	311,9	31,69	100	0
Total		984,3	100		

Tabla 9. Distribución Granulométrica a 9 minutos de Molienda.

Del gráfico Gaudin – Schuhmann (Figura 35) se puede observar que para el tiempo de molienda de 3 minutos existe un pasante de 55.15 % de la malla # 70, a los 6 minutos de 63.38 %, mientras a los 9 minutos es de 72.45 %. El material pasante de la malla 200 aumenta considerablemente al pasar los minutos, de un 27.38

% a los 3 minutos a 53.80 % de 9 minutos, pudiendo afectar el posterior tratamiento debido al exceso de finos y menor cantidad de mineral útil presente en estas mallas.

La recta que se indica en el gráfico representa el parámetro que ha de interceptarse para conseguir el tiempo de molienda adecuado para una malla específica. Así, el porcentaje pasante a cualquier malla va a estar dado en función al módulo de tamaño “K”. Dicha expresión está dada por la ecuación 1:

$$Pp = 100 \left(\frac{d}{k} \right)^{\alpha} \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

Pp: Porcentaje pasante a la dimensión d.

α : Módulo de Distribución.

d: Abertura de la malla en mm.

K: Módulo de Tamaño.

Tomando en cuenta el módulo de distribución α calculado de 0.4425 al 80 % pasante de malla # 70 y despejando K se obtiene la dimensión que ha 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 resultando en un tiempo de molienda de 14 minutos y 30 segundos.

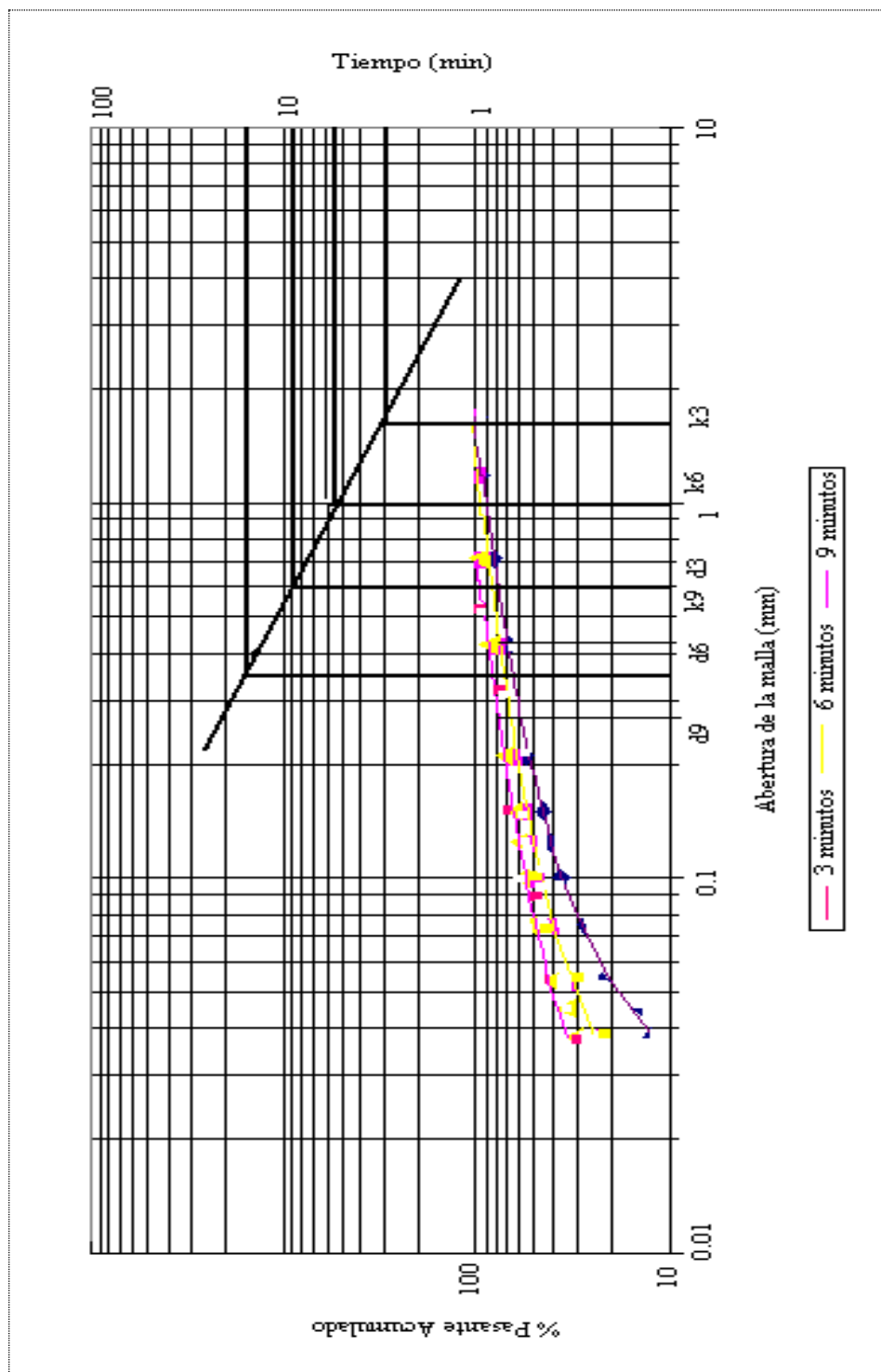


Fig. 35. Gráfico Gaudin – Schuhmann mostrando los resultados obtenidos del Estudio de Moliendabilidad de la mena de Magnesita.

5.3.7. Análisis Químicos

Se consideró realizar análisis químicos a tres muestras características del depósito en estudio. Se describen a continuación:

1. Muestra característica procedente de mina sin tratamiento alguno (todouno), acompañada por abundante cantidad de arcillas esmectíticas.
2. Muestra cabeza de flotación, sometida a un lavado para eliminar la cantidad de finos.
3. Muestra del escogido a mano, sometida a un lavado para eliminar la escasa cantidad presente de arcillas adherida a su superficie. Este material será el utilizado para los ensayos de calcinación.

Se obtuvieron las concentraciones de los compuestos fundamentales para este estudio, tales como, óxido de magnesio (MgO) y sílice (SiO_2), además de óxido de calcio (CaO) (este compuesto fue determinado solamente a estas muestras y posteriormente a las que iban a ser sometidas a calcinación).

Los análisis se determinaron por Espectroscopia de Absorción Atómica en el laboratorio de INGEOMIN, con un equipo marca Perkin – Elmer 5100 PC (Figura 36), además se verificaron los resultados en el laboratorio del Instituto de Ingeniería, con la finalidad de tener mayor precisión en los valores definitivos.

La espectroscopia de absorción atómica comprende el estudio de la absorción de energía radiante (generalmente en las regiones ultravioleta y visible) por átomos neutros en estado gaseoso. En un análisis de la absorción atómica el elemento que se determina debe ser reducido al estado elemental, vaporizado e introducido en el haz

de radiación procedente de la fuente. Este proceso se logra más frecuentemente llevando un soluto de la muestra, como fina niebla, a una llama apropiada.



Fig. 36. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica de INGEOMIN

El procedimiento analítico fue iniciado pesando en una balanza Mettler AE 240 de 0.0001 g de apreciación 0.1 g de las muestras nombradas anteriormente, además de las posteriores de los ensayos exploratorios y experimentales de los procesos de concentración. Luego se pesaron 0.5 g de metaborato de litio (LiBO_2) para trabajar en una relación 6:1. El peso de la muestra de 0.1 g se homogeneizó adecuadamente con la cantidad escogida del metaborato de litio, para luego ser depositada en crisoles de grafito junto con un peso extra de 0.1 g del fundente para evitar pérdidas del material en la fusión. El proceso de fusión fue llevado a cabo en una mufla a 1050°C por 15 minutos.

Posteriormente se preparó una solución al 10 % de ácido nítrico (HNO_3) para disolver la perla formada por la fundición por medio de planchas y agitadores magnéticos (Figura 37). Luego de estar disueltas las perlas, las soluciones fueron trasvasadas a balones aforados de 100 ml, que fueron enrasados con agua destilada (Figura 38).



Fig. 37. Dilución de Perla.



Fig. 38. Balones Aforados con la Perla Diluida.

A partir de las muestras en solución se procedió a preparar patrones de referencia y determinar su respectiva curva de calibración, además de fijar las condiciones necesarias de funcionamiento del equipo de absorción atómica.

La curva de calibración necesaria para comparar las soluciones problema con las soluciones estándar de concentración conocida del elemento a determinar (llamado comúnmente analito) fue realizada en el equipo de absorción atómica, preparándose de esta manera patrones multielementales de magnesio y silicio, además de los llamados blancos contentivos de metaborato de litio diluido en ácido nítrico al 10 %.

Los resultados de los análisis químicos de los compuestos determinados por Espectroscopia de Absorción Atómica se muestran a continuación (Tabla 10):

Muestra	% MgO	% SiO ₂	% CaO
Todouno	15,23	35,59	6,96
Cabeza de Flotación	17,79	33,8	7,21
Escogido a mano	39,59	15,69	9,84

Tabla 10. Resultados de Análisis Químicos.

En la muestra todouno se puede observar el bajo contenido de óxido de magnesio y la alta cantidad de sílice, mientras el óxido de calcio está presente con un bajo porcentaje, debido principalmente a la abundante cantidad presente de arcillas esmectíticas.

La muestra del todouno luego de ser sometida a un lavado reportó resultados más favorables debido al aumento en porcentaje de óxido de magnesio y de óxido de calcio mientras la proporción en sílice disminuyó, comportándose el lavado como una etapa de preconcentración.

La muestra del escogido a mano presentó el porcentaje de óxido de magnesio y óxido de calcio más alto, disminuyendo considerablemente la sílice; ocasionado por la escasa cantidad presente de arcillas esmectíticas (eliminadas por el lavado).

5.4. Ensayos Experimentales de Concentración

Una vez caracterizada la muestra se continuó con los ensayos experimentales de laboratorio, constituidos por los ensayos exploratorios y experimentos de concentración por flotación, para determinar los parámetros más adecuados de la operación y obtención de concentrados que alcancen especificaciones de calidad industrial.

Como base para realizar los ensayos exploratorios se consideró la información suministrada por la empresa Cytex de México S.A. Entre las recomendaciones indicaban una granulometría de $-70 + 200$ (similar al dato reportado en el Kelly & Spottiswood); el material debía preferiblemente ser deslamado para reducir los finos, pH natural, densidad de pulpa entre 25 y 30 % y una serie de reactivos (nombrados a continuación) con las características necesarias para realizar una flotación directa.

5.4.1. Ensayos Exploratorios de Flotación

A través de los ensayos exploratorios se determinaron las condiciones de flotabilidad de la mena y su respuesta a este proceso, con la finalidad de definir la mejor combinación de variables que se ajusten a un mayor rendimiento del proceso, obteniendo mejores concentrados y recuperaciones.

El programa de ensayos tomó como base para realizar los ensayos exploratorios las siguientes condiciones de trabajo:

- Alimentación de 125 gramos previamente deslamada.
- Granulometría de $-70 + 200$ mallas.
- Densidad de pulpa entre 25 y 30 % de sólidos.
- Velocidad de rotación de 1100 a 1200 rpm.
- pH natural.
- Colector: emulsión (Aero 845 – Fuel Oil).
- Espumante: aceite de pino.
- Deprimientes: silicato de sodio, almidón, ácido tánico.

Como fase previa se efectuó una serie de ensayos de reconocimiento antes de realizar los ensayos exploratorios, para mejorar la manipulación, adiestramiento en el equipo y control de variables influyentes en el proceso.

El reactivo utilizado como colector fue la emulsión Aero 845 – Fuel Oil, que actúa como colector y espumante; con una densidad de 2.3 g/cm^3 , preparada a una relación 1 : 1 en su estado puro (sin diluir). Se reforzó el papel espumante del colector con aceite de pino. Los reactivos utilizados como deprimientes fueron el silicato de sodio, siendo este el de mayor importancia debido a la alta cantidad presente de silicatos en la muestra de alimentación de flotación; almidón al 5 % para

el talco, ácido tánico al 5 % para dolomita y calcita; se utilizó la celda de flotación de 500 ml de capacidad marca Denver.

La velocidad de rotación se tomó como referencia de 1100 a 1200 rpm por ser el rango más eficaz en los ensayos a nivel de laboratorio, donde el grado de turbulencia era el adecuado para que las partículas de magnesita fueran adheridas a las burbujas. Para realizar la flotación directa, se aplicaron sobre la pulpa preparada los deprimentes nombrados anteriormente, luego el colector y por último, el espumante.

