Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional

Esta licencia permite a otras distribuir, combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial y, a pesar que son nuevas obras deben siempre rendir crédito y ser no comerciales, no están obligadas a licenciar sus obras derivadas bajo los mismos términos.

http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS Y METALURGIA

CONSTANCIA

N° 025-DI-MET-FIMM-2026

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de **TESIS** cuyo título es:

"ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE MOLIENDA EN LA GENERACIÓN DE LAMAS EN EL MINERAL SULFUROSO DESTINADO A LA FLOTACIÓN DE COBRE"

Presentado por:

PASACHE DE LA CRUZ AARON SAMUEL

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la **Escuela Profesional de Ingeniería Metalurgica**, de la Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia, de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 19%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. **En Ica 6 de abril de 2026.**

Atentamente,

.....

DR. VICTOR MANUEL FLORES MARCHAN
DIRECTOR DE INVESTIGACION DE LA FIMM

“UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUÍS GONZAGA”

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas y Metalurgia

Tesis**:**

Estudio experimental sobre la Influencia del tiempo de molienda en la generación de lamas en el mineral sulfuroso destinado a la flotación de cobre

Línea de investigación: conminución de minerales

AUTOR: PASACHE DE LA CRUZ AARON SAMUEL

NASCA – PERÚ
2025

DEDICATORIA

La presente Tesis esta dedica con todo amor y cariño a mis hijos Santiago y Cattaleya, ya que son el gran motivo que me impulsa a superarme cada día y ser un ejemplo para ellos, a mi esposa Guadalupe, mis padres Ermes y Mariela y mis hermanos, son ellos todo lo que tengo en la vida. Reconozco el gran apoyo que me brindaron para poder llegar hasta esta instancia de mis estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarme moral y económicamente.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar doy gracias a Dios por todo lo bueno y maravilloso que me ha pasado en la vida ,por permitirme tener una linda experiencia dentro de mi universidad ,agradezco a mi universidad por permitir convertirme en un profesional ,a cada docente que hizo parte de este proceso integral de formación y a todos los involucrados ,que dejan como resultado un profesional y como prueba viviente en la historia ,esta tesis ,que perdurará dentro de los conocimientos y desarrollo de las demás generaciones que están por llegar .

Finalmente agradezco a mi familia, compañeros de estudios, amigos y todos mis seres queridos por formar parte de este proceso.

INDICE DE CONTENIDOS

		Pág.
PORTADA		01
DEDICATORIA		02
AGRADECIMIENTO		03
ÍNDICE DE CONTENIDOS		04
ÍNDICE DE TABLAS		05
ÍNDICE DE FIGURAS		06
RESUMEN		07
ABSTRACT		08
I.	INTRODUCCIÓN	09
II.	ESTRATEGIA METODOLOGICA	12
	2.1. Antecedentes.	12
	2.2. Marco teórico.	13
	2.3. Marco conceptual.	22
	2.4. Estrategia metodológica.	23
	2.5. Procedimiento experimental.	23
III.	RESULTADOS.	31
IV.	DISCUSIÓN.	51
V.	CONCLUSIONES	52
VI.	RECOMENDACIONES.	53
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	54
VIII.	ANEXOS.	55

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tamices empleados en el análisis granulométrico del mineral.	29
Tabla 2. Composición química del mineral empleado.	31
Tabla 3. Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 10 minutos.	32
Tabla 4. Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 10 minutos.	33
Tabla 5. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 10 minutos.	34
Tabla 6. Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 14 minutos.	35
Tabla 7. Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 14 minutos.	36
Tabla 8. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 14 minutos.	37
Tabla 9. Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 18 minutos.	38
Tabla 10. Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 18 minutos.	39
Tabla 11. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 18 minutos.	40
Tabla 12. Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 22 minutos.	41
Tabla 13. Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 22 minutos.	42
Tabla 14. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 22 minutos.	43
Tabla 15. Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 26 minutos.	44
Tabla 16. Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 26 minutos.	45
Tabla 17. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 26 minutos.	46
Tabla 18. Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 30 minutos.	47
Tabla 19. Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 30 minutos.	48
Tabla 20. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 30 minutos.	49
Tabla 21. Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 30 minutos.	50

INDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Molino de bolas industrial mostrando el equipo de fuerza. 14
Figura 2. Esquema del mecanismo de molienda en un molino de bolas. 15
Figura 3. Diversos tipos de blindajes de molinos de bolas. 15
Figura 4. Forma como se aseguran los protectores al cilindro del molino. 16
Figura 5. Vista del interior de un molino mostrando los protectores y las bolas. 16
Figura 6. Esquematización del movimiento en cascada de las bolas. 17
Figura 7. Esquematización del movimiento en cataratas de las bolas del molino. 18
Figura 8. Molino de bolas de tipo cónico. 19
Figura 9. Vista de la formación de espuma en la superficie de la celda. 20
Figura 10. Proceso de la flotación de minerales con agitación mecánica. 20
Figura 11. Celda de flotación con agitación neumática. 21
Figura 12. Mecanismo de la flotación en celda de flotación neumática. 21
Figura 13. Foto de una criba vibradora de dos bandejas. 25
Figura 14. Cribado de un mineral. 26
Figura 15. Homogenización del mineral y formación del cono. 27
Figura 16. Procedimiento para obtener la muestra representativa. 27
Figura 17. Cuarteo del mineral en la práctica. 28
Figura 18. Procedimiento para tamizar. 29
Figura 19. Tamizaje por cascada. 30
Figura 20. Tamices en el sacudidor universal 30

RESUMEN

La presente investigación titulada "**Estudio experimental sobre la Influencia del tiempo de molienda en la generación de lamas en el mineral sulfuroso destinado a la flotación de cobre**" es un estudio teórico experimental, cuyo objetivo es determinar el efecto del tiempo de molienda en la generación de lamas o finos, para demostrar la hipótesis planteada se llevaron a cabo ensayos de molienda de un mineral de dureza mixta es decir que contenía minerales duros y minerales blando, sometido a molienda en varios tiempos que fueron: 10, 14, 18, 22, 26 y 30 minutos, después de lo cual se procedía a hacer el análisis granulométrico para determinar las fracciones de finos en malla # 200, 230, 270, 325 y 400 pudiéndose comprobar que a mayor tiempo de molienda es mayor la cantidad de finos o lamas que se produce alcanzando en 30 minutos el porcentaje promedio de 24,4% de material fino. Esto se debe a que para moler minerales duros como la pirita y el cuarzo se requiere de mayor tiempo para reducir sus partículas a dimensiones adecuadas.

PALABRAS CLAVES: Granulometría, mineral, molienda, sulfuros, lamas.

ABSTRACT

The present investigation entitled "Experimental study on the Influence of grinding time on the generation of slimes in the sulfide mineral intended for copper flotation" is a theoretical experimental study, whose objective is to determine the effect of grinding time on the generation of slimes or fines, to demonstrate the hypothesis raised, grinding tests were carried out on a mineral of mixed hardness, that is, containing hard minerals and soft minerals, subjected to grinding at various times which were: 10, 14, 18, 22, 26 and 30 minutes, after which the granulometric analysis was carried out to determine the fractions of fines in mesh # 200, 230, 270, 325 and 400, being able to verify that the longer the grinding time, the greater the amount of fines or slimes that are produced, reaching in 30 minutes the average percentage of 24.4% of fine material. This is because grinding hard minerals such as pyrite and quartz takes longer to reduce their particles to suitable sizes.

KEY WORDS: Granulometry, mineral, grinding, sulfides, mud.

I. INTRODUCCIÓN

Los minerales compuestos por sulfuros, llamados generalmente minerales sulfurosos o simplemente minerales refractarios, en su composición química poseen especies mineralógicas diversas las mismas que poseen propiedades físicas diferentes, entre ellas la dureza que, sin duda, constituye una de las propiedades más importantes durante el tratamiento físico del mineral, nos referimos al chancado y molienda. Los minerales sulfurosos de cobre son generalmente un conglomerado de sulfuros que involucran sulfuros de cobre, plomo, zinc, hierro, aluminio, etc, los cuales tienen diferente dureza, siendo las piritas las que generalmente presentan una alta dureza que supera el valor de 5 en la escala de Mohs, entre ellas la pirita (FeS2) cuya dureza alcanza los 6 a 6,5, Marcasita FeS2 (6-6,5), Arsenopirita FeAsS (5,5 – 6) además de estos sulfuros se encuentra el cuarzo SiO2 (7) y en ocasiones minerales oxidados de hierro como la hematita Fe2O3 de dureza 5 – 6,6 y la magnetita Fe3O4 de dureza 5- 6,5. La presencia y cantidad de minerales de dureza mayor a 5 requieren de mayor tiempo para lograr la granulometría adecuada, pero durante ese tiempo los minerales blandos, es decir aquellos que tienen dureza menor a 4 y que fácilmente se fragmentan, rápidamente pasan a ser partículas con una dimensión equivalente a la malla # - 400, considerados como finos o lamas.

