



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA MINERA Y DE RECURSOS ENERGÉTICOS

TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE MICAS, SUBPRODUCTO DE ARENAS FELDESPÁTICAS

León, marzo de 2016

Autor: Esteban Salgado Prieto

Tutor: Daniel Vázquez Silva

El presente proyecto ha sido realizado por D. Esteban Salgado Prieto, alumno/a de la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León para la obtención del título de Máster en Ingeniería Minera y de Recursos Energéticos.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por D. Daniel Vázquez Silva, profesor/a del Máster Universitario en Ingeniería Minera y de Recursos Energéticos.

Visto Bueno

Fdo.: D. Esteban Salgado Prieto
El autor del Trabajo Fin de Máster

Fdo.: D. Daniel Vázquez Silva
El Tutor del Trabajo Fin de Máster

RESUMEN

La necesidad en el aumento de la calidad en la demanda, obliga a incrementar las concentraciones de mica moscovita en los concentrados, por ello surge la necesidad de estudiar cómo obtener mayores rendimientos en plantas de tratamiento y a precios más competitivos. Es por esta razón por la que se desarrolla el presente proyecto titulado "*Estudio técnico-económico de micas, subproducto de arenas feldespáticas*", se ha contado con el apoyo del software MODSIM, los equipo de laboratorio, hojas de cálculo y microscopio electrónico.

ABSTRACT

The need for increased quality demand requires increasing concentrations of muscovite mica in concentrates, therefore arises the need to study how to obtain higher yields in treatment plants and at more competitive prices. It is for this reason that this project entitled "*Technical and economic study of micas, byproduct of feldspathic sands*" has been supported software ModSim, the laboratory equipment, spreadsheets and electron microscope develops.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT.....	3
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
1 Introducción.....	1
1.1 Objetivo.....	1
2 Caracterización del mineral	2
2.1 Descripción.....	2
2.2 Mica moscovita	3
2.2.1 Cristalografía.....	3
2.2.2 Estructura cristalina	4
2.2.3 Propiedades físicas	4
2.2.4 Propiedades químicas.....	5
2.2.5 Propiedades Térmicas.....	5
2.3 Formación	5
2.4 Usos industriales	6
3 Cálculo de concentración.....	7
3.1 Introducción teoría de métodos de concentración	7
3.2 Teoría de clasificación por tamaños	10
3.2.1 Cribas	10
3.2.2 Hidrociclones.	13
3.3 Molienda	15
3.3.1 Molino de bolas	18
3.4 Aparatos de Análisis	20
3.4.1 Microscopía electrónica de barrido fundamentos teóricos	20
3.5 Trabajo practico realizado.....	24
3.5.1 Tamizado de la muestra.....	24
3.5.2 Preparación de muestras.....	26
3.5.3 Microscopía electrónica en las muestras	27
4 Cálculo y diseño de planta	32
4.1 Diseño de la planta de tratamiento para cumplir las especificaciones	32

4.2	Simulación con MODSIM.....	33
5	Estudio económico.....	40
5.1	VAN.....	42
5.2	TIR.....	46
6	Conclusiones	47
	Lista de referencias	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Mica moscovita.	2
Ilustración 2. Tetraedros de silicio. Celia Marcos Pascual.	2
Ilustración 3. Cristalografía. Celia Marcos Pascual.	3
Ilustración 4. Estructura bilaminar de la moscovita. Celia Marcos Pascual.	4
Ilustración 5. Mecanismos de separación. Osvaldo Pavez.	7
Ilustración 6. Diferencia entre mesa con riffles y sin ellos. Osvaldo Pavez.	9
Ilustración 7. Diferencia entre mesa con riffles y sin ellos. Osvaldo Pavez.	9
Ilustración 8. Mesa de sacudidas.	10
Ilustración 9. Diagrama de clasificación por tamaños de una criba con cuatro pisos (de Svedala).	11
Ilustración 10. Criba de tres paños (http://www.canteirasmiramontes.com/).	11
Ilustración 11. Polea desbalanceada.	12
Ilustración 12. De eje excéntrico.	12
Ilustración 13. Reciprocante.	12
Ilustración 14. Reciprocante.	13
Ilustración 15. Electromagnético.	13
Ilustración 16. Hidrociclón (de Krebbs Engineers).	14
Ilustración 17. Molino (Cortesía de Nordberg).	15
Ilustración 18. Molino de forma continua (Fuller-Traylor).	16
Ilustración 19. Revestimiento interior de los molinos.	17
Ilustración 20. Interior de un molino de bolas (www.mining.ubc.ca).	18
Ilustración 21. Molino de bolas (Fuller – Traylor).	18
Ilustración 22. Molino con alimentador de cuchara (Rowland, 2002).	19
Ilustración 23. Molienda de descarga por rebose (Nordberg).	19
Ilustración 24. Molino de descarga por rejilla (Nordberg).	20
Ilustración 25. Infografía de microscopio electrónico (www.uned.es)	21
Ilustración 26. Reacciones en la muestra y posibilidades de lectura que ofrece. (www.uned.es).	21
Ilustración 27. Micrografía de secundarios (SEI) Pepita de oro en la que se aprecia el relieve.	22
Ilustración 28. Gráfico de microanálisis Rayos X de un feldespato potásico.	23
Ilustración 29. Equipos para realización de curva granulométrica.	24
Ilustración 30. Curva granulométrica.	25

Ilustración 31. Calentador Severin 2000 W.	26
Ilustración 32. Resina Epoxi.	26
Ilustración 33. Muestras.	27
Ilustración 34. Muestra 1.	28
Ilustración 35. Muestra 2.	29
Ilustración 36. Muestra 3.	29
Ilustración 37. Muestra 4.	30
Ilustración 38. Granulometría superior a 1.5 mm.	31
Ilustración 39. Sinóptico del proceso de flotación de arenas feldespáticas (Especificaciones y clasificaciones de las rocas industriales).	32
Ilustración 40. Esquema de la planta de beneficio.	33
Ilustración 41. Pantalla de Inicio del MODSIM.	34
Ilustración 42. Esquema de la planta de tratamiento inicial.	35
Ilustración 43. Caracterización del material en MODSIM.	36
Ilustración 44. Caracterización granulométrica y de capacidad de la corriente de alimentación.	36
Ilustración 45. Esquema de la planta de tratamiento con los flujos resultado.	37
Ilustración 46. Curva granulométrica del producto obtenido en la primera batería mesas de sacudidas.	38
Ilustración 47. Curva granulométrica del producto obtenido en la tercera batería mesas de sacudidas.	38
Ilustración 48. Ingresos del proyecto.	40
Ilustración 49. Inversiones.	40
Ilustración 50. Costes de operación.	41
Ilustración 51. Otros costes.	41
Ilustración 52. Caja de flujos para el VAN.	42
Ilustración 53. Fórmula de cálculo para el VAN.	42
Ilustración 54. Cálculo del VAN para los 5 primeros años.	43
Ilustración 55. Cálculo del VAN para los años del 6 al 10.	43
Ilustración 56. Cálculo del VAN para los años del 11 al 15.	44
Ilustración 57. Gráfico de rentabilidad anual, VAN.	44
Ilustración 58. Fórmula de cálculo para el TIR.	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos granulométricos.....	25
Tabla 1. Concentraciones de la muestra 1.....	28
Tabla 3. Concentraciones de la muestra 2.....	28
Tabla 4. Concentraciones de la muestra 3.....	29
Tabla 5. Concentraciones de la muestra 4.....	30
Tabla 6. Resultados del MODSIM de las corrientes de la planta.....	38
Tabla 7. Resultados de las corrientes.	39

1 Introducción

La mica es uno de los minerales más abundantes en la corteza terrestre, en torno al 3.8% en peso, mica en cualquiera de sus variedades, pero por lo general se obtiene como subproducto de la concentración de cuarzos, caolín y arenas feldespáticas.

Las empresas productoras en España:

- Arcillas y Feldespatos Rio Pirón S.A.
- Caolines de Vimianzo.
- Cavisa.
- Graveras Castro.

La explotación de este tipo de mineral aumenta debido a sus aplicaciones y por ello al aumento de la calidad en la demanda, de estas por las diferentes industrias. Es por ello que surge la necesidad de estudiar cómo obtener concentrados mayores concentraciones en micas mediante nuevas plantas de tratamiento y a precios razonables. Es por esta razón por la que se desarrolla el presente proyecto titulado *“Estudio técnico-económico de micas, subproducto de arenas feldespáticas”*.

1.1 Objetivo

El objetivo principal del presente estudio, es demostrar la viabilidad económica, en el proceso de concentración de mica moscovita, la cual se considera un subproducto dentro del aprovechamiento industrial de las arenas feldespáticas potásicas dentro de instalaciones existentes.

El siguiente documento se desarrolla en los siguientes cuatro puntos:

- Caracterización del mineral.
- Cálculo de concentración.
- Cálculo y diseño de planta.
- Estudio económico.

Con ellos se estructura el trabajo realizado de una forma clara y ordenada, para llegar a unas conclusiones finales.

2 Caracterización del mineral

2.1 Descripción

Mica es un mineral cuya denominación que se le da a un grupo de filosilicatos, debido a que tienen un hábito hojoso o escamoso (del griego phyllon: hoja) y una dirección de exfoliación predominante.



Ilustración 1. Mica moscovita.

La estructura de los filosilicatos está formada por dos bloques básicos, la capa tetraédrica constituida por octaedros de SiO_2 , y otra capa octaédrica compartiendo las aristas.

Cada tetraedro comparte tres oxígenos con los tetraedros vecinos, formando una capa de extensión indefinida, la capa octaédrica también denominada trioctaédrica, cuando se consigue el balance de carga con tres octaedros dentro de un hexágono de tetraedros de silicio.

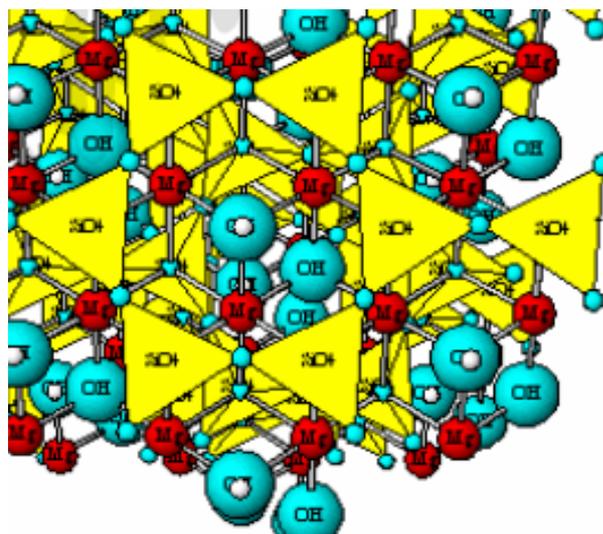


Ilustración 2. Tetraedros de silicio. Celia Marcos Pascual.

El apilamiento de las de las capas en las micas tipo sándwich [t, o, t] puede ser diferente en cuanto la coincidencia de sus vértices, dando lugar a 6 polítipos diferentes.

2.2 Mica moscovita

Es componente de rocas eruptivas y granitos, también en rocas metamórficas micacitas, corneanas, pizarras, etc... de apariencia se puede confundir con un plástico gastado por su color y elasticidad.

2.2.1 Cristalografía

Pertenece al sistema monoclinico $2/m$, del grupo espacial $C2/c$.

- $a= 5.19 \text{ \AA}$
- $b= 9.04 \text{ \AA}$
- $c= 20.08 \text{ \AA}$
- $\beta= 95^{\circ}30'$
- $Z= 4$

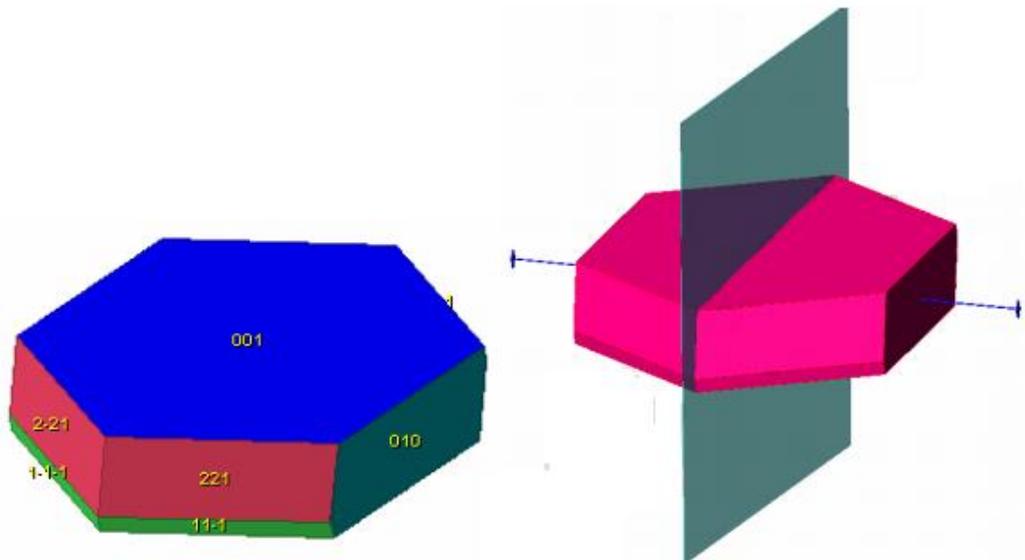


Ilustración 3. Cristalografía. Celia Marcos Pascual.

2.2.2 Estructura cristalina

Los átomos de silicio están en el centro de los tetraedros en cuyos vértices se encuentran los oxígenos donde cada átomo de oxígeno pertenece a su vez a dos tetraedros, en uno de cada cuatro tetraedros el átomo de silicio es sustituido por un de aluminio donde la composición de la lámina oxigenada es $\text{Si}_2\text{AlO}_{10}$.

El plano de exfoliación está constituido por poa tomo de potasio uniendo entre si dos capas de láminas anteriormente descritas, estas aminas contienen átomos de elementos metálicos.