El tiempo de acondicionamiento sin entrada de aire fue de 10 minutos repartidos de la siguiente manera: 2 minutos para el silicato de sodio, almidón y ácido tánico respectivamente; 3 minutos para la emulsión Aero 845 – Fuel Oil y 1 minuto para el aceite de pino. La recolección de espumas se realizó en 3 minutos debido a que en este tiempo la cantidad de espumas era escasa, posteriormente se sometieron los productos concentrados y colas a filtrado y secado en la estufa a 150° C.

En el concentrado se obtuvo excesiva ganga y la magnesita presente era de tamaño fino, mientras en la cola había una proporción similar de ganga, pero la magnesita presentaba un tamaño promedio grueso, indicando que las burbujas no cumplían efectivamente con el papel de adherir las partículas deseadas a su superficie.

Visualmente se pudo observar por el microscopio que los resultados de las pruebas de reconocimiento no dieron satisfactorios, debido a la falta de selectividad en la separación del útil y la ganga, en las colas se dejaba de recuperar gran cantidad del mineral.

El factor que podía estar afectando el proceso de flotación era el tamaño de los granos y el exceso de ganga contenido en las mallas inferiores a la 150. Por lo tanto,

se preparó el material 80 % pasante de la malla 100 hasta retenido de malla 150 con un nuevo tiempo de molienda de 23 minutos (obtenido de la gráfica Gaudin – Schuhmann), realizándose ensayos de reconocimiento del comportamiento del material a la nueva condición planteada. Los resultados fueron aceptables en comparación a los ensayos anteriores, por lo que los ensayos experimentales posteriores fueron aplicados con esta variación.

En base a las pruebas de reconocimiento realizadas, se procedió a ejecutar los ensayos exploratorios por duplicado. Por inspección visual fueron seleccionados los de mayor eficiencia aparente para ser sometidos a análisis químicos por espectroscopia de absorción atómica, debido a la limitante económica.

Los ensayos exploratorios fueron ejecutados siguiendo un diseño experimental de 2^2 con las variables velocidad de rotación (rpm) y densidad de pulpa (%), manteniendo fijas las dosis de los reactivos y los tiempos de acondicionamiento usados en las pruebas preliminares. En la tabla 11 se resumen las condiciones de trabajo:

Ensayo	Variables	Reactivos (Dosis en g/ton)
1	RPM = 1100 Pulpa = 25 %	Emulsión: 1620, Silicato de Sodio: 1250, Ácido Tánico: 480, Almidón: 1120, Aceite de Pino: 740
2	RPM = 1200 Pulpa = 25 %	Emulsión: 1620, Silicato de Sodio: 1250, Ácido Tánico: 480, Almidón: 1120, Aceite de Pino: 740
3	RPM = 1100 Pulpa = 30 %	Emulsión: 1620, Silicato de Sodio: 1250, Ácido Tánico: 480, Almidón: 1120, Aceite de Pino: 740
4	RPM = 1200 Pulpa = 30 %	Emulsión: 1620, Silicato de Sodio: 1250, Ácido Tánico: 480, Almidón: 1120, Aceite de Pino: 740

Tabla 11. Condiciones para Ensayos Exploratorios de Flotación.

Los resultados de los ensayos exploratorios se indican en la tabla 12, representándose el MgO y SiO₂ y la recuperación en porcentaje.

		Peso (g)		% MgO	% SiO ₂	R (%)	K (*)
	Producto	Ensayo	Duplicado				
1	Cabeza	125	125	17,79	33,8	71,85	2,27
	Concentrado	38,8	38,2	28,97	28,52		
	Cola	82,3	82,1	8,97	34,38		
2	Cabeza	125	125	17,79	33,8	35,68	3,7
	Concentrado	42,2	41,9	23,48	32,09		
	Cola	75,7	75,9	15,69	36,64		
3	Cabeza	125	125	17,79	33,8	69,67	2,21
	Concentrado	37,4	37,6	27,39	30,62		
	Cola	84,5	84,3	9,86	33,75		
4	Cabeza	125	125	17,79	33,8	32,22	3,02
	Concentrado	40,4	40,1	22,39	34,07		
	Cola	78,6	78,9	15,51	39,31		

* Grado de Concentración

Tabla 12. Resultados de los Productos de los Ensayos Exploratorios de Flotación.

Los valores de recuperación y contenido de óxido de magnesio presentes en el producto concentrado del primer caso, 71,85 % y 28,97 % respectivamente; son los más favorables. Además el porcentaje de sílice presente en el concentrado es el menor de todas las condiciones.

Estos valores se asemejan en gran medida al tercer caso, que posee valores similares pero levemente inferiores, aunque el grado de concentración es un poco mayor. En definitiva se establece el primer caso como el definitivo, donde la velocidad es de 1100 rpm y la densidad de pulpa de 25 %, para posteriormente variar otros parámetros con el fin de medir la influencia que puedan tener en los ensayos subsiguientes.

La velocidad de 1100 rpm permitió que el grado de turbulencia fuera el adecuado para que las partículas del mineral permanecieran adheridas a las burbujas,

destacándose la alta recuperación descrita en la tabla 12 en los ensayos 1 y 3, mientras que el aumento a 1200 rpm no correspondió a resultados favorables, decayendo visiblemente la recuperación; causado por el alto grado de turbulencia que se produce a esta velocidad. El porcentaje de sólidos en la pulpa de 25 % ofreció mejores resultados en comparación a 30 %, siendo la alternativa seleccionada para los experimentos definitivos.

Se hizo uso de la estadística para obtener los resultados de efecto de cada variable en el peso del concentrado, el porcentaje de óxido de magnesio en los productos y la recuperación.

La escogencia de la primera condición se puede verificar de la tabla 13. Como se puede observar en la figura 39, a medida que se aumenta la velocidad de rotación del equipo de flotación aumenta el peso del concentrado, aunque el contenido en porcentaje de óxido de magnesio en el concentrado disminuye en 5.24 % (Figura 40), y la recuperación decae significativamente en 36.81 % (Figura 41). Indicando que debido al aumento de la velocidad de rotación, el material no es flotado selectivamente, permitiendo el paso significativo del mineral de ganga, mientras el mineral de magnesita conteniendo el óxido de magnesio no se adhiere de forma efectiva a las burbujas de aire por la turbulencia. Por lo tanto, la condición de 1100 rpm es la más efectiva y en definitiva la seleccionada para los posteriores experimentos de concentración definitivos.

La densidad de pulpa más efectiva es la de 25 %, debido a que los valores de peso del concentrado, recuperación y óxido de magnesio se redujeron en 1.6 g, 2.82 % y 1.34 %, respectivamente. Esta disminución es causada por el porcentaje de sólidos en la pulpa, que a medida que aumenta permite que la flotación sea menos eficiente debido a la falta de selectividad. Las burbujas no logran separar efectivamente el mineral útil de la ganga a medida que esta variable se incrementa (Figuras 42, 43 y 44).

La densidad de pulpa seleccionada para los posteriores experimentos definitivos de flotación es la adecuada debido a que si es aumentado el porcentaje de sólidos en la pulpa la recuperación decae; teniendo en cuenta además que una densificación de la pulpa menor a ésta puede no ser conveniente, ya que los reactivos utilizados se comportarían con menos eficiencia debido a la alta dilución. Cuanto mayor es la densidad de la pulpa, las partículas finas de ganga tienden a acompañar el mineral flotado, la aireación baja su efectividad influyendo en la calidad de la burbuja que se desea obtener; por lo tanto, para una recuperación determinada la ley del concentrado es menor, más contaminado de ganga, cuanto mayor es el porcentaje de sólidos en la pulpa.

Los valores calculados en la tabla 13, indican la sensibilidad al variar la velocidad de rotación (rpm) y la densidad de pulpa (%) en el peso del concentrado (g), recuperación (%) y contenido de MgO en el concentrado (%). Destacándose en mayor proporción la influencia de la velocidad de rotación sobre estos, en comparación a la densidad de pulpa que presenta cambios muy leves e inferiores.

	Peso del Concentrado (g)	R (%)	% MgO
V1	38,1	70,76	28,18
V2	41,3	33,95	22,94
P1	40,5	53,77	26,23
P2	38,9	50,95	24,89

Tabla 13. Reporte de Combinaciones de Variables

Donde:

V1: velocidad de rotación a 1100 rpm.

V2: velocidad de rotación a 1200 rpm.

P1 : densidad de pulpa a 25 %.

P2 : densidad de pulpa a 30 %.

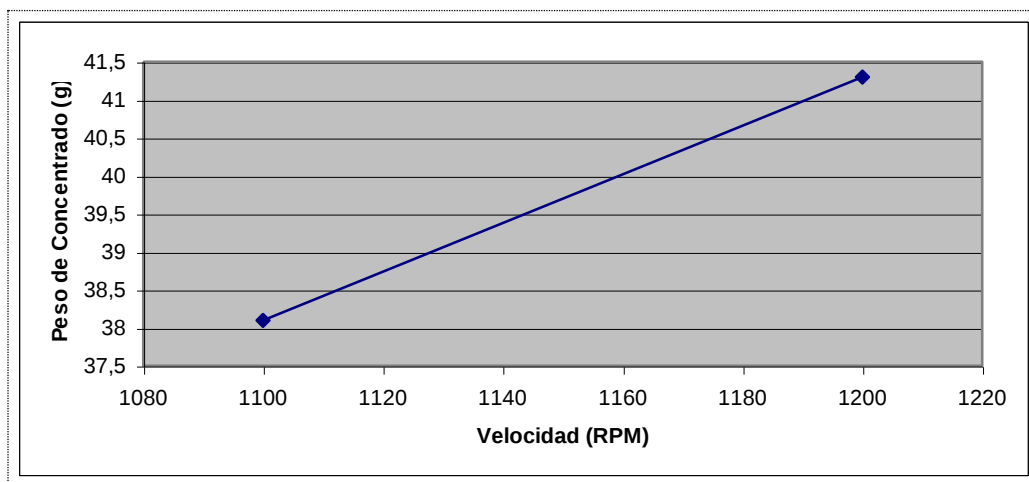


Fig. 39. Representación Gráfica del Efecto de la Velocidad de Rotación en el Peso de Concentrado.

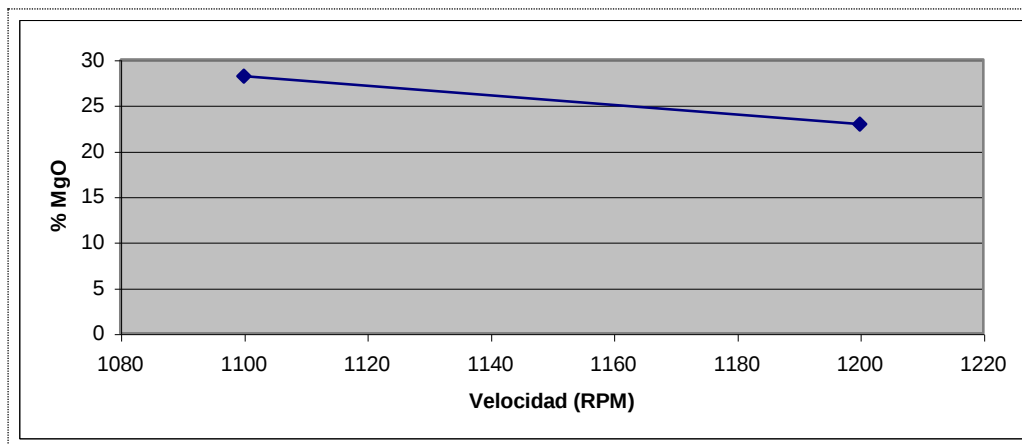


Fig. 40. Representación Gráfica del Efecto de la Velocidad de Rotación en el porcentaje de MgO.

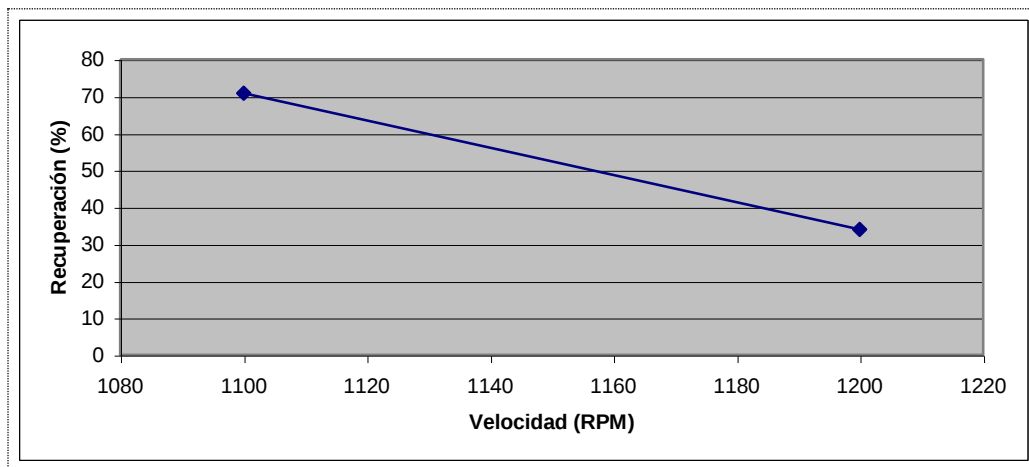


Fig. 41. Representación Gráfica del Efecto de la Velocidad de Rotación en el porcentaje de Recuperación

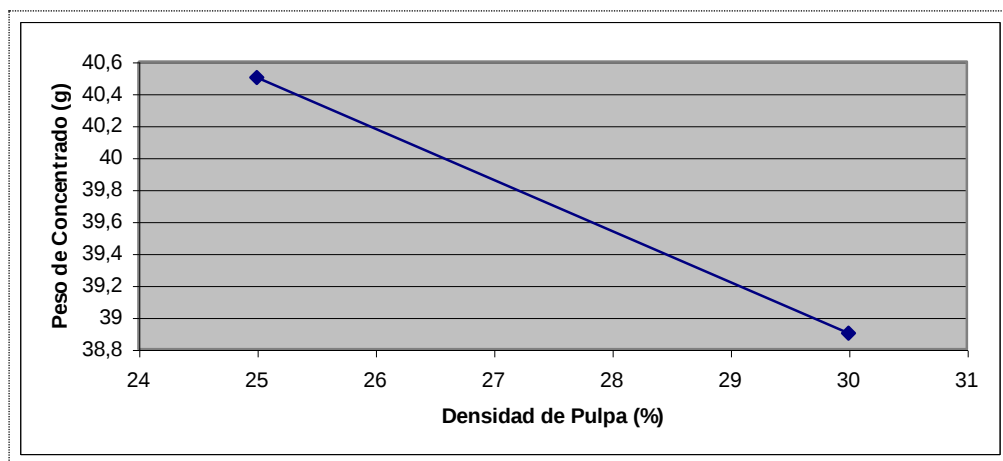


Fig. 42. Representación Gráfica del Efecto de la Densidad de Pulpa en el Peso de Concentrado.

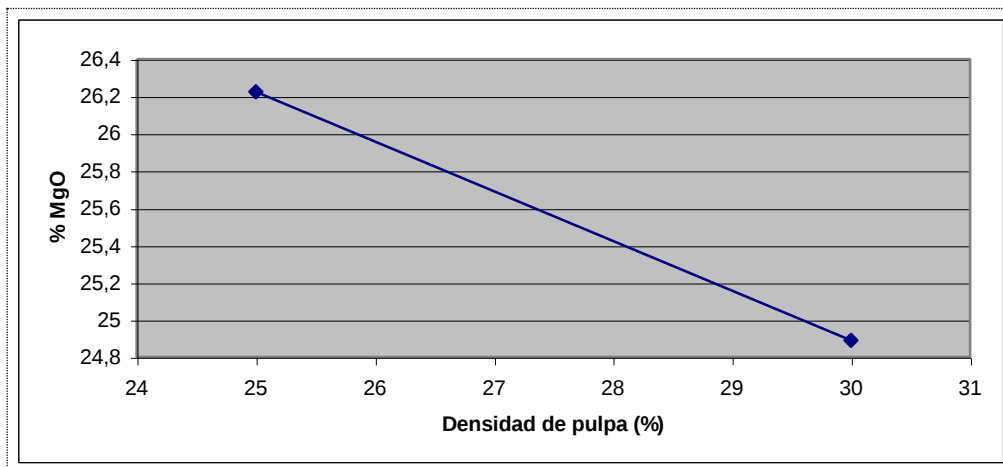


Fig. 43. Representación Gráfica del Efecto de la Densidad de Pulpa en el porcentaje de MgO.

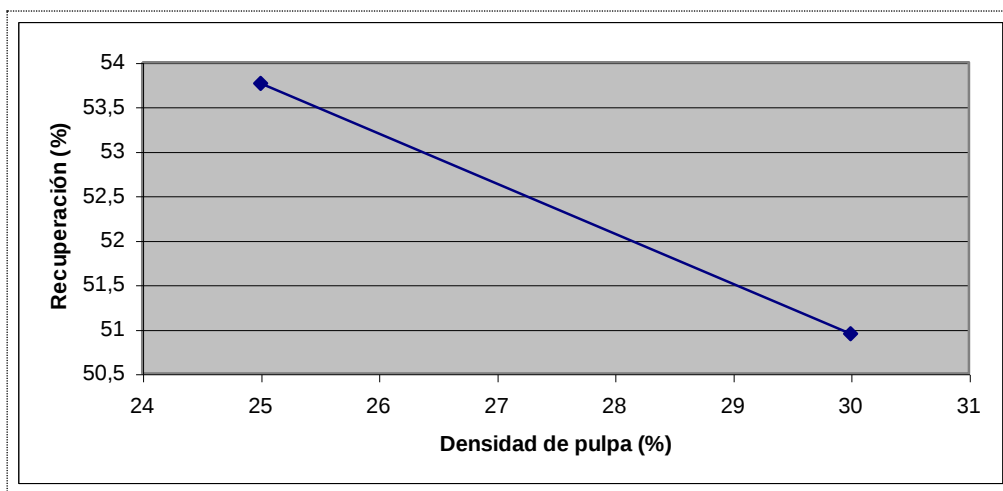


Fig. 44. Representación Gráfica del Efecto de la Densidad de Pulpa en el porcentaje de Recuperación.

5.4.2. Experimentos de Flotación

A partir de los parámetros establecidos de velocidad (rpm) en la máquina de flotación de 1100 y densidad de pulpa de 25 % se realizaron los ensayos de concentración siguiendo un diseño experimental 2^2 , donde las variables sometidas a cambio fueran las dosis de emulsión y de silicato de sodio, mientras las dosis de aceite de pino, ácido tánico, almidón y pH natural permanecieron constantes.

A continuación se muestran las condiciones experimentales de los ensayos de flotación a realizar (Tabla 14):

Ensayo	Variables	Reactivos
1	RPM = 1100	Emulsión = 1620 g/ton
	Pulpa = 25 %	Silicato de Sodio = 1250 g/ton
2	RPM = 1100	Emulsión = 1620 g/ton
	Pulpa = 25 %	Silicato de Sodio = 1880 g/ton
3	RPM = 1100	Emulsión = 2265 g/ton
	Pulpa = 25 %	Silicato de Sodio = 1250 g/ton
4	RPM = 1100	Emulsión = 2265 g/ton
	Pulpa = 25 %	Silicato de Sodio = 1880 g/ton

Tabla 14. Condiciones de los Ensayos de Flotación.

Se procedió a realizar al igual que en los ensayos exploratorios los experimentos por duplicado, cada uno con su respectivo concentrado y cola, escogiéndose los que presentaran mejores resultados por observación óptica con el microscopio.

Las dosis de los reactivos señalados fueron variados con la finalidad de buscar la combinación que diera mejores resultados de recuperación, peso de concentrado y porcentaje de óxido de magnesio en conjunto con las condiciones ya establecidas. Los

resultados de los experimentos se muestran en la tabla 15, mientras en la tabla 16 y las figuras 45 a 50, las combinaciones de las variables con los respectivos cálculos.

	Producto	Peso (g)		% MgO	% SiO ₂	R (%)	K
		Ensayo	Duplicado				
1	Cabeza	125	125	17,79	33,8	71,85	2,27
	Concentrado	38,8	38,2	28,97	28,52		
	Cola	82,3	82,1	8,97	34,38		
2	Cabeza	125	125	17,79	33,8	72,46	2,33
	Concentrado	38,3	38,05	30,04	25,51		
	Cola	84,8	83,5	8,58	36,59		
3	Cabeza	125	125	17,79	33,8	76,38	2,3
	Concentrado	41,9	42,1	31,25	24,93		
	Cola	81,3	81,5	7,44	35,25		
4	Cabeza	125	125	17,79	33,8	79,02	2,32
	Concentrado	43,5	43,8	32,69	23,32		
	Cola	79,5	79,05	6,55	40,43		

Tabla 15. Resultados de los Productos de los Ensayos Experimentales de Flotación.

	Peso del Concentrado (g)	R (%)	% MgO
E1	38,55	72,16	29,51
E2	42,7	77,7	31,97
S1	40,35	74,12	30,11
S2	40,9	75,74	31,37

Tabla 16. Reporte de Combinaciones de Variables.

Donde:

E1 : dosis de emulsión de 1620 g/ton.

E2 : dosis de emulsión de 2265 g /ton.

S1 : dosis de silicato de sodio de 1250 g/ton.

S2 : dosis de silicato de sodio de 1880 g/ton.

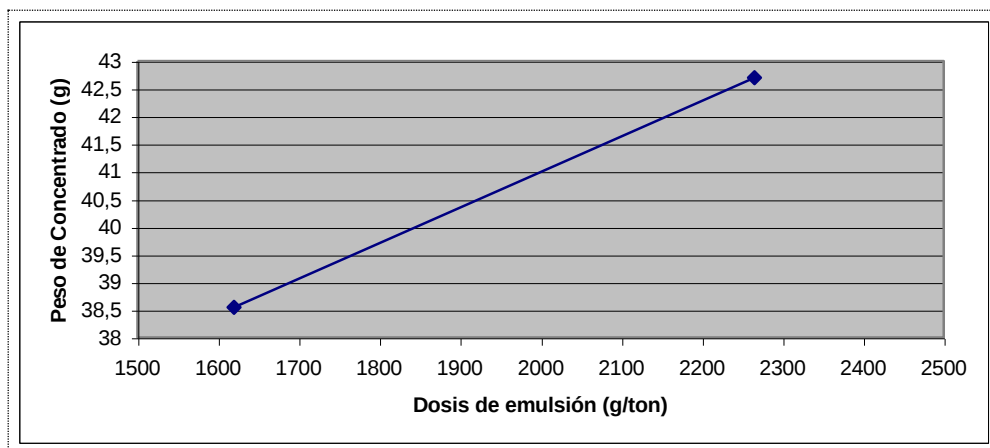


Figura 45. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Emulsión en el Peso de Concentrado.

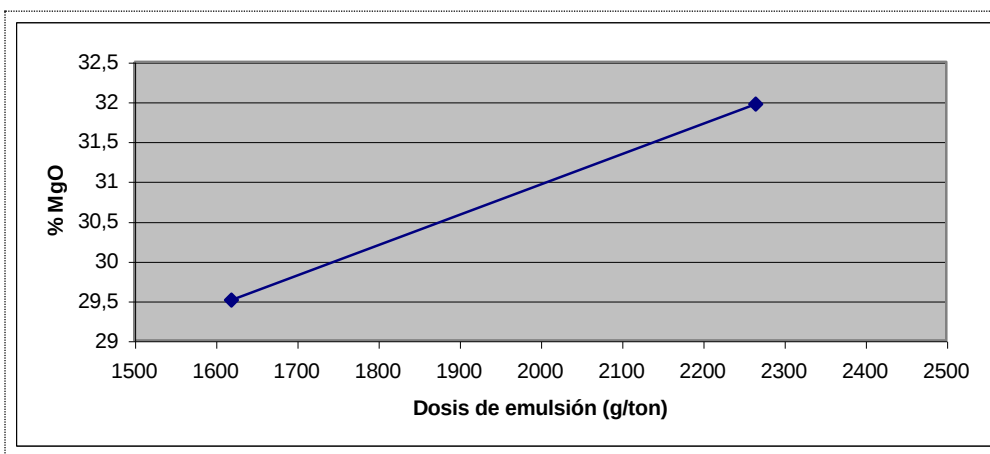


Figura 46. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Emulsión en el porcentaje de MgO.