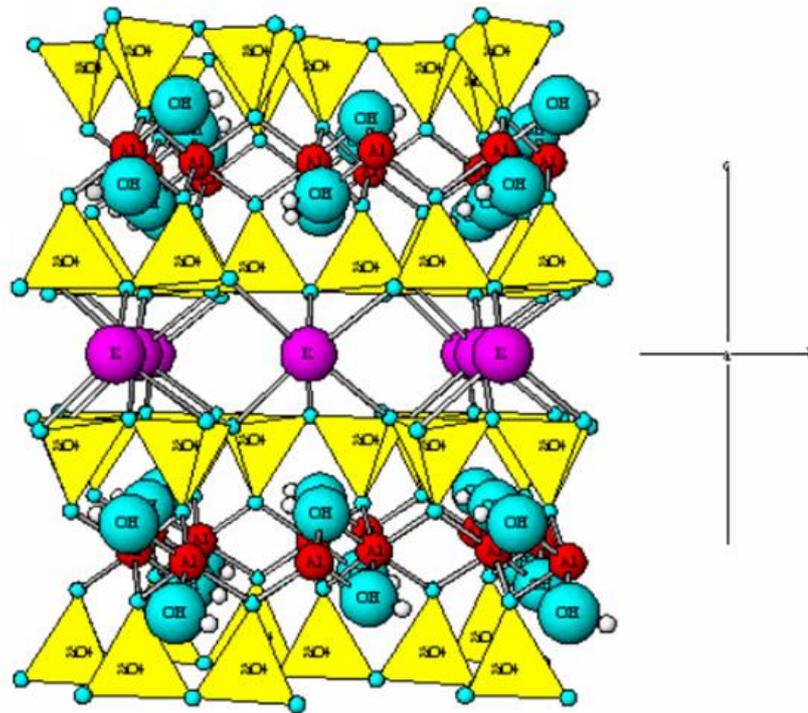


Ilustración 4. Estructura bilaminar de la moscovita. Celia Marcos Pascual.

2.2.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas son constantes hasta una temperatura de unos 500 °C, que es el punto donde comienza la deshidratación.

- **Color:** Incoloro, transparente, en bloques grandes es traslucida en tonos claros amarillos, verdes pardas o rojas.
- **Raya:** Incolora blanca.
- **Brillo:** Perlado, vítreo a sedoso.
- **Dureza:** De 2 a 2.5 en la escala de Mohs, es relativamente blanda y puede cortarse con ayuda de un cuchillo y tijeras.
- **Peso específico:** De 2.8 a 3 g/cm³

2.2.4 Propiedades químicas

La mica moscovita responde a la fórmula $K_2Al_4Al_2Si_6O_{20}(OH)_4$.

El color de la mica viene inferido fundamentalmente por el tipo y extensión de las sustituciones isomórficas en su estructura.

Los principales iones cromóforos en la moscovita el ferroso y el férrico, manganeso trivalente, y el ion cromo.

Las micas moscovitas de color rosa lo deben a la ausencia de ión ferroso y al dominio del manganeso sobre el férrico. Los tonos marrón-rojizo y marrón-oscuro son debidos a la dominación del férrico, y el verdoso al dominio del ión ferroso.

Las variedades incoloras son el resultado del equilibrio entre los iones ferroso, férrico y manganeso.

La mica moscovita reacciona con el ácido fluorhídrico, hidróxidos alcalinos sólidos, carbonatos alcalinos calientes y agua en anhídrido carbónico.

Con temperaturas del orden de 500°C se comienza a desprender del agua y entre 500 y 700°C son evidentes los cambios macroscópicos y microscópicos. Con temperaturas comprendidas entre 940° y 1. 200°C se rompe la estructura característica de la mica formándose alúmina, mullita y vidrio.

2.2.5 Propiedades Térmicas

- **Conductividad Térmica:** Sus propiedades como aislante térmico se mantiene hasta los 600 ° C, la medida en el plano perpendicular al plano de exfoliación es $19 \cdot 10^{-4}$ cal/cm*seg*°C.
- **Resistividad:** De 10^{12} a 10^5 ohmios* cm para temperaturas de 25v a 300° C.
- **Factor de Perdidas:** en las mejores calidades, usadas como dieléctricos en condensadores el factor de perdida varía entre 0008 a 0.0009 en tanto por uno a 25° C y 60 ciclos por segundo.

2.3 Formación

Las moscovitas en láminas proceden de las pegmatitas aunque este tipo de rocas es usual los yacimientos rentables, son difíciles de encontrar.

Las pegmatitas que contienen moscovita se encuentran junto a muchos tipos de rocas metamórficas o ígneas como esquistos, anfibolitas, granitos, gneises, cuarcitas y mármoles, irregularmente distribuidos. También la moscovita se encuentra más en unas zonas del cuerpo pegmatítico que en otras.

Los volúmenes más ricos en moscovita no tienen una forma cilíndrica similar a la de las zonas mineralógicas de la pegmatita, sino que presentan cuantiosas formas como lentejones, masas diseminadas, filoncillos, finos cuerpos tabulares y venas, etc.

A partir de varios tipos de rocas se puede explotar la moscovita en fragmentos, en las que son importantes los depósitos en alaskitas, en esquistos y yacimientos de caolín ricos en moscovita de la meteorización de pegmatitas y alaskitas.

2.4 Usos industriales

Para conseguir la calidad comercial de la mica, ésta se tiene que procesar mediante operaciones de corte, clasificación y procesamiento. Después de esto, se utiliza en diversos ámbitos:

- Control eléctrico: iniciadores y paneles de control de motores industriales, relés, reguladores térmicos y eléctricos.
- Aparatos eléctricos: conmutador, disipador de calor, inversor, transformador, etc.
- Uso mecánico: misiles guiados, gafas irrompibles, en los equipos de respiración de oxígeno, cristales ópticos sintéticos, etc.
- Aparatos de iluminación eléctrica: luces, lámparas incandescentes, luces de neón, lámparas de arco, etc.
- Usos varios: contadores Geiger-Muller, tubos de vacío, aparatos de rayos X, etc.

En el caso de utilizar polvo seco de mica, el cual se obtiene por molienda, tiene otros usos:

- Para electrodos de soldadura. A base de rutilo de acero dulce. Los electrodos se recubren de mica como agente de retraso y agente protector: en primer lugar, para que se forme una escoria fusible y un sellado correcto en la zona de fusión del arco, y en segundo lugar es resistente a la acción del calor, gas y oxidación atmosférica.
- Para cementos. Como agente pavimentación y relleno en compuestos de cemento para rellenar las juntas entre los paneles de la pared. También como revestimiento en los techos de edificios ya que reduce la penetración, con buenas características térmicas, mecánicas y baja absorción de humedad.
- Para productos acústicos. Como agente de relleno para productos acústicos sin asbesto, en los bajos de los automóviles y sistemas contra el ruido. Añadiendo mica en los productos acústicos se mejora las propiedades de la superficie de aislamiento.
- Para forros de freno sin amianto. La mica sirve para rigidizar, reforzar, endurecer y reforzar los productos así como prevenir de roturas microscópicas.
- Para caucho y neumáticos. La mica en estos productos funciona como un anti-bloqueo y anti-fricción entre los agentes del caucho y los moldes de los neumáticos para automóviles, motos y aviones. Se utiliza como agente lubricante para el molde y evita la adhesión del caucho durante su vulcanización y actúa como agente separador para los núcleos.

3 Cálculo de concentración

3.1 Introducción teoría de métodos de concentración

Para el autor Des Clifford, el método de procesamiento de minerales mas simple y económico es la concentración por gravimetría, permitiendo la recuperación de rangos de tamaño bastante amplio, desde tamaños finos como 5 micras hasta 500 milímetros como tamaño más grueso. En el caso de los tamaños finos, se separan mediante la diferencia de densidad: cuando la diferencia de densidad entre dos minerales de una mena es muy grande, la separación se realizará con mayor facilidad.

Existen cuatro grandes grupos, cada uno utiliza un sistema de separación diferente, como se ve en la fig 3.1.

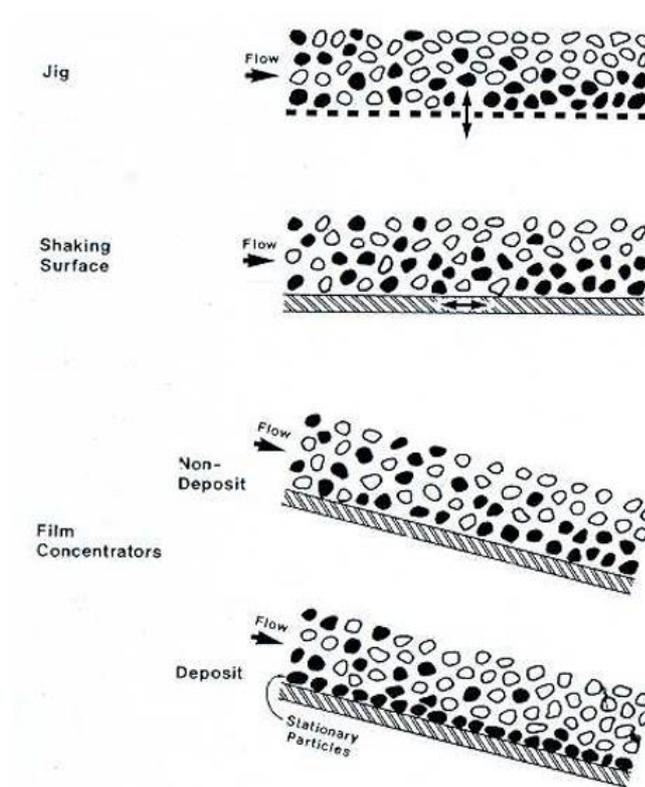


Ilustración 5. Mecanismos de separación. Osvaldo Pavez.

Las partículas de mayor peso específico tienen mayor velocidad de caída, y sedimentan antes, próximas al punto de la alimentación. Las partículas de menor peso específico sufren mayor acción de transporte longitudinal, y son arrastradas más lejos. Otras partículas son depositadas de acuerdo con sus velocidades de caída, que dependen de sus tamaños y pesos específicos. Partículas de tamaños y pesos específicos diferentes pueden depositarse en el mismo lugar, si obedecen lo señalado anteriormente.

Las mesas de sacudidas que son el equipo utilizado en este estudio, actúan a través de superficies con movimientos acelerados asimétricos, combinados con el principio de escurrimiento laminar.

Los “riffles” fueron introducidos a fin de formar cavidades donde ocurra la formación de lecho y estratificación, ocultar las partículas pesadas para la transmisión de las sacudidas e exponer las partículas grandes y livianas al flujo transversal de agua de lavado después de la estratificación. La mesa de sacudidas dispone de un mecanismo que proporciona un movimiento de oscilación lateral diferenciado en sentido transversal al flujo de pulpa que causa el desplazamiento de las partículas a lo largo de los “riffles”.

Los “riffles” tienen las siguientes funciones:

- Retener las partículas pesadas en el fondo.
- Generar la acción de estratificación en la pulpa.
- Crear un flujo turbulento para producir la separación entre las partículas.

El mecanismo de separación que actúa en la mesa de sacudidas consiste en el aporte de alimentación a los “riffles”, que sufren el efecto del movimiento asimétrico de la mesa, resultando en un desplazamiento de las partículas para adelante; las pequeñas y pesadas se desplazan más que las grandes y ligeras. En los espacios entre los “riffles”, las partículas se estratifican debido al movimiento asimétrico de la mesa y a la turbulencia de la pulpa a través de los “riffles”, comportándose dicho lecho entre los “riffles” igual que un jig a pequeña escala con sedimentación retardada y consolidación intersticial haciendo que los minerales pesados y finos sedimenten más próximos a la superficie que los grandes y ligeros. Las capas superiores son arrastradas sobre los “riffles” por la alimentación entrante y por el de agua de lavado.

Los “riffles” decrecen en altura de modo que, progresivamente, las partículas finas y pesadas son puestas en contacto con la película de agua, que pasa sobre los “riffles”. La concentración final se desarrolla en la región lisa de la mesa, donde la capa de material se presenta más delgada.

El resultado del movimiento asimétrico en la dirección de los “riffles” y de la velocidad diferencial en dirección transversal, favorece el esparcimiento de los minerales.

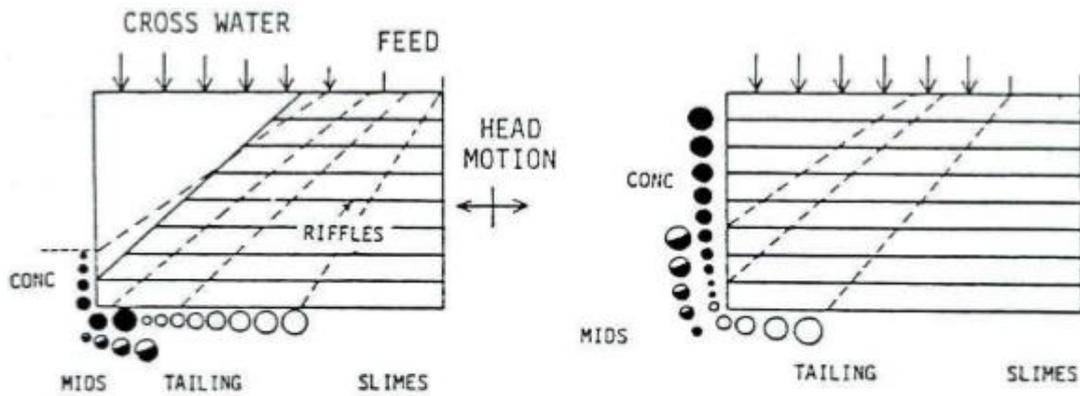


Ilustración 6. Diferencia entre mesa con riffles y sin ellos. Osvaldo Pavez.

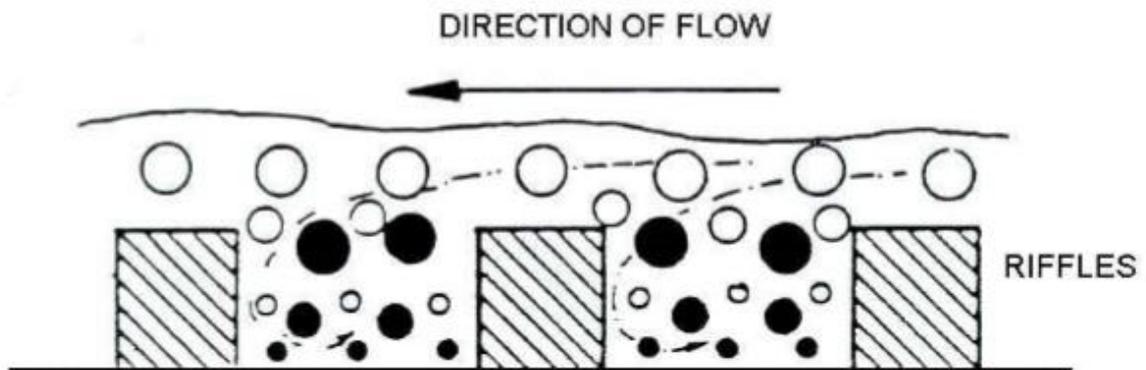


Ilustración 7. Diferencia entre mesa con riffles y sin ellos. Osvaldo Pavez.