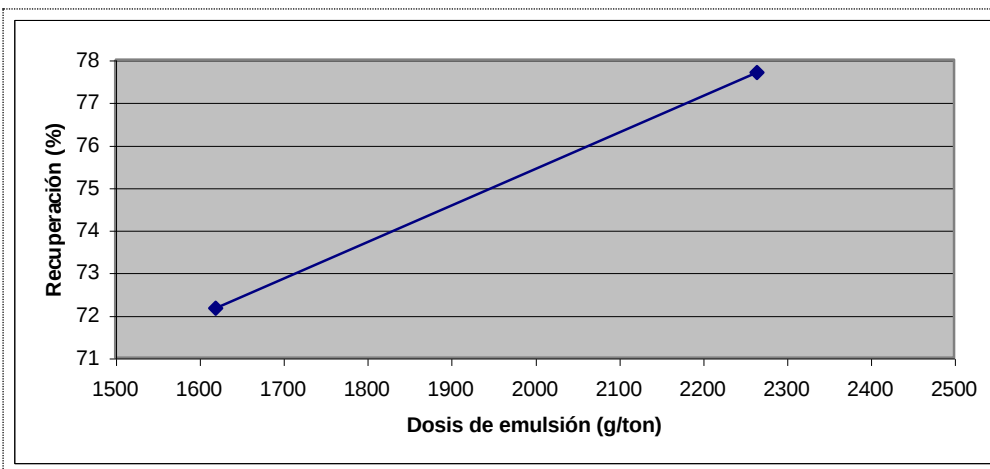


Figura 47. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Emulsión en el porcentaje de Recuperación

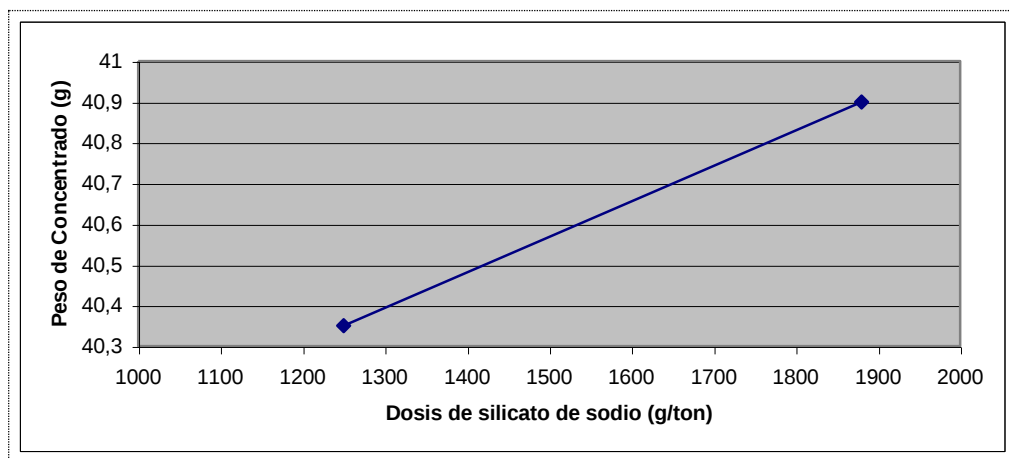


Figura 48. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Silicato en el Peso de Concentrado

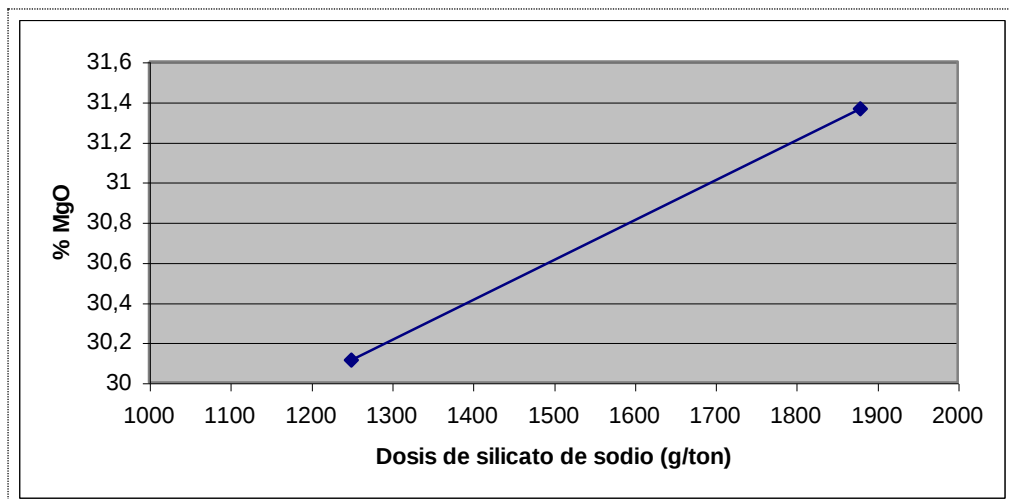


Figura 49. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Silicato en el porcentaje de MgO.

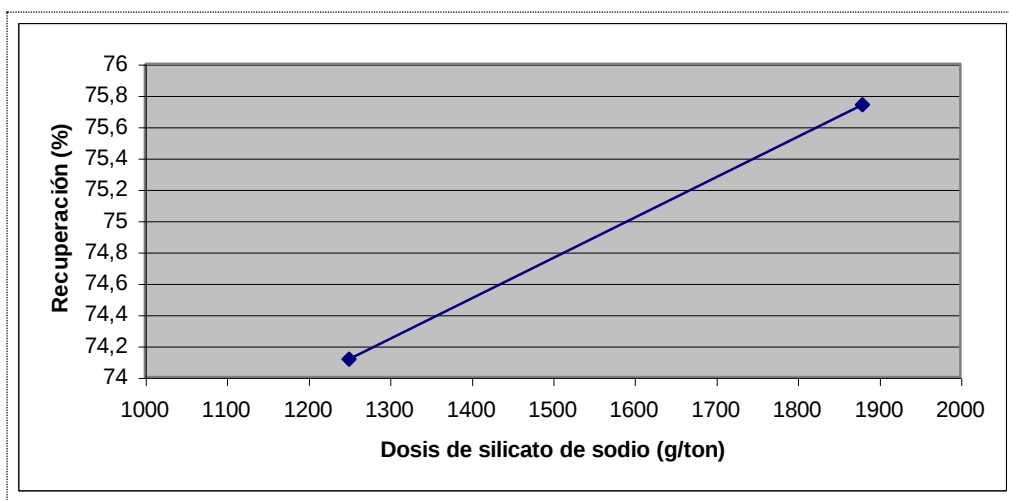


Figura 50. Representación Gráfica del Efecto de la Dosis de Silicato en la Recuperación.

5.5. Ensayos Exploratorios de Calcinación

Según la literatura investigada, los especialistas en beneficio y calcinación de minerales a nivel mundial, recomiendan tamaños de calcinación de magnesita en el rango comprendido de 1.3 cm ($\frac{1}{2}$ ”) a 15 cm (6”), al igual que para la caliza y la bauxita. La calcinación se realiza ya sea en hornos horizontales o verticales.

Del material proveniente del depósito de Cerrito Blanco se seleccionaron a mano los tamaños superiores a 2.54 cm hasta 5 cm (1” hasta 2”) aproximadamente (Figura 51), luego se procedió a un lavado en el tamizador para eliminar las arcillas bentoníticas que recubrían el material. Además se tamizó por vía húmeda un rango de tamaños inferiores a 2.54 cm. Por último se secó el material (Figura 52).



Fig. 51. Escogido a Mano.

Fig. 52. Tamizado de las Muestras.

Una limitante en este trabajo fue localizar un horno especializado como los usados en la industria que alcanzara la temperatura ideal descrita por la literatura (1500°C).

Debido a esto se procedió a realizar estudios exploratorios de calcinación en las instalaciones pertenecientes a INGEOMIN. Se utilizó un horno Thermolyne 1300 con una temperatura máxima de 1050°C . (Figura 53).



Fig. 53. Horno de Laboratorio para Calcinación.

De los tamaños seleccionados en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica se escogieron muestras representativas de un rango de tamaños entre malla 100 (0.15 mm) a 5 cm por duplicado, con pesos similares cada uno para realizar ensayos a temperatura constante con variación de tiempo. Las muestras se pesaron en una balanza Mettler AE 240 de 0.0001 g de apreciación y se colocaron en crisoles de arcilla refractaria (debido a que no reaccionan con el mineral), posteriormente se realizaron las pruebas de calcinación (Figuras 54 y 55).

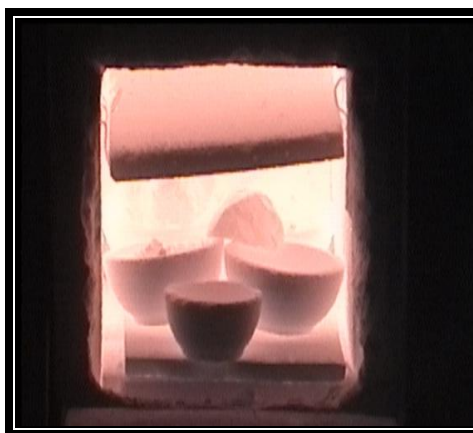


Fig. 54. Horno a 1050°C.



Fig.55. Muestra Calcinada.

Se calcinaron los distintos tamaños a una temperatura de 900° C a 2 horas y 4 horas respectivamente, para determinar la influencia del tiempo de calcinación sobre la pérdida al rojo, siendo este el parámetro que indica hasta cuando se puede extraer el CO₂ de la roca, (la pérdida al rojo representa casi en su totalidad la extracción del CO₂ del mineral, aunque también pueden existir elementos que se volatilicen a estas temperaturas). (Tablas 17 y 18). Cabe destacar que una magnesita teóricamente pura posee 47.6 % de MgO y 52.4 % de CO₂. Los resultados de estos ensayos fueron los siguientes:

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	2,50	1,68	0,82	32,80
1	1,50	1,00	0,50	33,33
2	9,50	6,63	2,87	30,21
3	13,80	9,50	4,30	31,16
4	29,00	18,10	10,90	37,58
5	82,90	49,90	33,00	39,81

Tabla 17. Calcinación a 900° C a 2 horas.

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	2,00	1,30	0,70	35,00
1	1,30	0,85	0,45	34,61
2	11,20	7,60	3,60	32,14
3	29,50	19,10	10,40	35,25
4	30,60	17,80	12,80	41,83
5	67,60	39,90	27,70	40,98

Tabla 18. Calcinación a 900° C a 4 horas.

Se observa para los diferentes tamaños en estudio que el tiempo de calcinación influye de manera directa con la pérdida al rojo de las muestras. A mayor tiempo de calcinación y a temperatura constante el porcentaje de pérdida al rojo

aumenta, aunque no en gran medida. En la gráfica mostrada a continuación se visualiza lo explicado anteriormente (Figura 56).

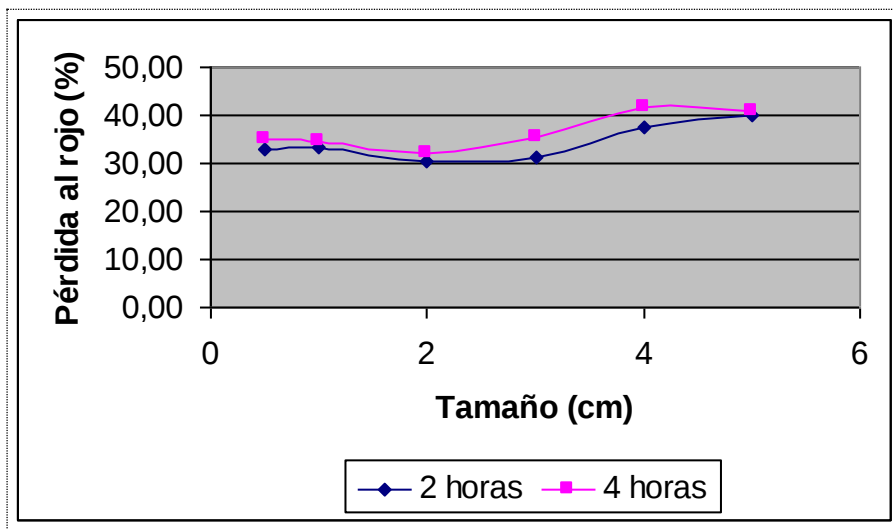


Fig. 56. Representación Gráfica de la Calcinación de diferentes tamaños del Mineral a 900° C y Tiempo Variable

De la misma forma, pero esta vez la temperatura fijada en el horno fue de 1050° C. Los resultados arrojados fueron los siguientes (Tablas 19 y 20):

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	0,90	0,60	0,30	33,33
1	2,40	1,70	0,70	29,16
2	7,70	5,30	2,40	31,16
3	16,50	11,90	4,60	27,80
4	52,30	30,50	21,80	41,68
5	83,50	49,80	33,70	40,36

Tabla 19. Calcinación a 1050° C a 2 horas

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	0,60	0,38	0,22	36,66
1	1,70	1,15	0,55	32,35
2	11,40	7,70	3,70	32,45
3	18,50	12,30	6,20	33,51
4	55,00	31,30	23,70	43,09
5	94,70	54,20	40,50	42,76

Tabla 20. Calcinación a 1050° C a 4 horas.

Se observa que hay un aumento de pérdida al rojo al mantener con más tiempo el material en el horno. Hay mayor pérdida al rojo en comparación a la temperatura de 900° C. En todos los tamaños se cumplió el aumento, excepto en 1 y 3 cm donde no se mantuvo la linealidad, pero dio resultados muy cercanos (Figura 57).

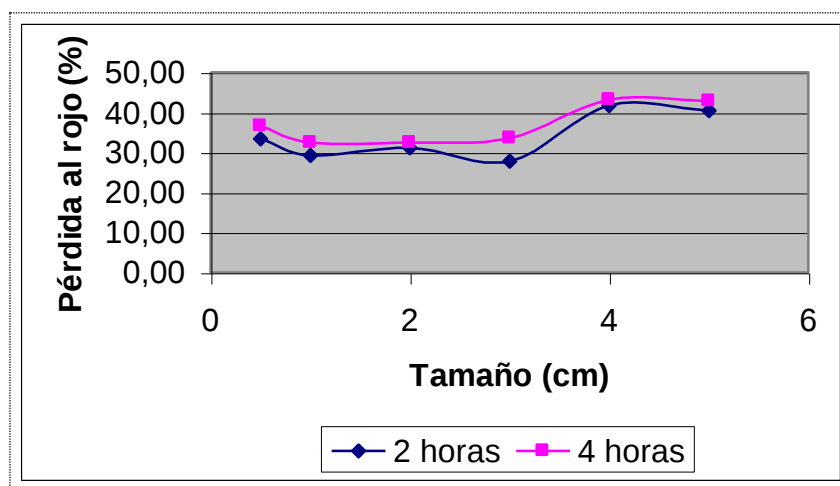


Fig. 57. Representación Gráfica de la Calcinación de diferentes tamaños del Mineral a 1050° C y Tiempo Variable.

En base a los resultados dados se puede determinar la temperatura y el tiempo ideal para realizar los experimentos definitivos de calcinación.

5.6. Ensayos Definitivos de Calcinación

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos exploratorios y la literatura consultada (Ver Figura 24) se pudo determinar como temperatura a utilizar la misma de 1050° C, por las razones explicadas anteriormente y el tiempo idóneo de calcinación de 5 horas y 30 minutos debido a que en este existe mayor pérdida al rojo.

Según la literatura consultada los tamaños más grandes de mineral a calcinar en la mayoría de los casos deben ser expuestos a un mayor tiempo en comparación a los tamaños inferiores, para poder abarcar en lo posible todo el material. A diferencia de los tamaños pequeños (menores a 2.54 cm) que poseen mayor superficie de ataque, requiriendo de menor tiempo de calcinación.

En este caso se fijó un tiempo de calcinación general para el rango de tamaños seleccionado. Se realizaron los experimentos por duplicado con la finalidad de elegir los de mayor pérdida al rojo para luego someterlos a análisis químicos. Los resultados fueron los siguientes (Tablas 21 y 22):

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	5,00	3,10	1,90	38,00
1	19,70	12,12	7,58	38,48
2	35,09	22,39	12,69	36,16
3	18,91	10,94	7,97	42,15
4	36,02	21,05	14,97	41,56
5	133,83	76,61	57,22	42,76

Tabla 21. Calcinación a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	5,00	3,16	1,84	36,80
1	19,73	11,89	7,84	39,74
2	35,45	20,94	14,51	40,93
3	11,29	6,62	4,67	41,36
4	36,48	20,38	16,10	44,13
5	117,93	68,14	49,79	42,22

Tabla 22. Calcinación a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.

Los resultados fueron muy similares en ambos casos, hubo mayor cantidad de pérdida al rojo debido al mayor tiempo de exposición de las muestras a la temperatura elegida. Se resumen los ensayos que dieron mejor resultado en la siguiente tabla para los diferentes tamaños (Tabla 23):

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,015	5,00	3,10	1,90	38,00
1	19,73	11,89	7,84	39,74
2	35,45	20,94	14,51	40,93
3	18,91	10,94	7,97	42,15
4	36,48	20,38	16,10	44,13
5	133,83	76,61	57,22	42,76

Tabla 23. Resultados de las Muestras a ser analizadas químicamente.

En la figura 58, se puede observar que la pérdida al rojo llega a un aparente máximo, debido a que los resultados aumentaron pero de una manera leve sin influir de forma apreciable en ciertos tamaños. Los tamaños de 0.015, 4 y 5 cm reportaron una pérdida al rojo similar a los ensayos exploratorios; los de 1, 2 y 3 cm registraron un considerable aumento.

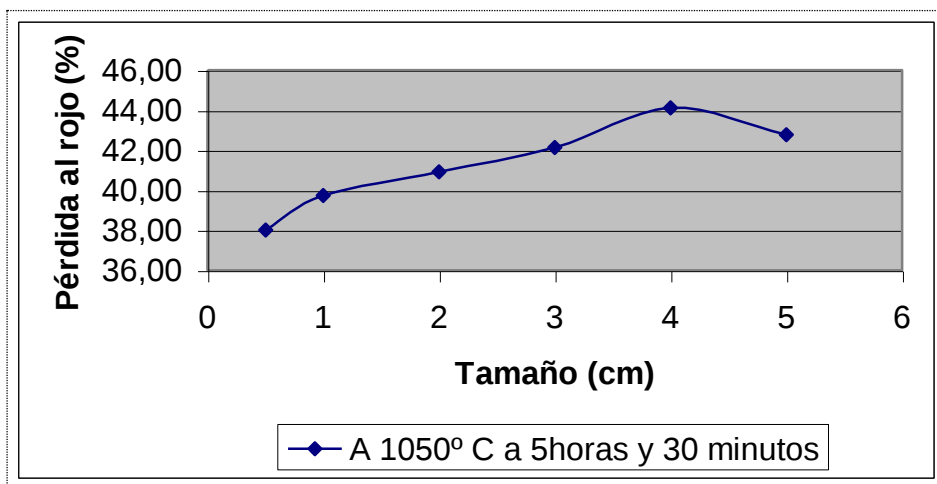


Fig. 58. Resultados de la Pérdida al Rojo en las Muestras a ser analizadas químicamente.

En los tres primeros tamaños la pérdida al rojo no alcanzó los niveles de los demás, debido a que las partículas eran varias distribuidas en los crisoles de una manera uniforme a comparación de los tamaños superiores que fueron calcinados uno a la vez. En el primer caso, la pérdida fue menor probablemente porque el calor producido por el horno no atacó las superficies de todas las partículas por la aglomeración de estas, la aglomeración impide que las partículas se calcinen uniformemente debido a que no todas exponen su superficie total.

Los resultados son satisfactorios debido a que se alcanza una alta pérdida al rojo. Como se dijo anteriormente una muestra de magnesita teóricamente pura posee un máximo de 47.6 % y 52.4 % de CO_2 , pero en este caso es sabido que las muestras provenientes del depósito de Cerrito Blanco en el Estado Cojedes no son puras conteniendo ciertos grados de impurezas, además que la calcinación de las distintas muestras seguramente no alcanzaron a cubrir todo el material hasta el núcleo.

Para confirmar el tiempo elegido (Tabla 24 y Figura 59) para los experimentos de calcinación se realizó una prueba con el rango de tamaños elegido a la misma temperatura, pero a un tiempo de 8 horas; con la finalidad de verificar si a este tiempo la pérdida al rojo era mayor o se mantenía similar.

Tamaño (cm)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida al rojo (g)	Pérdida al rojo (%)
0,5	5,00	3,12	1,88	37,60
1	19,83	11,70	8,13	40,99
2	35,21	20,78	14,43	40,98
3	17,50	10,13	7,37	42,11
4	36,34	20,70	15,64	43,04
5	121,53	69,50	52,03	42,81

Tabla 24. Calcinación a 1050° C a 8 horas.

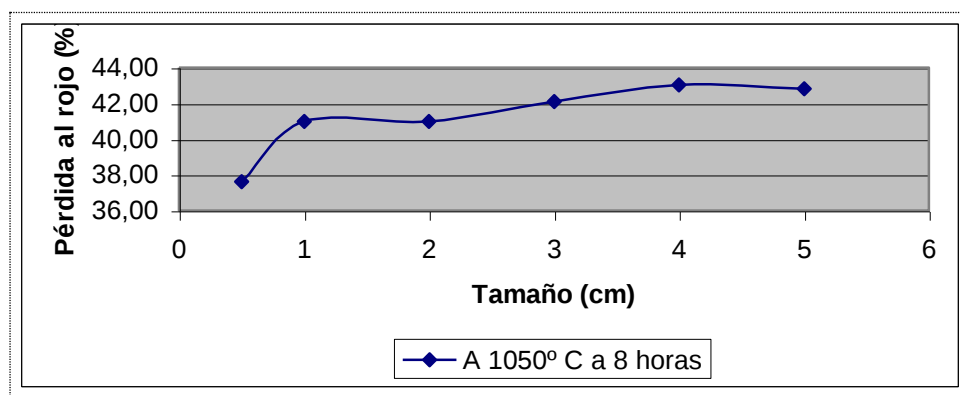


Fig. 59. Representación Gráfica de la Calcinación de diferentes tamaños del Mineral a 1050° C a 8 horas.

Como se puede observar los resultados son similares al tiempo elegido de 5 horas y 30 minutos. Esto quiere decir que el tiempo usado en los experimentos fue aceptable, donde la mayor cantidad de pérdida al rojo es ocasionada. Permite inferir que no es necesario aumentar aun más este factor para calcinar las muestras.

Los resultados de los análisis químicos de las muestras sometidas a calcinación con las variables de temperatura y tiempo dadas se presentan a continuación (Tabla 25 y Figura 60):

Tamaño (cm)	% MgO	% SiO ₂	% CaO
0,015	49,72	21,95	7,72
1	55,73	15,52	9,03
2	59,68	12,69	9,49
3	68,04	12,51	9,18
4	70,86	10,92	10,65
5	65,19	12,06	10,05

Tabla 25. Resultados de Análisis Químicos de Muestras Calcinadas a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.

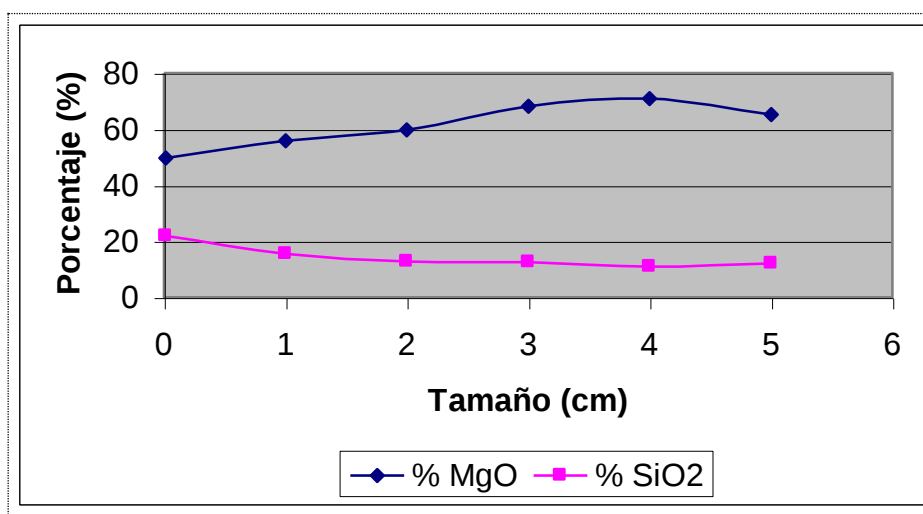


Figura 60. Resultados de Análisis Químicos de Muestras Calcinadas a 1050° C a 5 horas y 30 minutos.

5.7. Análisis de Resultados de los Experimentos de Flotación

Para identificar las condiciones más eficaces y precisas para la obtención de mejores resultados en el proceso de flotación, se tomaron en cuenta como es sabido, los valores de recuperación (R %) y contenido de óxido de magnesio en el concentrado, además del grado de concentración (K).