En cuanto al revestimiento de la mesa, los materiales utilizados son: linóleo, goma natural, goma sintética, uretano, metano impregnado de zircón y fibra de vidrio. La mesa de sacudidas se ha utilizado desde hace varias décadas, siendo un equipo extendido por todo el mundo. Se considera el equipo más eficiente en el tratamiento de materiales con granulometría fina. Se ve limitada por la baja capacidad de procesamiento, haciendo que su uso, particularmente con menas de aluviones, se restrinja a la limpieza.

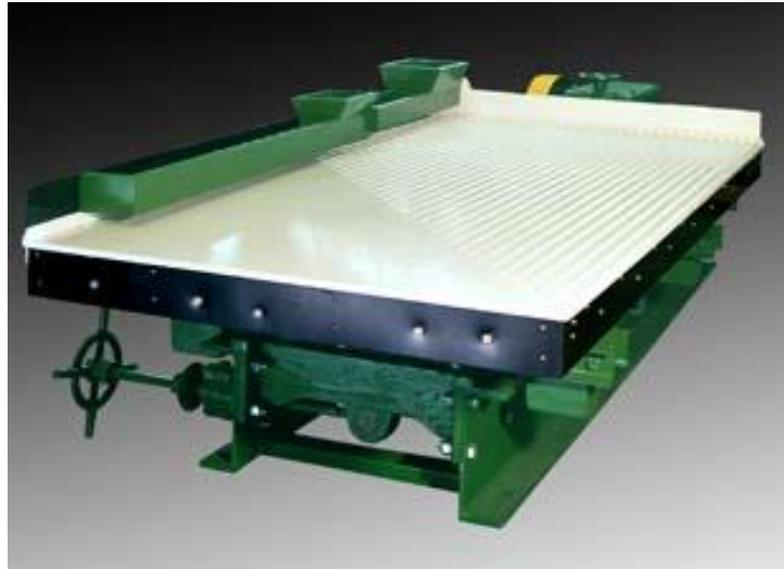


Ilustración 8. Mesa de sacudidas.

3.2 Teoría de clasificación por tamaños

3.2.1 Cribas

Las operaciones para obtener una clasificación por tamaños de fragmentos de formas y tamaños variados es el cribado. En esta operación se obliga al material a pasar por una superficie con aberturas las cuales dejan pasar los granos con tamaños menores a la dimensión de la abertura. A esta fracción se le denomina pasante. A la fracción que se retiene o se rechaza se le denomina rechazo, por lo que tienen un tamaño mayor a las dimensiones de la abertura.

El cribado sirve para:

- Hacer un deslamado: esto consiste en la eliminación de arcillas o constituyentes coloidales.
- Obtener una granulometría deseada para operaciones de control o de investigación.
- Necesidad de obtener un producto que satisfaga las especificaciones técnicas, como las plantas de áridos.
- Separar las partes más grandes de una mezcla, para conseguir eliminarlos o para mandarlos a una nueva etapa de fragmentación.
- Eliminar el agua que se denomina agotado.
- En el caso de tener procesos de concentración posteriormente, obtener un tamaño correcto para que se opere correctamente.

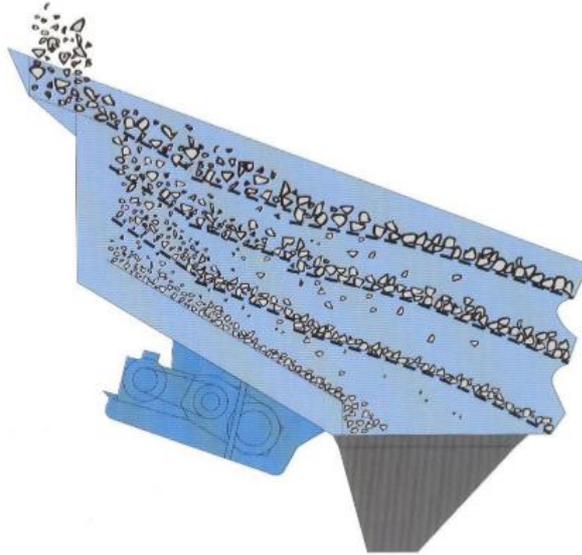


Ilustración 9. Diagrama de clasificación por tamaños de una criba con cuatro pisos (de Svedala).

Se pueden diferenciar diferentes definiciones en el ámbito de la clasificación por tamaños:

- Pasante: aquellas partículas que forman parte de las que se depositan sobre la criba y posteriormente la atraviesan, ya que su tamaño es inferior al de las aberturas.
- Rechazo: aquellas partículas que corren por encima de la criba, ya que su tamaño es superior al de las aberturas.
- Semitamaño: parte de la alimentación que es menor a la mitad del tamaño de clasificación.
- Todo-uno: alimentación antes de entrar en la clasificación.
- Desclasificados: fracción fina que va con la fracción gruesa y no atraviesa la criba (rechazo).



Ilustración 10. Criba de tres paños (<http://www.canteirasmiramontes.com/>).

La criba utilizada en el estudio será una criba vibratoria. Ésta forma parte del grupo más importante de cribas, ya que es el diseño popular más utilizado en la industria de

minerales. Según el tipo de vibración y la pendiente de la criba, se puede realizar una clasificación:

- 1) Criba de vibración elíptica y horizontal o levemente inclinada.
- 2) Criba de vibración lineal y una pendiente intermedia.
- 3) Criba de vibración circular y una pendiente intermedia.

Clasificación según el tipo de vibrador:

- De polea desbalanceada. Se produce una vibración oscilante gracia a un eje concéntrico con contrapesos ajustables con unas frecuencias de 500 a 2500 revoluciones por minuto y una carrera menor de 10 milímetros. Para cribar con alimentación ligera.

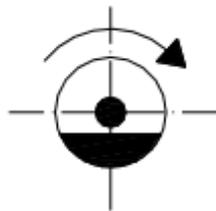


Ilustración 11. Polea desbalanceada.

- De eje excéntrico: se produce una vibración gracias al movimiento circular de un eje excéntrico. Con una frecuencia de 25 a 500 revoluciones por minuto y una carrera de 15 a 30 milímetros. Para cribas vibratorias inclinadas con material ligero a pesado.



Ilustración 12. De eje excéntrico.

- Reciprocante o de cuatro cojinetes: se produce un movimiento positivo en línea recta gracias a dos ejes excéntricos que giran en sentido opuesto y en la misma frecuencia. Se puede inclinar la carrera mediante el desfase de los ejes. Para cribas vibratorias horizontales.

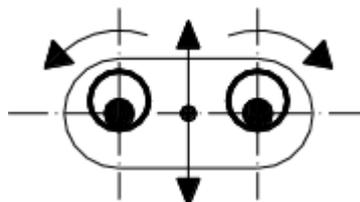


Ilustración 13. Reciprocante.

- Carrera positiva o de cuatro cojinetes. Se produce un movimiento positivo gracias a un eje con doble excentricidad y dos cojinetes, y éste se sitúa en el centro de

gravedad de la criba. Se utiliza para cribas vibratorias inclinadas para alimentaciones pesadas ya que son muy resistentes.

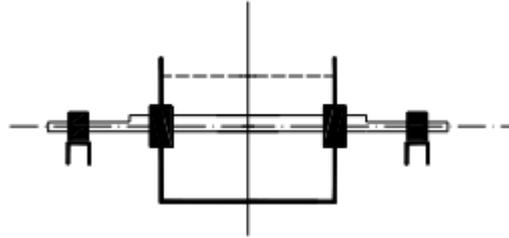


Ilustración 14. Recíprocante.

- Electromagnético. Con frecuencias de oscilacion de 1500 a 7200 revoluciones por minuto. Se utilizan para cribas con una pendiente muy pronunciada y separando tamaños relativamente finos.

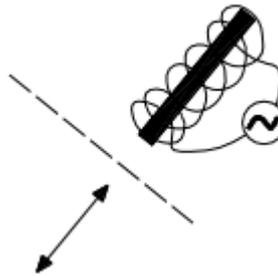


Ilustración 15. Electromagnético.

3.2.2 Hidrociclones.

Los hidrociclones son clasificadores hidráulicos centrífugos muy sencillos pero de suma importancia en la industria minera. Se basan en una clasificación por grandes fuerzas de centrifugación llegando a los 10.000 g's. Y se fabrican en acero y plástico, en su interior están revestidos con materiales de desgaste cerámico como poliuretano y neopreno.

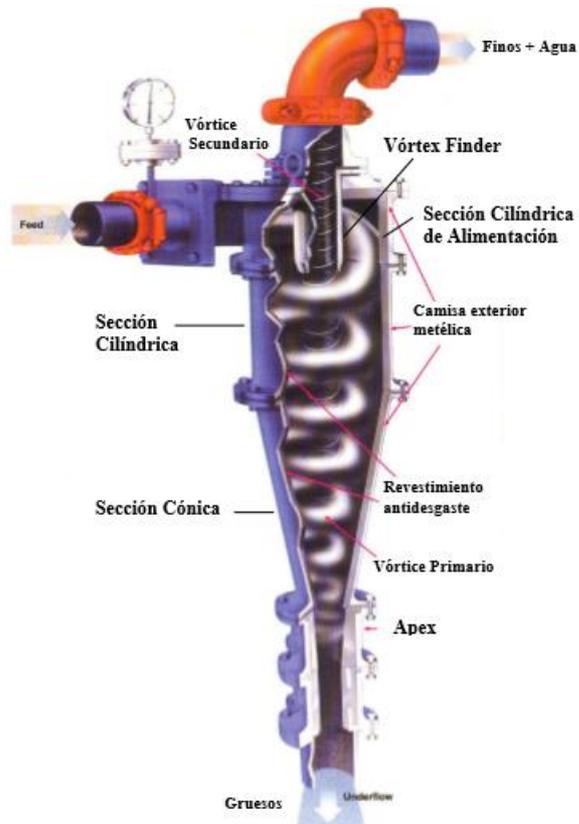


Ilustración 16. Hidrociclón (de Krebs Engineers).

Estos aparatos se utilizan para clasificar alimentaciones con granulometrías comprendidas entre 40 y 400 micras. Depende también de su diámetro que van desde los 13 a 900 milímetros.

El hidrociclón está separado en diferentes partes:

- 1) Sección cilíndrica de alimentación: entrada tangencial. Se introduce a gran presión la pulpa (agua más sólido) formando una envolvente. El diámetro del hidrociclón viene definido por su diámetro interior.
- 2) Sección cilíndrica intermedia: con un diámetro igual que la sección anterior. Se encarga de alargar el hidrociclón y aumenta el tiempo de retención de la pulpa en su interior. La longitud normalmente es el 100% del diámetro del ciclón.
- 3) Sección cónica: Con un ángulo de 10 a 20 grados. Su finalidad es la misma que la sección cilíndrica intermedia.
- 4) Ápex: Donde termina la sección anterior y con un tamaño determinado para que los gruesos pueda salir sin problemas de tapones.
- 5) Vortex finder: Por donde salen los finos y la mayor parte del agua. Su diámetro es un 35% del diámetro del ciclón.

Los hidrociclones son sencillos: la pulpa se introduce en la cámara a altas presiones y se ve obligada a seguir una trayectoria circular. Ésta se ve sometida a dos fuerzas: la más

importante que es la centrifuga, que obliga a las partículas a circular hacia la pared y la de arrastre, debido a la viscosidad dirigiendo las partículas hacia el centro del hidrociclón.

En el interior se producirá un movimiento turbulento generando dos vértices: uno primario que mueve las partículas más gruesas por centrifugación y el secundario, en la zona central que eleva las partículas más ligeras.

El underflow o descarga de hundido puede ser en forma de espiral o de paraguas.

3.3 Molienda

La molienda es el último proceso de fragmentación en la disminución de la dimensión de las partículas. Dependiendo de las dimensiones de los productos finales tenemos molienda gruesa (tamaño de salida aproximado de 1 milímetro), molienda fina (tamaño de salida aproximado de 100 micras) y molienda ultrafina (tamaño de salida aproximado de 10 micras). Hay diferentes autores que determinan el tamaño de salida para cada tipo de molienda.

La conminución se consigue gracias a la combinación de fuerzas de cizalladura, abrasión y compresión. Ésta se lleva a cabo dentro de equipos rotatorios cilíndricos de acero, denominados usualmente como molinos de rodamiento de carga o molinos simplemente.

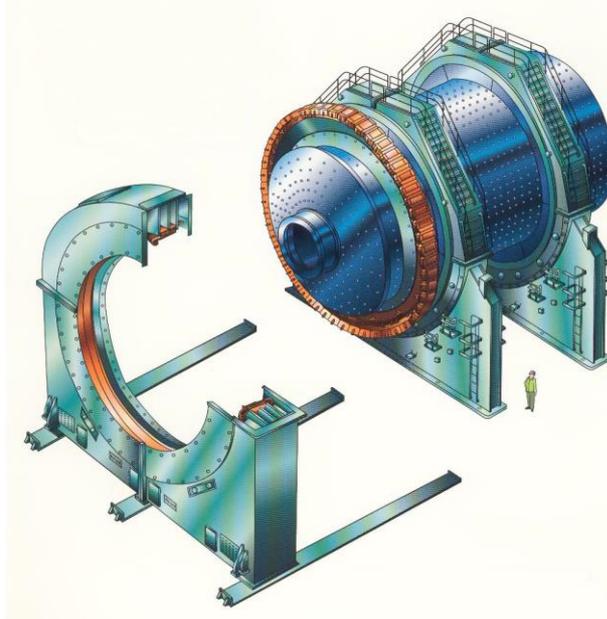


Ilustración 17. Molino (Cortesía de Nordberg).

Dentro de los cuerpos cilíndricos existe una mezcla de mineral con cuerpos moledores como bolas, guijarros de sílex, barras, etc. Dependiendo de esos cuerpos existen diferentes tipos de molinos:

- Molino de barras.
- Molino de bolas.

- Molinos autógenos o semiautógenos.
- Molinos de pebbles.

En función de la forma de trabajar de los molinos tenemos:

- De forma discontinua: el molino está parado, se recarga y se cierra para empezar a girar. Cuando se finaliza de fraccionar, se abrirá para separar el material de los cuerpos. La forma discontinua se utiliza sobre todo en molinos pequeños.
- De forma continua: la alimentación es continua. Por un extremo entra y a la vez, se va descargando mineral por el lado contrario. Solo se parará para realizar labores de mantenimiento o cambio de cuerpos. La forma continua es la más utilizada en la industria minera.

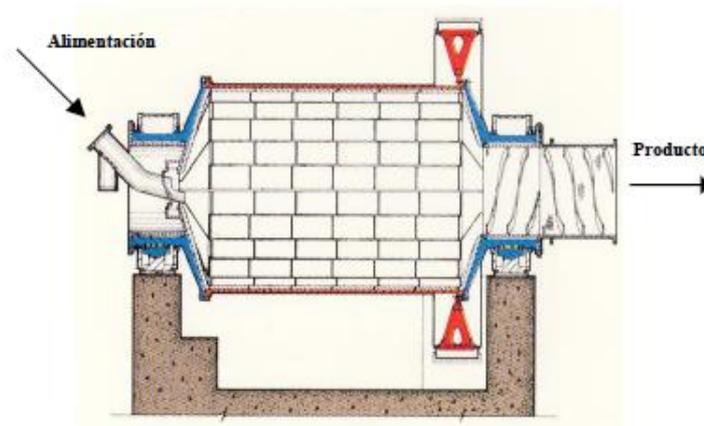


Ilustración 18. Molino de forma continua (Fuller-Traylor)

Los molinos tienen la posibilidad de trabajar en circuito cerrado o abierto. Hay una recirculación a la salida del molino, gracias a una criba o clasificador, para devolver al principio a las partículas grandes indeseables. Para los molinos autógenos o con bolas se utiliza el circuito cerrado; para los molinos con barras el abierto.

También podemos llevar a cabo la conminución en vía húmeda (una pulpa del 30 al 300% de agua) o seca (secos con un 2% de agua o con cierta humedad de hasta 30% de agua).

En este estudio, el molino es de bolas. Las bolas están fabricadas con acero de fundición y acero forjado pudiendo estar aleado con cromo y molibdeno, para ser resistentes al desgaste o con níquel para ser resistentes a la abrasión. En determinadas circunstancias las bolas pueden no ser esféricas, tomando una forma cilíndrica o troncocónica, por ejemplo. Este tipo de molienda se utiliza para moliendas finas.

Dentro del molino, existen unos revestimientos o blindajes intercambiables que debe cumplir:

- Proteger la forma cilíndrica del molino contra la corrosión y el desgaste.
- Resistir a los impactos y a la abrasión.

- Favorecer un volteo mineral minimizando el deslizamiento entre los cuerpos fraccionadores y el molino.

Hay diferentes tipos de blindajes dependiendo de su forma:

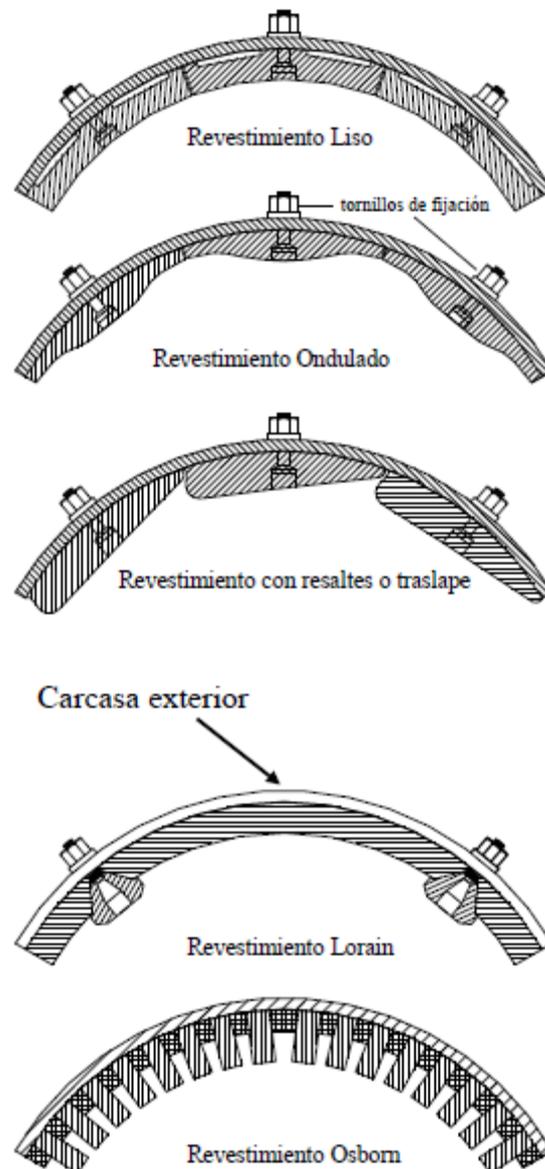


Ilustración 19. Revestimiento interior de los molinos.

Los blindajes están fabricados de cerámica, aunque son más populares los fabricados de acero fundido o laminado. También se utiliza el caucho para molinos de bolas con alimentaciones muy duras.



Ilustración 20. Interior de un molino de bolas (www.mining.ubc.ca).

3.3.1 Molino de bolas

La alimentación de los molinos de bolas puede ir desde 0 – 30 micras a 0 – 200 micras.

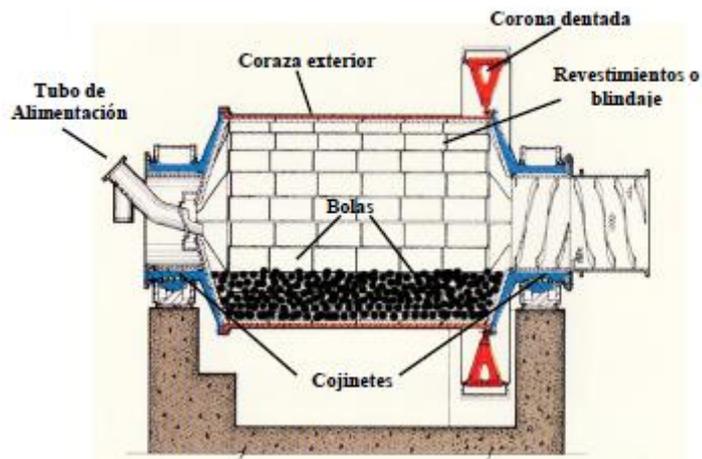


Ilustración 21. Molino de bolas (Fuller – Traylor).

En los molinos de bolas se tienen diferentes parámetros que lo caracterizan:

- Velocidad crítica: velocidad mínima de giro con la que la fuerza centrífuga creada es suficiente para que las bolas queden pegadas al blindaje. La velocidad suele ser un 72 – 77% de la velocidad crítica.
- Volumen de la carga: determina el volumen que va a ocupar las bolas dentro del molino, teniendo en cuenta los huecos que hay entre bolas. El volumen de carga suele ser entre un 40 – 45%, algunas veces hasta 50%.
- Tamaño de alimentación.
- Tamaño del producto.

- Cociente de reducción.
- Relación entre longitud y diámetro. La relación suele ser $L=0.9 \cdot D$ hasta $L=2 \cdot D$, donde L es la longitud y D es el diámetro del molino.
- Tipo de alimentador: Se utiliza un cangilón de doble cuchara cuando el molino está en circuito abierto con un volumen de carga cerca del 50%. Hay más tipos como los alimentadores de tubo.

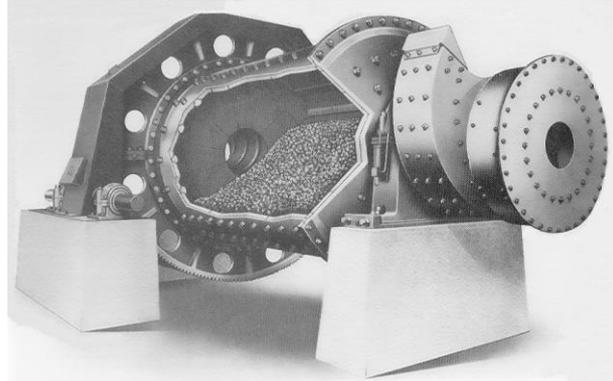


Ilustración 22. Molino con alimentador de cuchara (Rowland, 2002).

Se puede realizar una clasificación de los molinos de bolas en función de la descarga:

- Molino de descarga por rebose. Para moliendas muy finas y alimentaciones de 10 a 15 milímetros. Cuando se realiza en circuito cerrado, la carga circulante esta entre 300 y 500%.

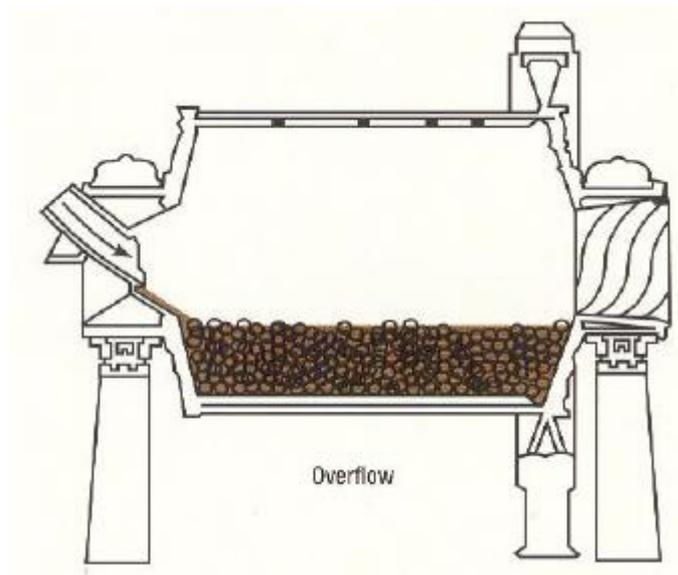


Ilustración 23. Molienda de descarga por rebose (Nordberg).

- Molino de descarga por rejilla. Alimentación como máximo de 50 milímetros. Se utiliza para moliendas gruesas (de 60 a 80 micras). Se utilizan en molienda en seco.

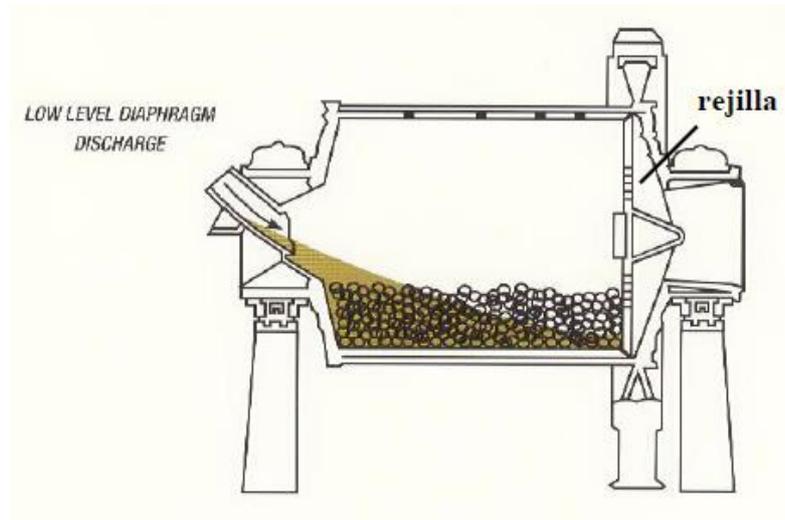


Ilustración 24. Molino de descarga por rejilla (Nordberg).

Para dimensionar un molino de bolas tenemos que tener en cuenta:

- Diámetro y longitud del molino explicado anteriormente.
- Granulometría del producto obtenido.

Potencia absorbida y tamaño de las bolas. La potencia es el parámetro más importante para realizar las dimensiones del molino.

3.4 Aparatos de Análisis

3.4.1 Microscopía electrónica de barrido fundamentos teóricos

Antes de explicar el proceso utilizado para este estudio, se describe el equipo y los fundamentos teóricos para dar base a la descripción del trabajo realizado.

Se incide un delgado haz de electrones acelerados, con energías desde unos cientos de eV hasta unas decenas de keV (50 KeV), sobre una muestra, opaca a los electrones. Este haz se focaliza sobre la superficie de la muestra, de forma que realiza un barrido de la misma siguiendo una trayectoria de líneas paralelas (fig. 3.13).

El haz generado por un cátodo de tungsteno se hace pasar por una columna a la que se le ha hecho el vacío, en la cual están ubicadas una serie de lentes electromagnéticas, con el fin de acelerar esos electrones y afinar el haz.

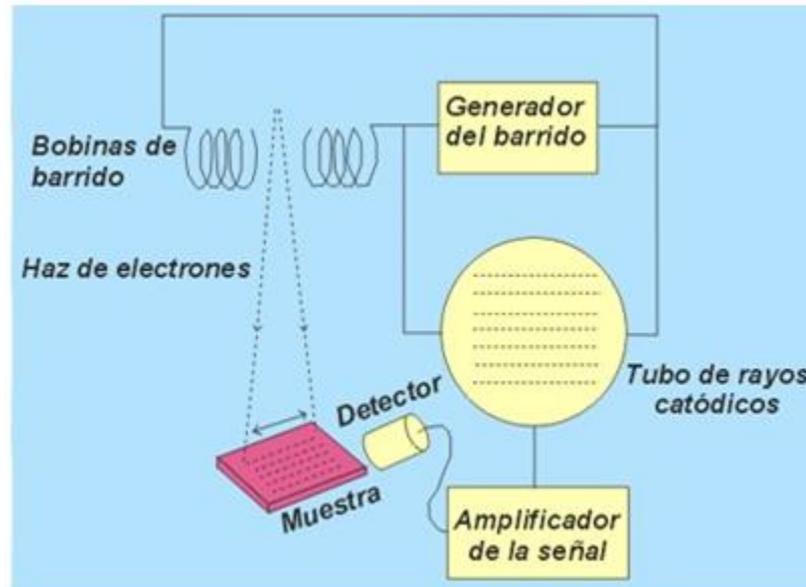


Ilustración 25. Infografía de microscopio electrónico (www.uned.es)

Cuando el haz es puntual atraviesa un sistema de bobinas situadas en la columna la cual desplaza el haz por toda la muestra como si fuera un pincel.

De la interacción del haz electrónico con la superficie de la muestra genera una serie de reacciones, entre otras: la admisión de esos electrones por la muestra, electrones que atraviesan la muestra (TEM), electrones secundarios, electrones retrodispersados y emisión de ondas electromagnéticas (Rayos X), (fig. 3.14). Las tres últimas se explican a continuación.