Los ensayos de concentración realizados arrojaron resultados satisfactorios, debido a las mayores recuperaciones y porcentajes de óxido de magnesio presentes, aumentándose aproximadamente en un 23 % el contenido de óxido de magnesio en los concentrados de los ensayos definitivos con respecto a los exploratorios.

En la tabla 15 se observa que el caso 4 presenta los mejores resultados, la recuperación es del 79,02 %, el contenido de óxido de magnesio en el concentrado es de 32,69 %. Posee el más bajo contenido de óxido de magnesio en la cola, el grado de concentración es de 2,32, o sea, se necesita por cada unidad en peso del concentrado, 2,32 unidades en peso del género para obtener dicho valor de óxido de magnesio en el producto (siendo este un valor aceptable), además presentó el contenido más bajo de sílice en el concentrado.

El primer caso presentó una recuperación de 71.85 %, el contenido de óxido de magnesio de 28.97 %, mientras el grado de concentración es el más bajo. En el segundo caso la recuperación y el porcentaje de MgO en el concentrado aumentaron a 72.46 % y 30.04 %, respectivamente, aunque el grado de concentración fue el más elevado. Por último, el tercer caso resultó en un mejor producto que los primeros dos casos, con un 76.38 % de recuperación y 31.25 % de MgO y un grado de concentración intermedio a estos.

El contenido de sílice promedio en el concentrado para los tres primeros casos fue de 26.32 %, mientras en la cola resultó de un 35.41 %. El cuarto caso resultó en un concentrado más limpio (aunque levemente) de 23.32 %, dejándose 40.43 % en la cola.

Las variables analizadas independientemente en las figuras 45 a 50, demuestran la influencia que estas tienen sobre los experimentos realizados para la debida concentración. En las figuras 45 a 47, se indica que a medida que se aumenta la dosis de la emulsión, el peso del concentrado aumenta, indicando que la acción colectora de esta es más efectiva; la recuperación aumenta en 5.54 % y el óxido de magnesio contenido en el concentrado aumenta en 2.46 %, denotando la sensibilidad de la emulsión sobre el producto.

La respuesta favorable por el cambio de dosis de la emulsión se debe a la efectiva unión que ejerce el colector aniónico (compuesto donde el ión repelente al agua es el anión) sobre la superficie del mineral a flotar, siendo los de este tipo comúnmente los más utilizados. El aumento en la dosis utilizada permitió que el colector se fijara sobre la partícula de mineral reduciendo su hidratación superficial, debido a la sustitución de las uniones entre los dipolos de agua y ésta por uniones más estables y más fuertes producidas por el reactivo (adsorción química). Ocasionando que la mayoría de la superficie del mineral desarrollara carácter hidrofóbico, disminuyendo la estabilidad de la capa hidratada hasta que las partículas de magnesita quedaran adheridas a la burbuja de aire para ser llevadas por la espuma hacia el producto concentrado.

En las figuras 48 a 50, el aumento de la dosis de silicato de sodio de 1250 g/ton hasta 1880 g/ton, permitió obtener resultados favorables aumentando el peso del concentrado, la recuperación mejoró en 1.62 % y el contenido de óxido de magnesio en el concentrado en 1.26 %. Se obtuvieron resultados de 36.67 % de sílice en las colas, aunque no es muy elevado es aceptable.

Por efecto del ión común SiO_2^- , el silicato de sodio es atraído por la red de los silicatos, pero esta acción es puramente física (adsorción física), debido a los resultados de sílice en los productos, que no son altamente selectivos.

Los valores calculados en la tabla 16, indican una mayor influencia sobre los resultados al variarse la dosis de emulsión; a diferencia de la dosis de silicato de sodio, pero en conjunto el aumento en estas, permite obtener un mejor producto.

De lo analizado anteriormente, se deduce que la condición más eficiente para beneficiar el óxido de magnesio es el caso 3 a pH natural con 2265 g/ton de emulsión como colector y 1880 g/ton de silicato de sodio como deprimente, además de los deprimentes secundarios como, el ácido tánico (480 g/ton), almidón (1120 g/ton) y el aceite de pino (740 g/ton) como espumante para reforzar el papel colector y espumante de la emulsión.

5.8. Análisis de Resultados de los Experimentos de Calcinación

Según los datos señalados en la tabla 25 y Figura 60, se observa que el porcentaje de óxido de magnesio mejora a medida que aumenta el tamaño del mineral de magnesita. Del tamaño de 0.015 cm hasta 3 cm se conserva esta tendencia, excepto en el tamaño de 4 cm que presenta un mayor contenido de óxido de magnesio con respecto a la de 5 cm. La causa de esta tendencia es debido a lo señalado en los experimentos de calcinación, donde influye de manera directa la forma en que estén distribuidos los tamaños del mineral de magnesita.

Para tamaños menores de 2 cm el agrupamiento de las partículas dentro del crisol no permite que el calor desprendido por el horno ataque en su totalidad la superficie de estas, por lo tanto, tampoco el núcleo de las mismas. Mientras que los tamaños mayores hasta 5 cm obtuvieron mayor porcentaje de óxido de magnesio debido a que fueron muestras representativas de cada tamaño calcinadas

individualmente por crisol, ofreciendo esta condición mayor superficie de ataque, llegando con mayor facilidad al núcleo (aunque el tamaño sea mayor) debido a fisuras que se ocasionaban en el mineral al ser sometida la muestra a tan altas temperaturas, filtrándose el calor por estas; contrariamente a los tamaños inferiores donde no se desarrollaban fisuras.

El porcentaje de sílice aumentó al disminuir el tamaño. Los tamaños inferiores a partir de 3 cm resultaron con un aumento proporcional de 12,51 % hasta 21,95 % en el tamaño promedio de 0,015 cm; mientras que el tamaño de 4 cm presentó el porcentaje de sílice más baja (10,92 %) y el de 5 cm tuvo un ligero aumento hasta 12,06 %, pero siendo más bajo que los tamaños inferiores desde 3 cm. Esta tendencia se debe posiblemente a que a medida que el tamaño disminuye, la sílice presente como incrustaciones en la superficie del mineral (además de internamente, que a simple vista no es observado) que es liberada por los tamaños superiores mientras es tamizado en húmedo (para su lavado) es contenida en este rango de tamaños menor, ocasionando el aumento mencionado anteriormente.

Tomando en cuenta el valor de CaO obtenido en los análisis químicos, la relación de CaO:SiO₂ promedio es de 2:3. Mientras que en el mercado se recomienda una relación de 2:1 ó 3:1, hasta mayor.

Las densidades de las muestras calcinadas disminuyeron, debido lógicamente a la pérdida en peso ocasionado por el CO₂ liberado (pérdida al rojo). Lo cual es perjudicial para un producto final ya que se busca es aumentar esta. En este caso, no se pudo realizar este ensayo ya que no se contaba con esta tecnología, que consiste en triturar la muestra calcinada, someterla en una cámara presurizada (sinterización) y calcinarla nuevamente, esta vez a temperaturas mayores de 1500° C, siendo este el proceso para obtener la “Magnesita Calcinada a Muerte”.

CONCLUSIONES

- Las muestras analizadas presentes en el área de Cerrito Blanco, indican un contenido en porcentaje de óxido de magnesio de 15.23 y sílice de 35.59. La humedad fue de 17.89 %, presentando una granulometría relativamente gruesa a partir de la malla 16, donde hay un retenido de 54.36 %, mientras que entre la malla 3/4'', 1/2'' y # 3 se acumula un 34.80 % del total. Hubo un 17.3 % pasante de la malla 200 presentándose principalmente arcillas bentoníticas y poca cantidad de magnesita.
- La magnesita se presenta totalmente liberada a partir de la malla 6, lo que favorece el proceso de beneficio mineral. El tamaño de grano para concentrar por medio de flotación es el pasante de malla 100 y retenido de malla 150 debido a los aceptables resultados dados en los ensayos, en comparación a la granulometría indicada por la literatura. El estudio de moliendabilidad indica la gran cantidad de finos presentes (pasante malla 200) aproximadamente 60 % del total para preparar el material para los ensayos a el rango de tamaños indicado.
- El lavado del material mejoró los porcentajes de MgO y SiO₂ en 17.79 y 33.8 respectivamente, optimizando la alimentación de la flotación.
- El proceso de flotación resulta efectivo debido a que se recogen gran cantidad de concentrados de óxido de magnesio, un máximo de 32.69 % y en las colas solamente queda 6.55 %, representando una recuperación de 79.02 % y un grado de concentración de 2.32. La sílice presente en el concentrado es de 23.32 % y en la cola de 40.43, destacándose la mejora del concentrado al bajar la sílice de un valor inicial de 33.8.
- Las condiciones definitivas de concentración son: pH natural, velocidad del rotor del equipo de 1100 rpm, densidad de pulpa de 25 % en sólidos, dosis de 2265

g/ton de Emulsión (Aero 845 – Fuel Oil) como colector y espumante, 1880 g/ton de silicato de sodio, 480 g/ton de ácido tánico preparado al 5 %, 1120 g/ton de almidón al 5 % como deprimentes y 740 g/ton de aceite de pino como espumante para reforzar la acción de la emulsión.

- Las dosis empleadas de todos los reactivos fueron superiores a los datos teóricos, causado principalmente por el tipo de material tratado.
- La dosis de emulsión y silicato de sodio aplicada en los experimentos de concentración reflejan la importancia en la obtención de concentrados de magnesita con menos cantidad de sílice, y a una mayor recuperación. La aplicación de estos influye directamente en el producto final.
- El concentrado obtenido en la flotación permite ser utilizado en la industria de la construcción, caucho, cerámica.
- La muestra representativa de magnesita (libre de arcillas esmectíticas), indicó un porcentaje de óxido de magnesio de 39.59, 15.69 de sílice y 9.84 de CaO. El material seleccionado a mano presentó una granulometría promedio gruesa de tamaños entre 1 cm a 6 cm, llegando hasta un máximo de 12 cm. El material grueso representó el 25 % del total extraído del depósito.
- La calcinación realizada a distintos tamaños del mineral indicaron la favorable respuesta para los tamaños de 3 a 5 cm, destacando con mayor contenido de MgO y SiO₂ (70.86 y 10.92, respectivamente) el tamaño de 4 cm, mientras que los de 3 y 5 cm presentaron un leve decrecimiento de MgO y aumento de SiO₂.
- Los tamaños menores de 3 cm tendieron a decrecer el MgO y aumentar la SiO₂.

- La relación de $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ es de 2:3, lo cual no cumple con la mayoría de las especificaciones del mercado de los refractarios, aunque puede ser utilizado como material secundario para combinarse con productos de mejor calidad, obteniéndose productos intermedios.
- La densidad aparente de las muestras calcinadas disminuyó por la pérdida al rojo, siendo este un factor primordial para ciertos mercados. No se mejoró la densidad debido a que no se realizó el proceso de sinterización de las muestras calcinadas.
- Los valores resultantes de los experimentos de calcinación permiten indicar que el material proveniente del área de Cerrito Blanco puede ser utilizado para los sectores de alimentos concentrados para animales, fertilizantes, cerámica, construcción, caucho, electrodos con una granulometría de 20 a 200 mallas.
- La magnesita no cumple con los requisitos en el sector de los refractarios.
- La magnesita (sin ser calcinada), puede servir para el sector de la cerámica y la construcción debido a su alto contenido de 82.8 % como carbonato.
- Las reservas totales se aproximan a 2.045.145 de toneladas de magnesita que pudieran ser explotadas a cielo abierto para abastecer el consumo nacional, principalmente la Región Central.

RECOMENDACIONES

- Deben continuarse estudios más profundos sobre la aplicación de este método de concentración a través de la implementación de pruebas en una planta piloto para la optimización del proceso, que permita definir la factibilidad técnica de las operaciones de preparación del óxido de magnesio en un producto comercial concentrado.
- La magnesita a flotar debe ser reducida al tamaño conveniente preferiblemente en un molino de barras o de bolas en circuito cerrado con un clasificador.
- Realizar ensayos de flotación variando el rango de tamaños y la densidad de la pulpa; así como las dosis de los reactivos, para optimizar el uso de estos, buscando siempre la mejor combinación para obtener concentrados más puros y recuperaciones mayores. Al conseguirse la combinación de variables más beneficiosa se deberían cumplir los siguientes pasos para obtener un producto comercial de excelencia; primeramente realizar la flotación para reducir en lo posible el material no deseado, molienda, briquetas y sinterización en un horno vertical a altas temperaturas ($>1500^{\circ}\text{C}$).
- El proceso de flotación se puede llevar a cabo en dos etapas: los silicatos se flotan primero y posteriormente se flota la magnesita de los minerales calcáreos. La magnesita concentrada es espesada, filtrada y secada para enviarla a la planta de calcinación.
- La magnesita de tamaños gruesos puede ser triturada a tamaños reducidos para flotar los silicatos, se calcina, se muele, briquetea y sinteriza en un horno vertical para verificar si el porcentaje de óxido de magnesio sube y los silicatos bajan a las especificaciones exigidas en el mercado para la industria de los refractarios, justificando así tan costoso proceso.