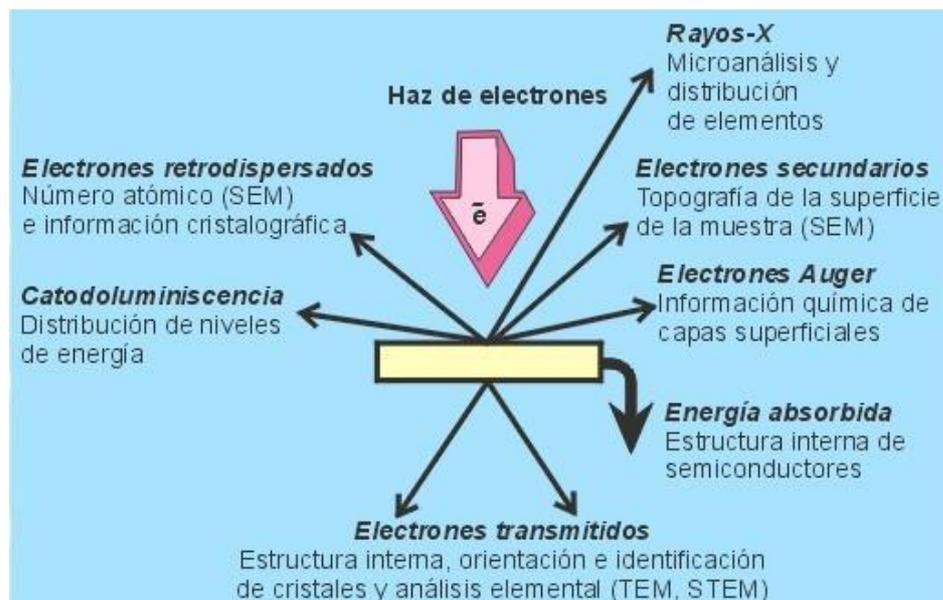


Ilustración 26. Reacciones en la muestra y posibilidades de lectura que ofrece. (www.uned.es).

En primer lugar se explica la detección de los electrones secundarios pese a que, para este estudio, no se ha utilizado.

o **Detección electrones secundarios (SEI: Secondary Electron Image):** La señal recibida es de más baja energía que la señal emitida por los electrones primarios, menor de 50 eV. Cada material presenta un coeficiente secundario, que es característico, y se define como “la relación que existe entre los electrones emitidos por la superficie de la muestra con respecto a los que impactan”.

Los electrones secundarios que se desprenden de cada punto, se detectan mediante un cristal de centello. Este cristal está unido al extremo de un bastón de Lucita y el otro extremo descansando contra la ventana del tubo fotomultiplicador. Así, los electrones secundarios colectados alcanzarán un centellador, donde se origina una señal luminosa que, amplificada por un fotomultiplicador, se convierte en una cascada de fotones. Estos fotones inciden en el fotocátodo, que es parte del fotomultiplicador, y se genera finalmente una señal eléctrica amplificada, capaz de modular el haz de un tubo de rayos catódicos, obteniéndose de esta forma un punto correspondiente de la imagen.

El alto voltaje que se aplica a la grilla del detector hace que los electrones secundarios, de baja energía, recorran una trayectoria curva al dejar la superficie de la muestra. Esto permite obtener señales aún de regiones muy inclinadas con respecto al detector, además de acelerarlas con respecto a él. Esto no sucede en el caso de electrones retrodifundidos. (MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO, Víctor Poblete P. et al, 2001). (fig. 3.15)

Ello produce una imagen topográfica de la muestra, que nos da una visión de la forma real, lo cual no es aplicable en este estudio puesto que la muestra ha sido pulida y es totalmente lisa.

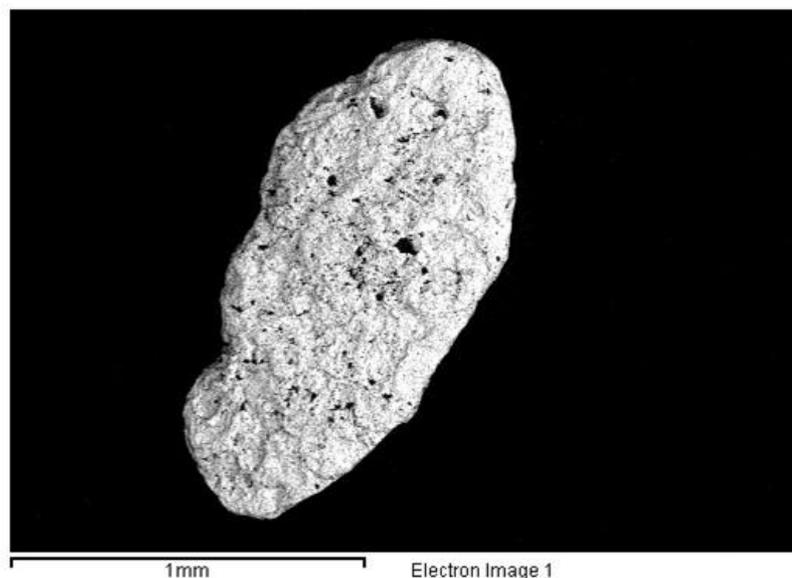


Ilustración 27. Micrografía de secundarios (SEI) Pepita de oro en la que se aprecia el relieve.

- **Detección electrones Primarios:** Tanto los electrones secundarios como los retrodispersados son captados con mismo detector, así que el funcionamiento queda descrito en el punto anterior. Recordar que los electrones primarios tiene mayor energía que los secundarios, y al viajar en línea recta producen imágenes de contraste muy acentuado.

La intensidad de emisión de los electrones retrodispersados depende del número atómico medio de los átomos de la muestra, así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados (Teoría de SEM, www.uned.es), es decir, la imagen generada nos muestra diferencias en la composición química de la muestra, por diferencias de contraste. (Fig. 3.17)

- **Radiación X:** Las ondas electromagnéticas emitidas por la muestra al impactarla puntualmente con un haz de electrones, pueden ser utilizadas para hacer un microanálisis químico semicuantitativo, mediante espectrometría de dispersión de longitudes de onda.

Los electrones incidentes excitan los átomos de la muestra y provocan la emisión de rayos X, cuya longitud de onda es característica de los elementos presentes en la muestra y, cuya intensidad para una determinada longitud de onda, es proporcional a la concentración relativa del elemento.

Normalmente se obtiene un análisis cualitativo de los constituyentes mayoritarios y minoritarios de pequeñas áreas (1mm); sin embargo, en muestras planas y bien pulidas, es posible hacer análisis cuantitativos al comparar la intensidad de los rayos X a cualquier intensidad producida en una muestra estándar (patrón) de composición conocida (Teoría de SEM, www.uned.es).

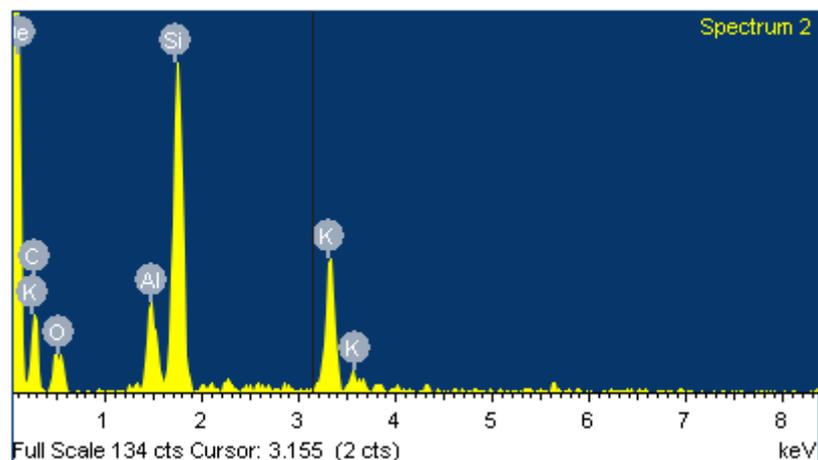


Ilustración 28. Gráfico de microanálisis Rayos X de un feldespato potásico.

3.5 Trabajo practico realizado

Para el cálculo y el diseño de la planta, se ha optado por una serie de tratamientos y ensayos, que se detallaran a continuación.

3.5.1 Tamizado de la muestra

Para conocer la granulometría del material se ha realizado una detalla curva granulométrica, para ello se han utilizado los equipos presentes en el **Laboratorio de ingeniería minera** tales como:

- Tamizadora, modelo **Controls Automatic sieve shaker D403**.
- Bascula, modelo **Gram D2X**
- Mini Bascula modelo **P 048**



Ilustración 29. Equipos para realización de curva granulométrica.

La muestra tiene un peso de 1644.93 gramos, la calificación se ha realizado ajustándose a el tamaño de tamices disponibles en el laboratorio, en ningún caso normativas como la UNE 7050 ni la ASTM C33-85.

Se han conservado las muestras separadas por tamaños, para el cálculo de las concentraciones en las diferentes granulometrías.

Los resultados son los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 1. Datos granulométricos.

LUZ (mm)	PESO (g)	% RETENIDO	%RET. ACUM.	%PASANTE ACUM.
1.5	1.82	0.11	0.111	99.89
0.4	375.05	22.80	22.911	77.09
0.1	937.02	56.96	79.875	20.12
0.08	188.01	11.43	91.305	8.70
0.001	143.03	8.70	100.000	0.00

Total	1644.93	100.000
--------------	----------------	----------------

La representación gráfica de los datos anteriores corresponde con la siguiente imagen, que es la curva granulométrica del material.

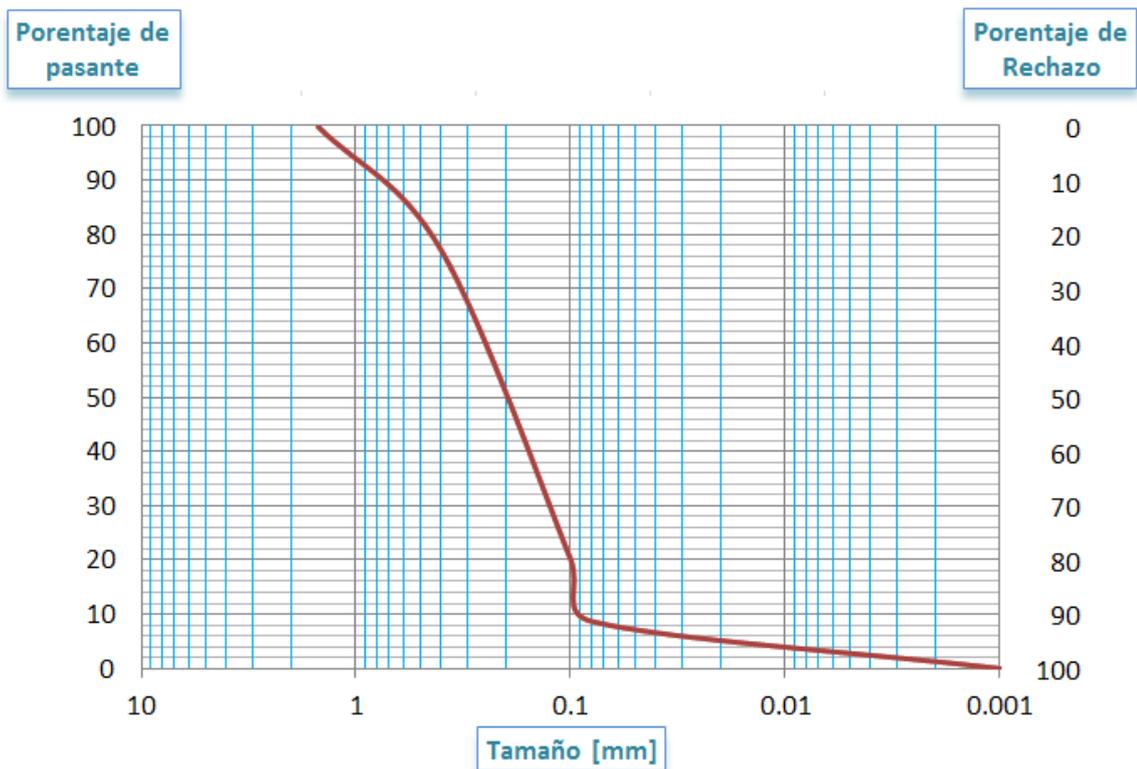


Ilustración 30. Curva granulométrica.

3.5.2 Preparación de muestras

El material previamente clasificado para la curva granulométrica es ahora utilizado para la preparación de muestras en láminas, que será posteriormente utilizado para el cálculo de concentraciones en microscopio electrónico.

La preparación de las muestras se realiza de la siguiente manera:

- Se calienta el cristal portamuestras a una temperatura tal que la resina epoxi se funde sobre este.
- Una vez se tiene la resina sobre el cristal, se distribuye homogéneamente el material sobre el mismo.
- Se deja enfriar la muestra el tiempo suficiente como para que se endurezca (tiempo en función de la cantidad de resina y material).

El equipo necesario para la obtención de muestras es el siguiente:

- Calentador **Severin 2000W**.



Ilustración 31. Calentador Severin 2000 W.

- Resina **Epoxi**.



Ilustración 32. Resina Epoxi.

Una vez transcurrido el tiempo de enfriado, se obtienen las siguientes muestras:

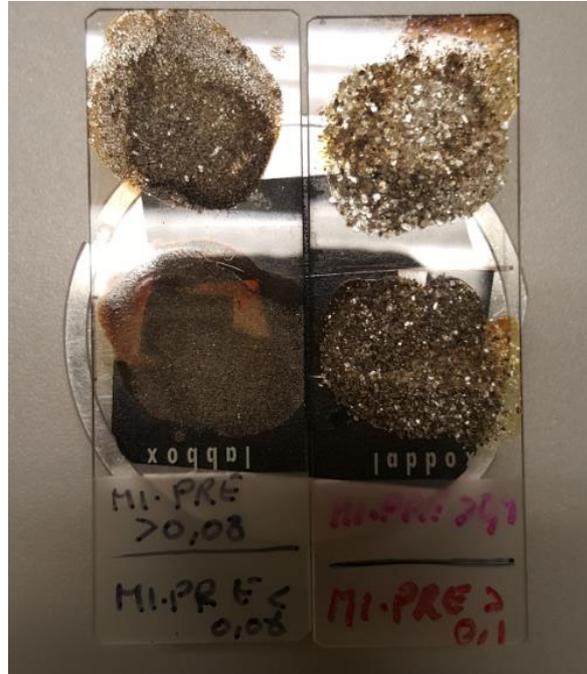


Ilustración 33. Muestras.

Como se observa en la imagen anterior, se han preparado cuatro muestras de diferentes granulometrías. De izquierda a derecha y de arriba abajo, estas coinciden con las granulometrías siguientes:

- Muestra 1: de 0,1mm a 0,08 mm.
- Muestra 2: menor de 0,08 mm.
- Muestra 3: de 1,5 mm a 0,4 mm.
- Muestra 4: de 0,4 mm a 0,1 mm.

3.5.3 Microscopía electrónica en las muestras

Con las muestras obtenidas se acude al microscopio electrónico para el cálculo de concentraciones y reconocimiento de minerales presentes.

El cálculo de los minerales presentes se realiza estadísticamente. Se superpone una malla a la muestra reconocida con el fin de obtener las concentraciones en cada una de las mallas. Posteriormente se calcula una media ponderada de las concentraciones.

Los cálculos realizados se observan a continuación.

Muestra 1:

Esta muestra se corresponde con la granulometría menor a 0,08 mm. Los resultados obtenidos de esta muestra son:

Tabla 2. Concentraciones de la muestra 1.

Muestra 1 (<0.08mm) [%]						MEDIA
Minerales	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	
<i>Cuarzo</i>	23.4	13.2	19.8	15.9	17.8	18.02
<i>Feldespato potásico</i>	25.6	26.5	30.2	22.3	26.3	26.18
<i>Mica Moscovita</i>	23.3	32.7	27.9	36.5	45.6	33.2
<i>Ilmenita</i>	27.7	27.6	22.1	25.3	10.3	22.6

A continuación se puede observa una imagen de la primera muestra con el recuadro de la malla muestreada.

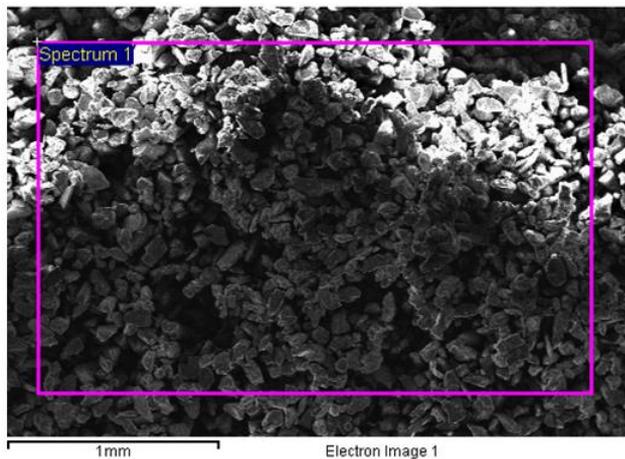


Ilustración 34. Muestra 1.

Muestra 2:

Esta muestra se corresponde con la granulometría 0,1-0,08 mm. Los resultados obtenidos de esta muestra son:

Tabla 3. Concentraciones de la muestra 2.

Muestra 2 (0.1-0.08 mm) [%]						MEDIA
Minerales	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	
<i>Cuarzo</i>	13.4	15.3	9.5	11.2	12	12.28
<i>Feldespato potásico</i>	10	9.7	11.3	22.3	7.9	12.24
<i>Mica Moscovita</i>	55.3	61	62.3	47.3	55.6	56.3
<i>Ilmenita</i>	21.3	14	16.9	19.2	24.5	19.18

A continuación se puede observa una imagen de la segunda muestra analizada.

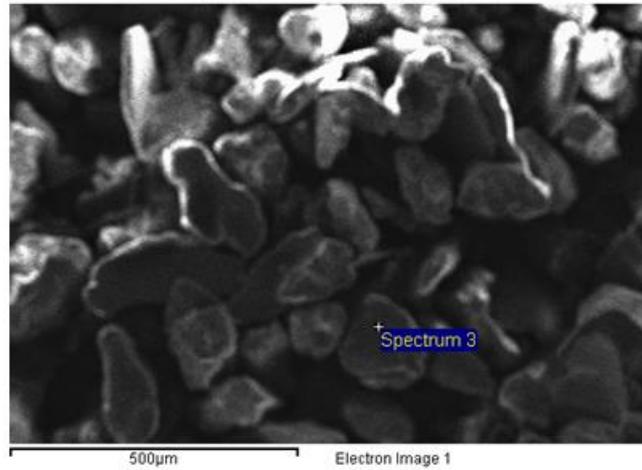


Ilustración 35. Muestra 2.

Muestra 3:

Esta muestra se corresponde con la granulometría 0,4-0,1 mm. Los resultados obtenidos de esta muestra son:

Tabla 4. Concentraciones de la muestra 3.

Muestra 3 (0.4-0.1 mm) [%]						MEDIA
Minerales	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	
<i>Cuarzo</i>	11.3	21.7	15.2	19.8	23.1	18.22
<i>Feldespato potásico</i>	9.2	9.9	23.1	17.9	11.4	14.3
<i>Mica Moscovita</i>	63	53.1	47	55.3	57.4	55.16
<i>Ilmenita</i>	16.5	15.3	14.7	7	8.1	12.32

A continuación se puede observa una imagen de la tercera muestra analizada.

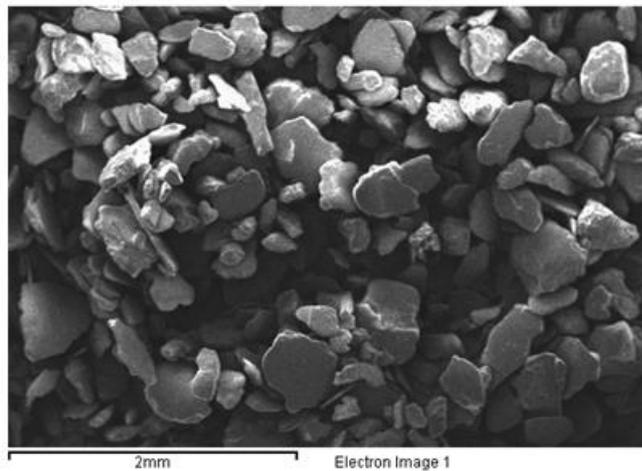


Ilustración 36. Muestra 3.

Muestra 4:

Esta muestra se corresponde con la granulometría 1,5-0.4 mm. Los resultados obtenidos de esta muestra son:

Tabla 5. Concentraciones de la muestra 4.

Muestra 4 (1.5-0.4) [%]						MEDIA
Minerales	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	
<i>Cuarzo</i>	22.1	25.7	17.9	15.9	23.7	21.06
<i>Feldespato potásico</i>	11.3	13.4	10.3	12.3	9.8	11.42
<i>Mica Moscovita</i>	60.7	53.2	59.7	57.8	53.8	57.04
<i>Ilmenita</i>	5.9	7.7	12.1	14	12.7	10.48

A continuación se puede observa una imagen de la cuarta muestra con el recuadro de la malla muestreada.

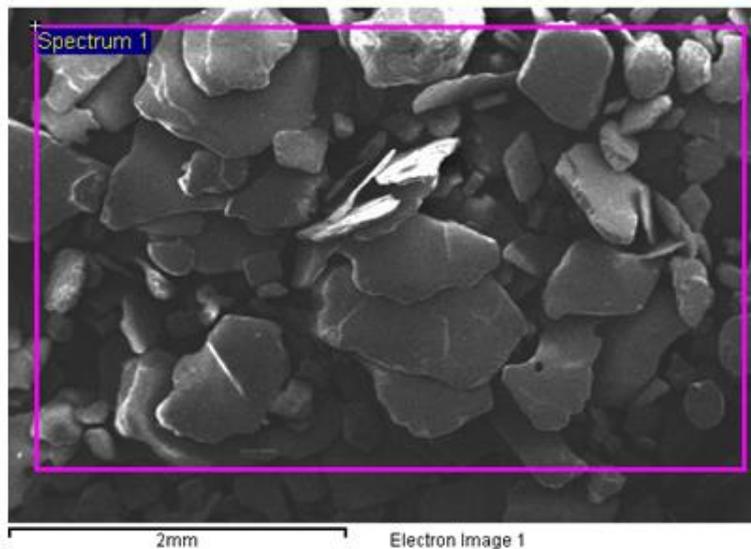


Ilustración 37. Muestra 4.

Premisas a tener en cuenta:

- Para granulometrías superiores a 1.5 mm, visualmente se apreciaba un alto contenido en cuarzo y feldespato y bajo en mica moscovita, por lo que no se tiene en cuenta para el cálculo y dimensionamiento de la planta.



Ilustración 38. Granulometría superior a 1.5 mm.

- Por debajo de la muestra 1 se envía a colas por su bajo contenido en mica.
- Las muestras 2 y 3, se enviarán a un proceso de separación magnética por su alto contenido en ilmenita.
- La muestra 4, tiene bajos contenidos en minerales magnéticamente separables por lo que directamente se pasa a una concentración gravimétrica la cual elimina por densidad los bajos contenidos de ilmenita.

Posteriormente se ha procedido al ensayo den laboratorio de los niveles de concentración, usando los siguientes aparatos:

- Mesa de sacudidas Wiffley.
- Concentrador magnético en seco.

Con todo ello se ha comprobado que para las granulometrías:

- **Mayor de 1.5 mm.** El rechazo de la criba se envía desecha como estéril con un alto contenido el cuarzo y escasa concentración en mica.
- **Corte entre 1.5 y 0.4 mm.** Este material solo necesita de un paso por mesa de sacudidas, donde se eliminan los materiales ligeros que en su mayoría son cuarzo y feldespato, llegando a las concentraciones deseadas en mica.
- **Corte entre 0.4 y 0.08 mm.** Este corte requiere una etapa de separación magnética para la eliminación del mineral de ilmenita, seguido de los pasadas por mesa de sacudidas para la eliminación de las fracciones más ligeras de cuarzo y feldespato potásico y consiguiendo así las concentraciones requeridas en mica moscovita.

4 Cálculo y diseño de planta

4.1 Diseño de la planta de tratamiento para cumplir las especificaciones

Se diseña una planta de tratamiento para mica proveniente de un proceso de flotación para la obtención de arenas feldespáticas. El proceso de tratamiento es el que se observa en la imagen siguiente.

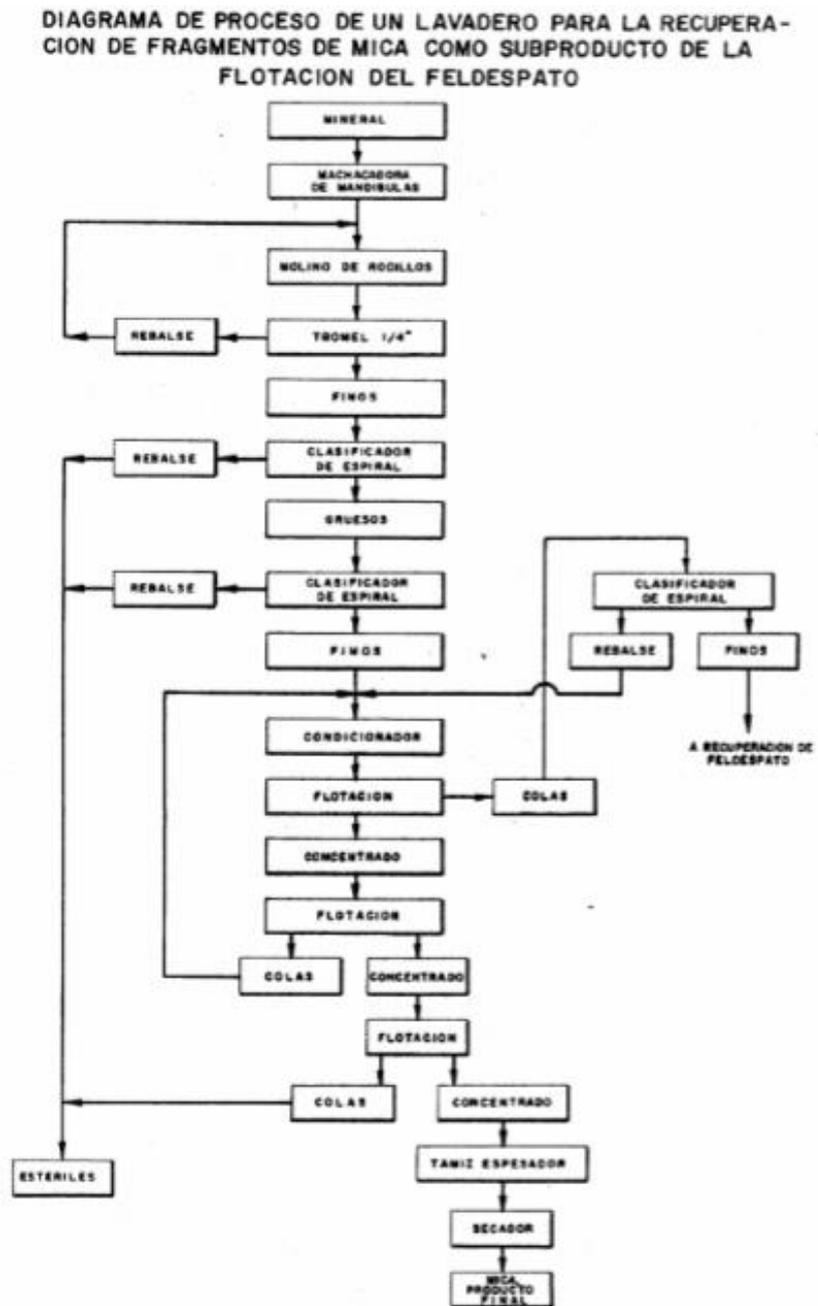


Ilustración 39. Sinóptico del proceso de flotación de arenas feldespáticas (Especificaciones y clasificaciones de las rocas industriales).

Este material proveniente de flotación es requerido por una industria de carga de pinturas, la cual demanda unas **especificaciones concretas**.

- La granulometría requerida está comprendida entre 1.5 mm y 0.08 mm.
- Las concentraciones necesarias por la industria son de 89,5% de mica.
- Las concentraciones de óxidos contaminantes no deben superar el 0,9%. Este porcentaje se corresponde con los minerales siguientes:
 - Ilmenita.
 - Magnetita.
 - Hematite.
 - Óxidos de magnesio.
- Las concentraciones de cuarzo y feldespato, respectivamente no han de superar el 5% y 3%.

Para obtener el material con las especificaciones necesarias, se ha diseñado el siguiente esquema de planta de beneficio.

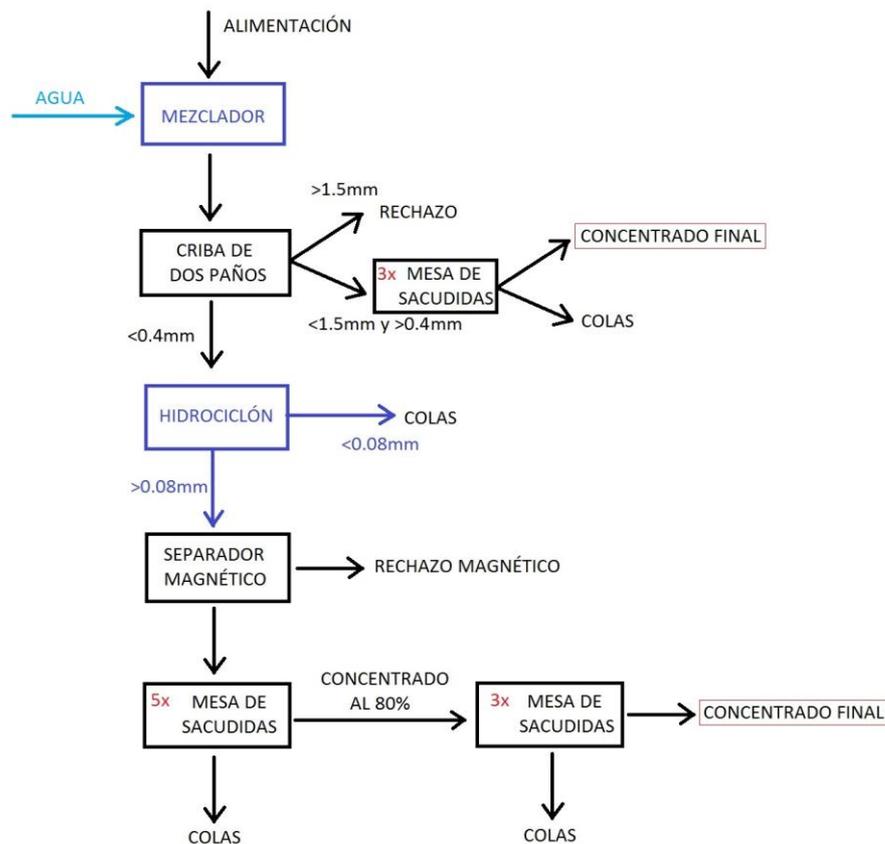


Ilustración 40. Esquema de la planta de beneficio.