- La magnesita puede ser separada por medio denso; consistiendo el proceso en separar lo deseado de los minerales más ligeros como dolomita y minerales silíceos en un cono en medio ferrosilíceo. La magnesita es triturada, tamizada y almacenada en tolvas, para enviarlas a la planta de calcinación o a la planta de flotación para mejor tratamiento.
- Debido a los altos porcentajes presentes de sílice en las colas de ciertos ensayos realizados, puede ser factible concentrar ésta, obteniéndose un segundo producto, a parte del concentrado de óxido de magnesio.
- Para los ensayos de calcinación como para los ensayos de flotación el tratamiento mineral recomendable comprendería un desenlodado y tamizado en dos principales fracciones. La pasante de 2" retenido 1" se separaría del resto de las fracciones por un tambor y trómel desenlodador diseñado para tal fin, donde habría una recuperación muy alta de la magnesita en este rango de tamaños. La fracción restante de - 1" hasta + 200 mallas de someterse a tratamiento de separación por flotación o por medio denso.
- Deben ejecutarse estudios de calcinación en hornos industriales para obtener resultados más confiables, debido a todas las variables que allí se manejan. Es viable realizar pruebas a diferentes tamaños del material como los realizados en este estudio, con la finalidad de verificar estos ensayos y buscar optimizar el proceso.
- Para que sea completo el estudio de calcinación en caso de empresas interesadas, los pasos a seguir serían los siguientes: trituración de la mena a los tamaños aptos para los hornos, escogido a mano de los pedazos de magnesita, calcinación en un horno horizontal o vertical de 1000° C a 1200° C, moler la magnesita calcinada hasta polvo, pasar este polvo a briquetas y sinterizar en un horno vertical a 1500° C como temperatura mínima ideal, lo que garantizaría mejores resultados, tanto

en el contenido de óxido de magnesio, relación cal : sílice, y la densidad; el producto final sería la “magnesita calcinada a muerte” con mayor valor económico en el mercado debido a el uso en el sector de los refractarios y otras industrias.

- En caso de planificar y desarrollar una minería a pequeña escala, sin excesivos costos, para la obtención de óxido de magnesio, como lo hacen en ciertos países industrializados; se extrae el material (sin la necesidad de explosivos), pueden ser elegidos los trozos de magnesita por un apartado o escogido, los trozos grandes se someten a un estrío, se transportan a los hornos y se calcinan, sin necesidad de consumo de agua y gastos de energía en trituración primaria y lavado, aunque al final del proceso es recomendable tener una machacadora de mandíbulas para llevar el material a los tamaños exigidos en el mercado.
- Se hace necesario el uso de un horno vertical en el caso de partículas de tamaños comprendidos entre 5 a 6 cm. Si la alimentación es de un rango amplio de tamaños, es recomendable cribar y calcinar un reducido rango al mismo tiempo, o cargar los diferentes tamaños en capas.
- Se deben usar hornos rotatorios en caso de alimentaciones más finas, correspondientes de 2 a 5 cm. Si la alimentación es de un rango amplio ocurre la segregación de los finos hacia el centro del horno mientras los gruesos quedan a los bordes, por lo tanto, habría sobrecalcinados en los tamaños gruesos y los finos no serían calcinados totalmente hasta el núcleo. El horno debería ser de varias decenas de metros de largo, con una pendiente aproximada de 3 %, velocidad de 10 a 15 revoluciones/hora. Uno de los mejores medios de calefacción es el coque y el fuel oil.

- Para una minería a pequeña escala se recomiendan usar hornos verticales y para minería a mediana escala se requiere de hornos rotatorios debido a su gran capacidad.

BIBLIOGRAFÍA

- BATEMAN, A. (1957). Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico. 3^{ra} Edición. Ediciones Omega. Barcelona. 975 pp.
- BELLIZIA, A. (1967). Rocas Ultrabásicas en el Sistema Montañoso del Caribe y Minerales Asociados. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Geológico, Volumen VIII (16). 159 – 199 pp.
- BRAY, J. (1962). Metalurgia Extractiva de los Metales No Férreos. 1^{ra} Edición. Ediciones Interciencia. Madrid. 571 pp.
- BRUHNS, W. (1964). Petrografía. 4^{ta} Edición. Editorial UTEHA. México. 125 pp.
- CLARKE, G. (1992). “Magnesia around the world: Hard times in soft markets”. Industrial Minerals, (United States). April 1992. 45 – 77 pp.
- DANA, J. (1960). Manual de Mineralogía. 2^{da} Edición. Editorial Reverté. Barcelona. 600 pp.
- DEER, HAWRE & ZUSSMAN. (1976). Rock Forming Minerals. 1st Edition. Vol. III. Longman Publishing Group. London. 270 pp.
- ESTRADA, D. (2001). “Beneficio Mineral de la Mica presente en la Cantera Cura, San Joaquín, Estado Carabobo”. Departamento de Geología, Universidad Central de Venezuela. T.E.G. 154 pp. Inédito.
- HOWARD, H. (1992). SME Mining Engineering Handbook. 2th Edition. Vol. 2. S.M.M.E. Littleton, Colorado. 2260 pp.

- HURLBUT, D. (1956). Manual de Mineralogía. 16^{ta} Edición. Editorial Reverté. Barcelona. 524 pp.
- INDUSTRIAL MINERALS. (1986). “Restructure and Rationalised: The World’s Major Refractory Produces”. United States. September, 45 – 67 pp.
- KELLY & SPOTTISWOOD (1990). “Introducción al Procesamiento de Minerales”. 1^{ra} Edición. Editorial Limusa. México. 530 pp.
- KENDALL, T. (1996). “Refractory magnesia: Hot topics reviewed”. Industrial Minerals, (United States). September 1996. 65 – 73 pp.
- MACKENZIE, D. (1966). La Peridotita de Tinaquillo. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Geológico, Volumen II (3). 761 – 826 pp.
- MACKENZIE, D. (1966). Geología de la Región Norcentral de Cojedes. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Geológico, Volumen VIII. (15). 3 – 72 pp.
- MARTÍN & BELLIZIA. (1967). Peridotita Serpentinizada de Cabimba y Yacimientos de Talco Asociado. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Geológico, Volumen VIII (16). 273 – 288 pp.
- MENÉNDEZ, A. (1965). Geología del Área de Tinaquillo, Centro Norte del Estado Cojedes. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Geológico, Volumen VI (12). 417 – 543.
- MINISTERIO DE SANIDAD Y CONSUMO. (1997). Real Farmacopea Española. 1^{ra} Edición. Editorial Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado. 1949 pp.

- PANTIN, J. (1967). Geología y Minería, Depósitos de Magnesita, Isla de Margarita, Venezuela. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Informativo Volumen 10 (12). 75 – 79 pp.
- PELÁEZ, E. (1980). Preparación y Concentración de Minerales. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 426 pp. Inédito.
- PERKIN-ELMER. (1978). Manual de Espectroscopia de Absorción Atómica. 1^{era} Edición. Editorial McGraw & Hill. 182 pp.
- RHEAD, E. (1957). Metalurgia. 3^{ra} Edición. Editorial Labor. Barcelona. 418 pp.
- RISQUEZ, F. (1939). Farmacopea Venezolana. 4^{ta} Edición. Tipografía Americana. Caracas. 651 pp.
- RODRÍGUEZ, S. (1989). Yacimientos de Minerales Industriales de Venezuela. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Boletín Geológico, Volumen XVII (30). 79 pp.
- RODRÍGUEZ, S. (1994). Factibilidad de producir Óxido de Magnesio Comercial utilizando Magnesita del Estado Cojedes. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Informe Interno. 63 pp.
- RODRÍGUEZ & VELAZCO. (1987). Estudio Geoeconómico del Complejo Ultrabásico de Tinaquillo, Estado Cojedes. Parte I, Área de Casupo – Hato Tamanaco. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Informe Interno. 37 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.

SIMS, C. (1997). “Caustic magnesia: An industry divided”. Industrial Minerals, (United States). July 1997. 21 – 33 pp.

TAGGART, A. (1956). Handbook of Mineral Dressing. 6^{ta} Edición. John Wiley & Sons, Inc. New York. 735 pp.

TAGGART, A. (1966). Elementos de Preparación de Minerales. 1^{ra} Edición. Ediciones Interciencias. Madrid. España. 648 pp.

The Possehl Group. (1998). Specialist in Minerals, Ores, and Chemical Products. Raw Materials for the Refractory Industry. Germany. 28 pp.

USP 24 NF 19. (2000). The United States Pharmacopeia. The National Formulary National Publishing. Philadelphia. 2569 pp.

WEB SITES:

www.cyttec.com

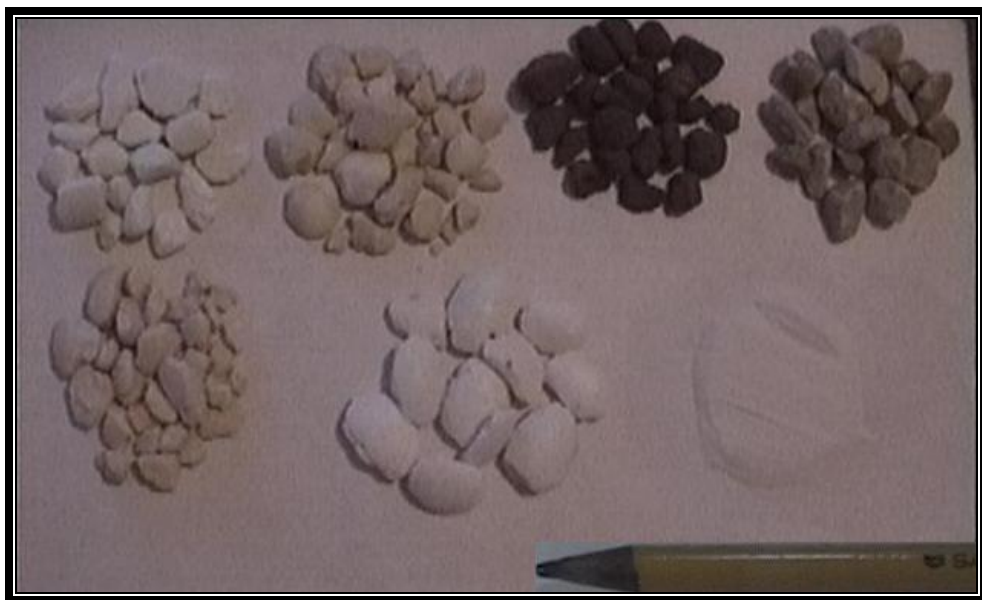
www.martinmarietta.com

www.pdv.com

www.possehl.com

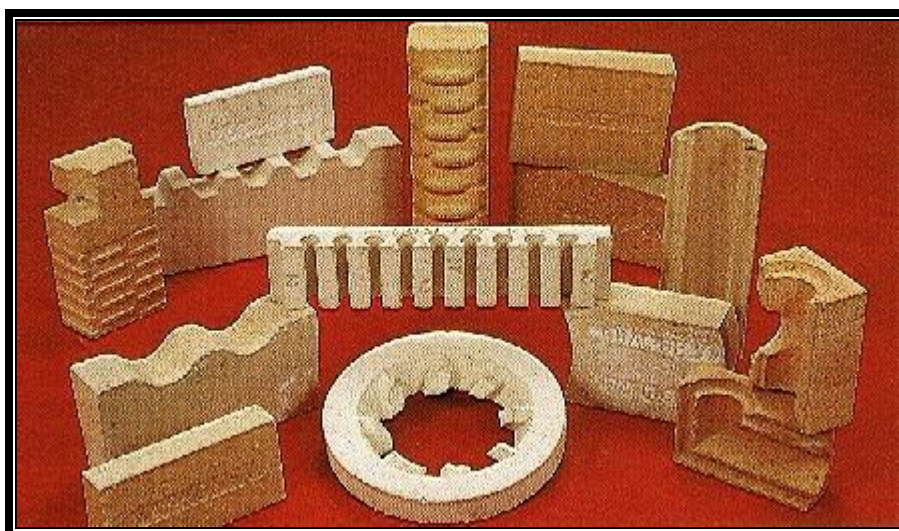
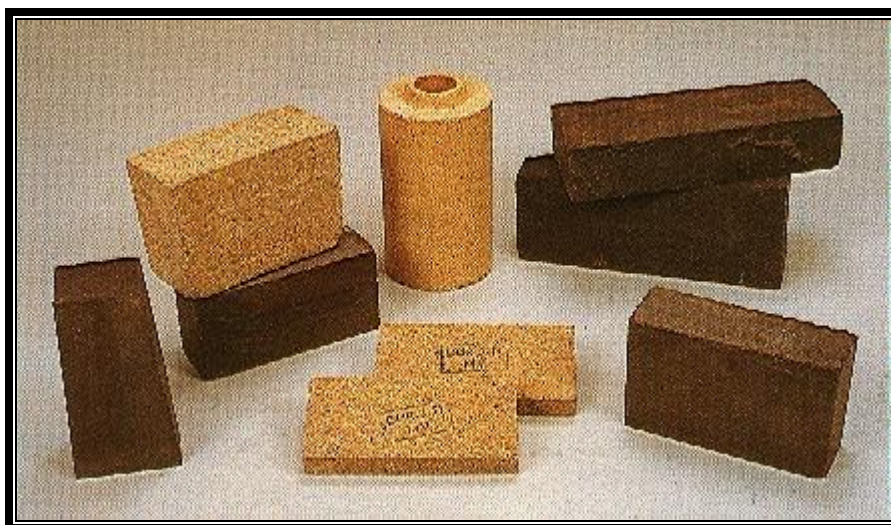
ANEXO 1