4.2 Simulación con MODSIM

El software utilizado para la realización de la simulación de la planta es MODSIM (Modular simulator for ore dressing plant).

Este programa fue desarrollado a la vista de los buenos resultados obtenidos por el simulador de plantas de flotación del programa de investigación Mintek's Chemical Engineering Research Group del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Natal (Durban-Sudáfrica).

Este simulador calcula principalmente:

- Los balances de masa de agua y sólidos.
- Granulometría de los sólidos.
- Composición de partículas.

Para realizar la simulación con este software se tiene en cuenta todo lo anteriormente descrito sobre el material.

Se diseña una planta de tratamiento 100 t/h para la obtención de un producto limpio y concentrado de micas.

El menú de MODSIM cuenta con 5 opciones principales, cada una de las cuales con una aplicación específica.



Ilustración 41. Pantalla de Inicio del MODSIM.

- *File*: crear nuevos archivos, abrir los existentes, o guardar los cambios realizados en uno.
- *Edit*: realizar las distintas líneas de conexión entre los equipos, se borran o desplazan. También es posible realizar anotaciones en el flowsheet.
- *Select*: donde se encuentran todos los equipos disponibles por el software (machacadoras, hidrocilones, separadores densimétricos, jig, ...).
- *Run*: para realizar la simulación de la planta una vez acabados los cálculos.
- *Help*: se accede a las ayudas del sistema.

Con la ayuda de estos menús se caracteriza la planta de beneficio, teniendo en cuenta que se debe hacer en cierto orden:

- **Dibujar el esquema de la planta de tratamiento:**

Con la opción de select se eligen de una biblioteca los equipos necesarios y se unen mediante líneas de flujo.

- **Caracterizar el material a tratar:**

Donde se insertan las características mineralógicas, granulométricas, propiedades físicas, leyes y otras características del material.

También se caracterizan todas las líneas de flujo del sistema.

- **Caracterizar los equipos seleccionados:**

Se seleccionan los modelos de cada uno de los equipos y se introducen las características de cada uno de ellos.

- **Simular la planta y obtener resultados:**

Una vez caracterizado el material y la planta se simula la instalación, obteniendo los caudales de cada corriente. Así mismo se obtienen las curvas granulométricas de cada una de las corrientes y las composiciones.

En este caso en concreto se ha diseñado el siguiente esquema de tratamiento para la concentración de micas, como se explicó en los apartados anteriores.

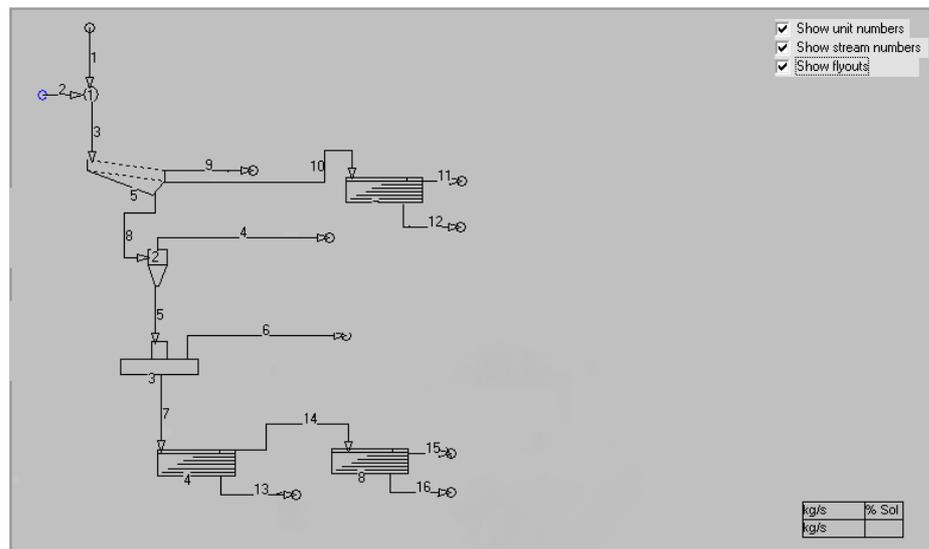


Ilustración 42. Esquema de la planta de tratamiento inicial.

El material tratado se caracteriza teniendo en cuenta las especies mineralógicas presentes, así como sus densidades y otros parámetros como las concentraciones presentes de cada especie. Esto se observa en la imagen siguiente.

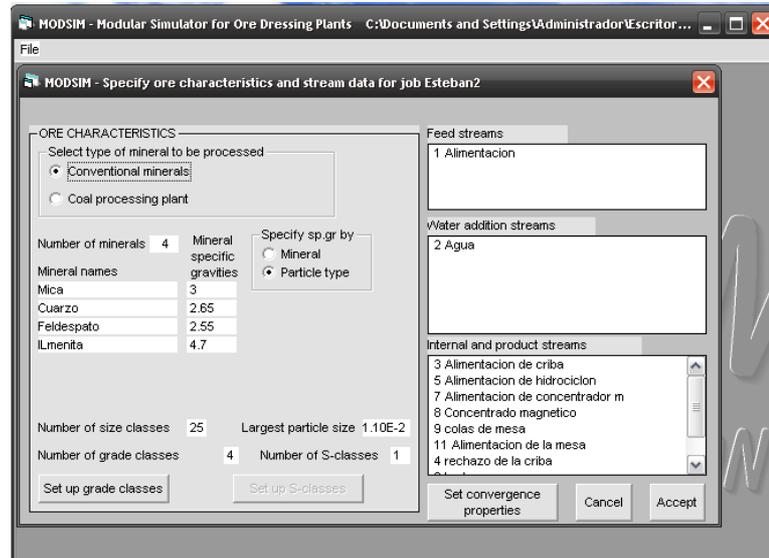


Ilustración 43. Caracterización del material en MODSIM.

También se caracteriza la corriente de alimentación, teniendo en cuenta la granulometría de esta, es decir con su curva granulométrica. Esta se observa en la imagen siguiente.

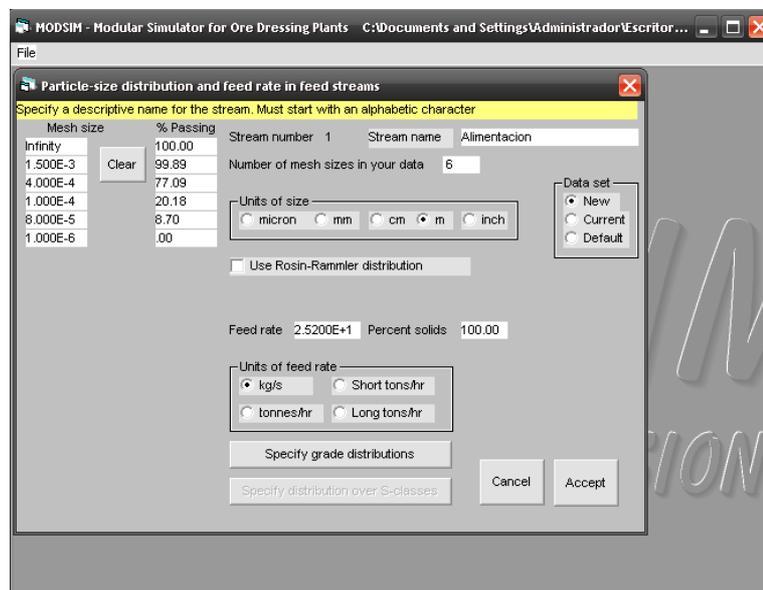


Ilustración 44. Caracterización granulométrica y de capacidad de la corriente de alimentación.

Los equipos se han caracterizado de acuerdo a las necesidades siguientes:

- **Criba:**
La cual cuenta con dos paños con los cortes de 1.5mm y 0.4mm.
- **Mesa de sacudidas:**

Donde se trata la granulometría 1.5-0.4 mm procedente de la criba anterior. Esta mesa de sacudidas simula una batería de tres mesas en paralelo (por razones de capacidad).

- **Hidrociclón:**

Trata la granulometría menor de 0.4 mm procedente de la criba, para realizar un deslamado a 0.08 mm.

- **Separador magnético:**

Que separa la ilmenita debido a su carácter magnético. Trata la corriente 0.4-0.08 mm procedente del hidrociclón.

- **Mesa de sacudidas:**

Se tienen dos bancos de mesas de sacudidas simulando, la primera un banco de 5 mesas en paralelo y la segunda un banco de 3 mesas en paralelo (por razones de capacidad).

Por lo tanto se obtiene el siguiente esquema de planta con los resultados pertinentes de caudales de las corrientes:

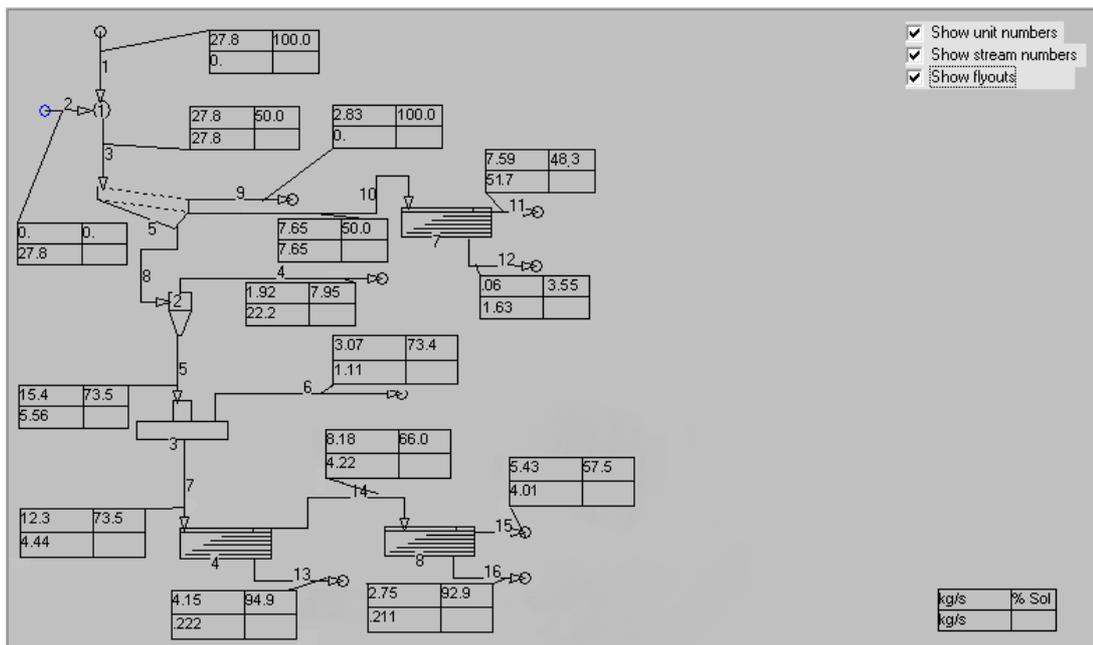


Ilustración 45. Esquema de la planta de tratamiento con los flujos resultado.

En los cuadros que caracterizan las corrientes, los parámetros mostrados con los siguientes:

Tabla 6. Resultados del MODSIM de las corrientes de la planta.

<i>kg/s de Material</i>	<i>% de Sólidos</i>
<i>kg/s de Agua</i>	-

Las curvas granulométricas obtenidas de los productos son las siguientes:

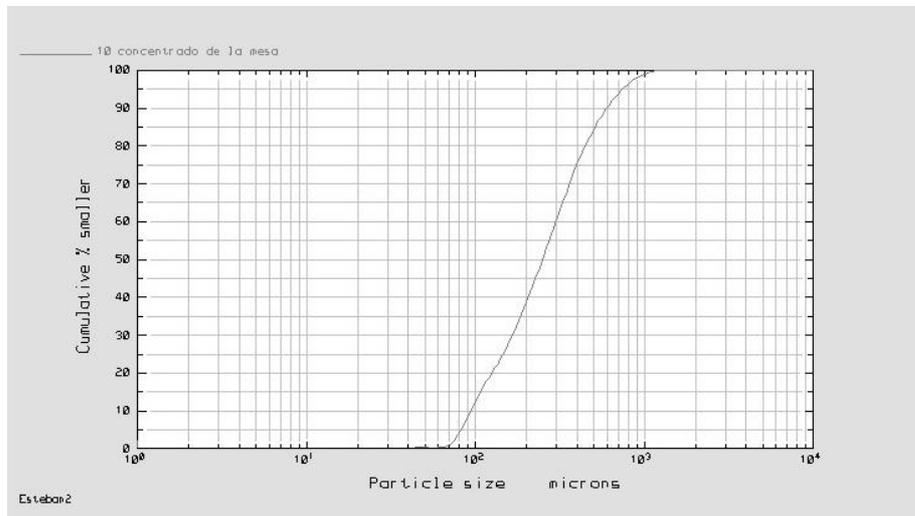


Ilustración 46. Curva granulométrica del producto obtenido en la primera batería mesas de sacudidas.

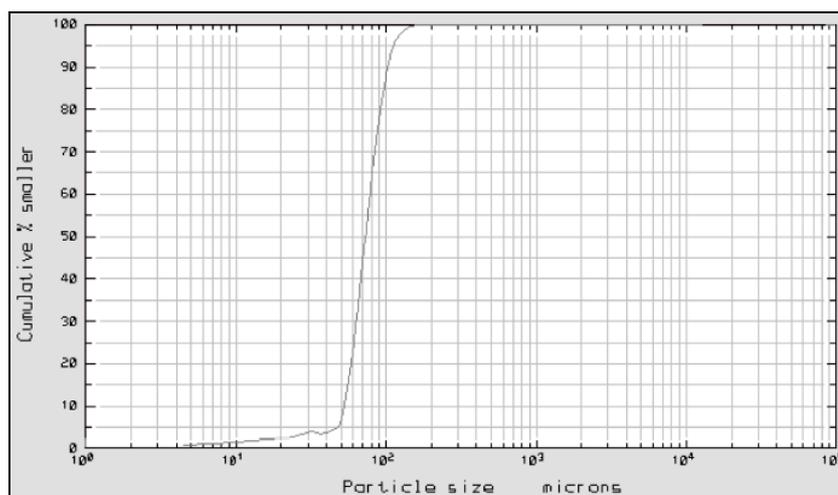


Ilustración 47. Curva granulométrica del producto obtenido en la tercera batería mesas de sacudidas.

Las corrientes que se obtienen son las siguientes:

Tabla 7. Resultados de las corrientes.

Corriente	kg/s	t/h
<i>Alimentación</i>	27.8	100
<i>Rechazo de la criba (> 1.5mm)</i>	2.83	10.18
<i>Rechazo de la criba (< 1.5 >0.4mm)</i>	7.65	27.52
<i>Rechazo de la criba (<0.4mm)</i>	17.32	62.30
<i>Overflow del hidrociclón (<0.08mm)</i>	1.92	6.9
<i>Underflow del hidrociclón (<0.4 >0.08mm)</i>	15.4	55.4
<i>Concentrado magnético</i>	3.07	11.04
<i>Alimentación de la 1ª mesa</i>	12.3	44.24
<i>Alimentación de la 2ª mesa</i>	8.18	29.42
<i>Colas totales</i>	11.95	53.17
<i>Producto total de concentrados</i>	13.02	46.83

5 Estudio económico

Para la realización del cálculo de la viabilidad económica del proyecto, se tienen en cuenta todos los gastos e ingresos generados por estas.

Ingresos: los productos obtenidos son los siguientes, con sus correspondientes valores de mercado.

Producto (mm)	Precio (€/t)
1.5 – 0,08 mm	350

Producto	<i>Mica moscovita concentrada</i>	46.83 t/h	193.764,8 €/año
-----------------	-----------------------------------	-----------	-----------------

Ilustración 48. Ingresos del proyecto.

Inversión de la instalación: debido a la obra civil y los equipos requeridos por la planta de tratamiento.

Concepto	Inversión	Periodo de Amortización
Obra civil e instalaciones auxiliares.	750000€	5 años
Criba	50000 €/ud	5 años
Hidrociclón	20.000 €/ud	5 años
Mesa de sacudidas (11)	3000 €/ud	5 años
Total 170600€/año		

Ilustración 49. Inversiones.

Costes de operación: debidos a la mano de obra, la energía, mantenimiento, repuestos y materiales.

<i>Personal</i>	<i>Plantilla</i>	<i>Nómina mensual/cargo (€)</i>	<i>Nómina anual total (€)</i>
Técnico de planta	1	3500	42000 €/año
Técnico de laboratorio	1	3500	42000 €/año
Peón especialista	6	2500	180000 €/año
Total	8	-	264000 €/año

Días laborables en el año	202 días
Horas de trabajo efectivo anual	1.735 horas
Precio de la energía	0,14 €/kWh
Consumo de la instalación	100 kW
Gasto total de energía al año	24.290 €/año

Contrato de mantenimiento	1.000 €/mes
Valor medio de repuestos y materiales	2.000€/incidencia (3 anuales)
Total de mantenimiento y repuestos	18.000 €/año

Ilustración 50. Costes de operación.

Otros costes: debidos a permisos y el sistema de prevención.

Servicio de Prevención de Riesgos Laborales	324,55 €/año
Permiso de apertura y puesta en marcha	10.000 €
Materia prima (100 t/h)	520.500 €/año

Ilustración 51. Otros costes.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se calcula la rentabilidad. Existen varios métodos para determinar la viabilidad del proyecto, de entre todos se seleccionan:

- Criterio del Valor Actualizado Neto, VAN.
- Criterio de la Tasa Interna de Rentabilidad, TIR.

En los apartados siguientes se realizan los cálculos pertinentes.

5.1 VAN

El VAN es el índice más utilizado para el cálculo de rentabilidades de proyectos. Es el valor actualizado neto, que se calcula como el valor de un número de flujos de caja originados por una inversión.

FLUJO CAJA	$-I_0$	$Q_1 = C_1 - P_1$	$Q_2 = C_2 - P_2$	$Q_n = C_n - P_n$
TIEMPO	0	1	2	n

Ilustración 52. Caja de flujos para el VAN.

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Q_t : flujos de caja en cada periodo t
 I_0 : desembolso inicial de la inversión
 n : número de periodos
 k : tipo de interés, tasa de descuento

Ilustración 53. Fórmula de cálculo para el VAN.

- **VAN > 0**: La rentabilidad de la inversión será mayor de la esperada (mayor que la tasa de descuento).
- **VAN = 0**: la rentabilidad de la misma será igual que la tasa de descuento utilizada.
- **VAN < 0**: La rentabilidad es menor que la tasa de descuento.

Se ha realizado el estudio económico para una vida útil de 15 años, donde en los primeros 5 años se amortizan las máquinas. La tasa de descuento utilizada es del 8%.

AÑOS	0	1	2	3	4	5
Desembolso inicial (-)	10000	0	0	0	0	0
Ingresos (+) (4%)	0	31469760	32728550.4	34037692.4	35399200.11	36815168.1
Pagos totales (-)	0	36275230.6	36285779.55	36288671.5	36291852.54	36295351.7
*Materia prima (cte)	0	35965440	35965440	35965440	35965440	35965440
*Personal (3%)	0	264000	271920	271920	271920	271920
*Mantenimiento (cte)	0	18000	18000	18000	18000	18000
*Energía (10%)	0	26290	28919	31810.9	34991.99	38491.189
*Servicio de prevención (cte)	0	1500.55	1500.55	1500.55	1500.55	1500.55
Amortización instalacion y equipos (-)	0	200600	200600	200600	200600	200600
(=) BAT (benef. Antes de impuestos)	0	-5006070.55	-3757829.15	-2451579.03	1093252.427	319216.378
Tributos (-) 35%	0	-1501821.17	-1127348.745	-735473.71	327975.7282	95764.9134
(=) Flujo neto de caja	-10000	-3504249.39	-2630480.405	-1716105.32	765276.6992	223451.465
FLUJO ACTUALIZADO	-10000	-3369470.56	-2432027.002	-1525611.38	654161.7297	183660.816

Ilustración 54. Cálculo del VAN para los 5 primeros años.

AÑOS	6	7	8	9	10
Desembolso inicial (-)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ingresos (+) (4%)	38287774.84	39819285.84	41412057.27	43068539.56	44791281.14
Pagos totales (-)	36299200.86	36303434.89	36308092.32	36313215.5	36318850.99
*Materia prima (cte)	35965440	35965440	35965440	35965440	35965440
*Personal (3%)	271920.00	271920.00	271920.00	271920.00	271920.00
*Mantenimiento (cte)	18000.00	18000.00	18000.00	18000.00	18000.00
*Energía (10%)	42340.31	46574.34	51231.77	56354.95	61990.44
*Servicio de prevención (cte)	1500.55	1500.55	1500.55	1500.55	1500.55
Amortización instalacion y equipos (-)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(=) BAT (benef. Antes de impuestos)	1988573.984	3515850.947	5103964.946	6755324.06	8472430.147
Tributos (-) 35%	596572.1952	1054755.284	1531189.484	2026597.218	2541729.044
(=) Flujo neto de caja	1392001.789	2461095.663	3572775.462	4728726.842	5930701.103
FLUJO ACTUALIZADO	1100119.233	1870230.434	2610592.035	3322340.755	4006569.161

Ilustración 55. Cálculo del VAN para los años del 6 al 10.

AÑOS	11	12	13	14	15
Desembolso inicial (-)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ingresos (+) (4%)	46582932.39	48446249.68	50384099.67	52399463.66	54495442.2
Pagos totales (-)	36325050.04	36331868.99	36339369.83	36347620.76	36356696.78
*Materia prima (cte)	35965440	35965440	35965440	35965440	35965440.00
*Personal (3%)	271920.00	271920.00	271920.00	271920.00	271920.00
*Mantenimiento (cte)	18000.00	18000.00	18000.00	18000.00	18000.00
*Energía (10%)	68189.49	75008.44	82509.28	90760.21	99836.23
*Servicio de prevención (cte)	1500.55	1500.55	1500.55	1500.55	1500.55
Amortización instalacion y equipos (-)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(=) BAT (benef. Antes de impuestos)	10257882.35	12114380.7	14044729.84	16051842.9	18138745.42
Tributos (-) 35%	3077364.705	3634314.209	4213418.952	4815552.869	5441623.627
(=) Flujo neto de caja	7180517.644	8480066.487	9831310.887	11236290.03	12697121.8
FLUJO ACTUALIZADO	4664327.34	5296624.508	5904430.551	6488677.515	7050261.02

Ilustración 56. Cálculo del VAN para los años del 11 al 15.

Se ha obtenido un valor de VAN:

$VAN = 18.484.962.20$ euros

Se han graficado los resultados obtenidos:

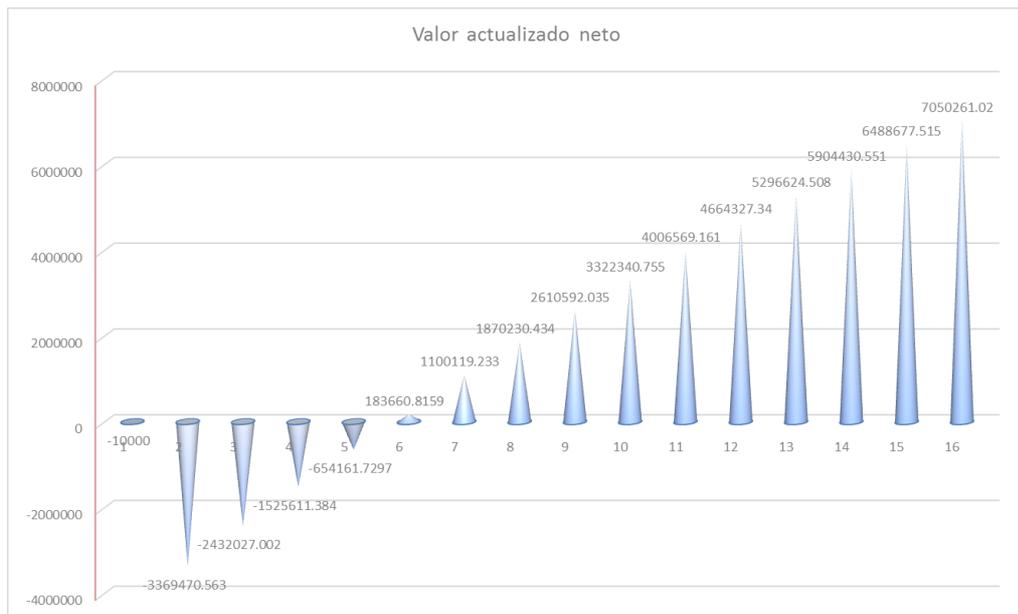


Ilustración 57. Gráfico de rentabilidad anual, VAN.

Se han tenido en cuenta los factores que afectan a la rentabilidad en el cálculo del VAN:

- **Variación en el precio de la materia prima.**

Se tiene en cuenta un valor constante de la materia prima, puesto que se parte de la idea de que la planta de beneficio es para una explotación de arena.

- **Variación en el precio de los productos y el volumen de tratamiento.**

Se tiene en cuenta un aumento anual del **4%**, entre las subidas de precio y el aumento de las ventas.

- **Variación en el precio de la energía.**

Se supone para el cálculo, un aumento anual del **10%** en la factura eléctrica.

- **Variación en el salario del personal.**

Se tiene en cuenta que el salario del personal de la planta asciende anualmente un 3%.

- **Variación en el precio del Sistema de Mantenimiento.**

Se toma como constante.

- **Variación en el precio del Sistema de Prevención.**

El precio del Sistema de Prevención de Riesgos Laborales se toma como constante debido a que se contratan los servicios en un contrato para 15 años al precio mencionado anteriormente.

- **Variación en la vida útil de la planta.**

El estudio económico se realiza para una vida útil de la planta de 15 años, en los cuales los flujos de caja son positivos, menos para los cinco primeros años, debido a las amortizaciones de los equipos.

5.2 TIR

El criterio del TIR, es la tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad. Este valor se puede tomar como un indicador de la rentabilidad del proyecto, puesto que a mayor TIR, mayor es la rentabilidad del proyecto.

Se calcula según la fórmula siguiente:

$$TIR \rightarrow 0 = \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Ilustración 58. Fórmula de cálculo para el TIR.

Se ha calculado también con la hoja de cálculo Excel.

Se ha obtenido un valor:

$$TIR = 20\%.$$

Para saber si la inversión necesaria para el proyecto es aceptada o no, se compara el valor del TIR con la tasa de descuento, en caso de que el TIR sea mayor que esta, la inversión de la planta de beneficio se acepta.

En este caso la tasa interna de retorno es mayor que la tasa de descuento ($20\% > 8\%$), por lo que se acepta la inversión económica de esta.

6 Conclusiones

Gracias a la realización del estudio `` Estudio técnico-económico de micas, subproducto de arenas feldespáticas'' se han obtenido ciertas conclusiones:

- El software MODSIM, ha resultado una herramienta de gran ayuda para calcular la viabilidad técnica y económica de la planta de tratamiento, en corto periodo de tiempo, antes de afrontar una inversión inicial.

Con ayuda de este programa ha permitido la realización de varias simulaciones hasta conseguir la óptima.

- La disponibilidad de los equipos de laboratorio ha servido de gran ayuda a la hora de decidir los equipos a utilizar en el diseño.
- Se ha diseñado una planta de tratamiento de 100 t/h de mica como subproducto de la flotación en arenas feldespáticas.

Se han cumplido las especificaciones requeridas por el consumidor, carga para pinturas.

- Por último se ha verificado la viabilidad económica de la planta diseñada. Los cálculos pertinentes se han realizado con ayuda de un hoja de cálculo.

Lista de referencias

- [1] Lista de referencias bibliográficas mencionadas en el texto, numeradas y colocadas en orden alfabético de su primer autor.
- [2] www.portalindustrial.com
- [3] http://www.smiththerm.com/natural_mica.html#
- [4] IGME, Estudio Económico y Tecnológico para la explotación y aprovechamiento de las rocas industriales. Tomo IX.
- [5] Celia Marcos Pascual. Mineralogía tema 27.5 filosilicatos.
- [6] Armando Álvarez Q. Tecnología de concentración centrífuga
- [7] Osvaldo Pavez. Concentración de minerales.
- [7] Manual de MODSIM.