Tipos de Magnesita a Nivel Mundial



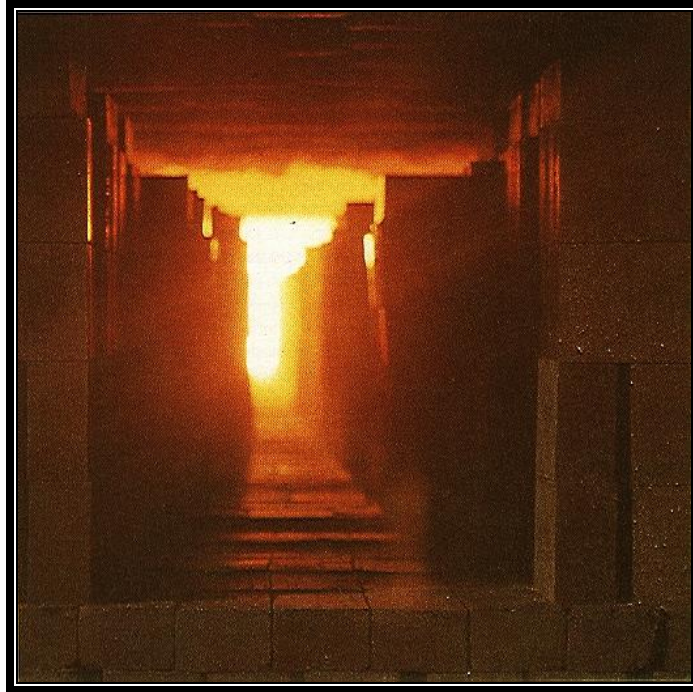
ANEXO 2

Magnesita para Ladrillos y Piezas Refractarias



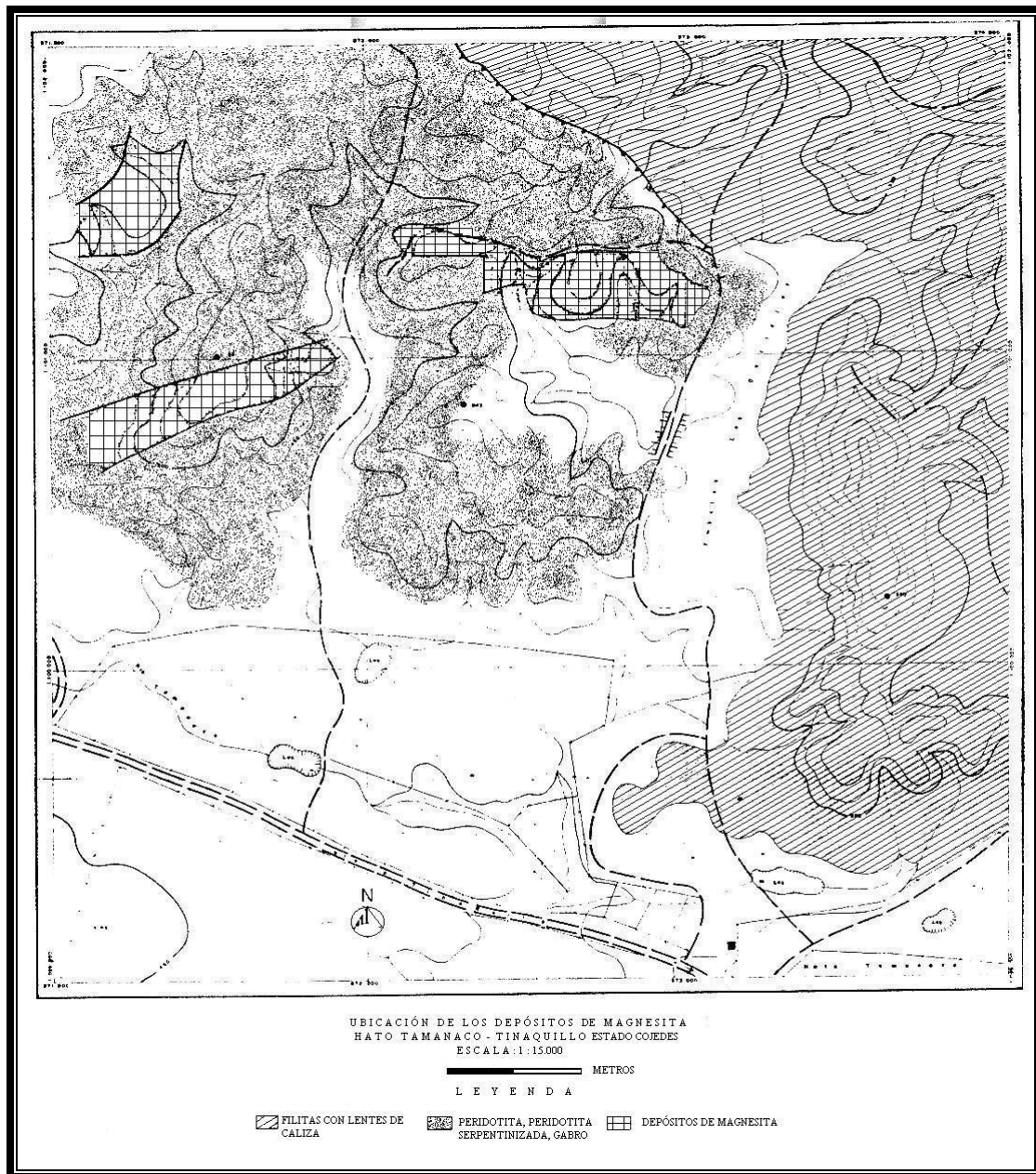
ANEXO 3

Ladrillos Refractarios hechos con Magnesita para Altos Hornos



ANEXO 4

Mapa de Ubicación de Cerrito Blanco, en Tinaquillo, Estado Cojedes



ANEXO 5

Productores de Magnesita a Nivel Mundial

Empresa Productora	País	CaO/SiO2	MgO	CaO	SiO2	Densidad (g/cm3)
H-W Ludington 96 ^a	USA	3.0	96.6	2.30	0.70	3.42
H-W Ludington 98	USA	1.0	98.0	0.70	0.60	3.32
Martin Marietta 98	USA	3.0	97.0	2.20	0.70	3.42
Peñoles Química del Rey	México	4.0	98.4	1.00	0.20	3.33
Premier Periclase	Irlanda	4.0	96.8	2.30	0.60	3.44
Steetley Hartlepool	Reino Unido	5.0	97.0	1.90	0.40	3.43
Magnesia Int'l	Holanda	3.8	98.5	0.65	0.17	3.44
Sardamag	Italia	4.0	96.8	2.30	0.55	3.42
Cogema	Italia	4.0	97.0	2.20	0.50	3.40
Ube 98	Japón	3.0	98.3	0.80	0.80	3.40
Dead Sea Periclase	Israel	3.0	99.4	0.30	0.08	3.45
Magnnohrom YU 5	Yugoslavia	2.9	99.3	0.40	0.15	3.37

Magnesita Sintética de Agua de Mar o Salmuera

Empresa Productora	País	CaO/SiO2	MgO	CaO	SiO2	Densidad (g/cm3)
FIMISCO E21A	Grecia	1.69	95.7	2.20	1.30	3.45
FIMISCO Magflot A	Grecia	4.00	96.0	2.40	0.60	3.40
Kumas	Turquía	1.20	96.6	1.50	1.25	3.40
Magnohrom MKI	Yugoslavia	1.20	95.5	2.00	1.70	3.35
HCI	Australia	4.00	98.0	2.00	0.50	3.43
Salem	India	0.40	92.0	2.00	5.50	3.30

Magnesita Criptocristalina o de Vetas

Empresa Productora	País	CaO/SiO2	MgO	CaO	SiO2	Densidad (g/cm3)
Breitnau B91	Austria	4.80	91.0	2.40	0.50	3.30
Radex S.L.	Austria	3.00	90.0	3.00	1.00	3.35
98	China	1.30	98.0	0.80	0.60	3.40
97 C/S	China	2.00	97.2	1.40	0.70	3.40
Jelsova S	Checoslovaquia	3.00	88.0	2.70	0.90	3.25
Magnesita M20	Brasil	0.60	94.5	0.80	1.30	3.35
Floatation	Corea del Norte	1.30	95.1	1.60	1.20	3.25
Dimag M	España	3.60	92.9	2.95	0.80	3.25
Nepal Orind Super	Nepal	0.20	95.0	0.50	2.10	3.35

Magnesita Cristalina o Natural

Empresa Productora	País	MgO	CaO	SiO2	Densidad (g/cm3)
Dynamit Nobel	Alemania	96.3	1.50	2.0	2.30
Pechiney Electrometallurgie	Francia	94/97	1.50 - 2.50	2.0 - 4.0	2.30 - 2.50
Mussel Shoals	USA	94/96	0.80 - 2.10	3.0 - 4.0	2.38
C-E Minerals	USA	93.0	1.50	5.5	2.10
OEAMAG	Austria	96-98	0.80	0.20 - 2.0	3.45
Universal	Reino Unido	97.0	2.45	0.45	3.60
Tateho	Japón	99.9	0.05	0.05	3.59

Magnesita Fundida

ANEXO 6

Informe Mineralógico



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
INSTITUTO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

OFICIO

**INFORME MINERALÓGICO DE UNA (1) MUESTRA
PULVERULENTO, PROCEDENTE DE LA ZONA DE
CERRITO BLANCO, ESTADO COJEDES, ENVIADA POR EL
DR. SIMÓN RODRÍGUEZ. INGEOMIN.-**

CODIGO:

FECHA: 17/12/2001

Ref: SOL. # 2001-071

La muestra fue secada, homogeneizada y cuarteada hasta obtener una fracción representativa para el análisis de muestra total. La composición mineralógica cristalina de la muestra se determinó por difracción de rayos X. La abundancia mineral se estimó en base a la intensidad de los picos característicos de los minerales presentes y a su comportamiento específico ante el fenómeno de difracción.

A continuación se indican los resultados obtenidos.

MUESTRA MT-01

Material pulverulento de color beige, constituida por abundantes cantidades de magnesita y dolomita y muy escasas cantidades de serpentina, esmectita y probable muscovita.

ESCALA DE ABUNDANCIA MINERAL

Muy Abundante (> 65%); Abundante (64-35%); Menor Proporción (34-15%); Escaso (14-5%); Muy Escaso (4-1%) y Trazas (< 1%).


Ing. Geol. Oswaldo Cisneros G.
Jefe de la Sección de Mineralogía

CONFORME:


Rosario Bajo de Osuna
Gerente de Investigaciones Geológicas
y de Recursos Minerales



Calle el Rodeo, Lomas de San Rafael, Urb. La Alta Florida
Telf.: 730/66/01 - 12/39 - 76/43 - 731/80/11 - 81/22
FAX: (02) 731/80/22

ANEXO 7

Difractograma de la Muestra Cabeza de Flotación