Situación problemática.

La flotación de cobre como de cualquier otro metal incluido en los llamados minerales polimetálicos requieren de una granulometría adecuada para que el proceso se lleve con eficiencia, generalmente en las plantas de beneficio dedicadas a la flotación de sulfuros de cobre emplean minerales que han sido reducidos de tamaño hasta la malla # 150 o Malla # 200, ya que este diámetro de partícula se considera adecuado, sin embargo, como se sabe los minerales sulfurosos están asociados a las piritas, al cuarzo, los cuales son minerales duros que requieren de un mayor tiempo de molienda lo que ocasiona que los minerales blandos durante este proceso se pulvericen a una granulometría inferior de la malla # 400, lo cual convierte a gran parte del mineral en lamas o finos, los cuales ofrecen serias dificultades en la flotación y una gran pérdida de material valioso, que no se puede flotar y pasa junto con el material inerte al relave.

Problema de investigación.

Problema general.

¿Es posible desarrollar un estudio experimental sobre la Influencia del tiempo de molienda en la generación de lamas en el mineral sulfuroso destinado a la flotación de cobre?

Problemas específicos.

- ¿Cuál es la granulometría más adecuada para llevar a cabo la flotación de minerales sulfurosos de cobre?
- ¿Cómo afecta el tiempo de molienda a la granulometría del mineral sulfuroso de cobre?

Objetivos de la investigación.

Objetivo General.

Desarrollar un estudio experimental sobre la Influencia del tiempo de molienda en la generación de lamas en el mineral sulfuroso destinado a la flotación de cobre.

Objetivos específicos.

- Determinar la granulometría más adecuada para llevar a cabo la flotación de minerales sulfurosos de cobre.
- Establecer cómo afecta el tiempo de molienda a la granulometría del mineral sulfuroso de cobre.

Hipótesis y variables de la investigación.

Hipótesis.

Hipótesis general.

El desarrollo de un estudio experimental sobre la Influencia del tiempo de molienda en la generación de lamas en el mineral sulfuroso destinado a la flotación de cobre si es posible.

Hipótesis específicas.

- **La** granulometría más adecuada para llevar a cabo la flotación de minerales sulfurosos de cobre, es la correspondiente a la malla # 200.
- **E**l tiempo de molienda afecta negativamente a la granulometría del mineral sulfuroso de cobre.

Variables:

Variable independiente:

Tiempo de molienda

Variable dependiente.

Generación de lamas.

Justificación e importancia de la investigación.

Justificación teórica:

Teóricamente la presente investigación se justifica porque aborda el estudio del tiempo de molienda relacionado con los efectos adversos que puede tener cuando el material es mixto teniendo minerales duros como la pirita y el cuarzo y minerales blandos como la calcopirita y otros, pasando este último a ser muy fino y por tanto afecta la recuperación del cobre.

Justificación metodológica:

Desde el punto de vista metodológico, el estudio aplicará el método científico para desarrollar una investigación de diseño experimental, en la que se llevarán a cabo ensayos a partir de los cuales se establecerá el tiempo adecuado de molienda para evitar la generación de finos.

Justificación social:

Desde el punto de vista social, el hecho de mejorar la eficiencia en la recuperación de cobre influye en la rentabilidad de la empresa, que en definitiva servirá para mejorar el estándar de vida de los dueños de la empresa y de los trabajadores que en ella laboran.

Justificación práctica:

Desde el punto de vista práctico, el estudio plantea la necesidad de controlar el tiempo de molienda evitando los finos y pérdidas de cobre durante el proceso de flotación.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Antecedentes.

A nivel internacional:

En el año 2018, Restrepo, G., presentó su tesis titulada: Estudio experimental para seleccionar el diámetro de partícula más conveniente para la flotación de sulfuros de cobre, a la Universidad nacional de Colombia, cuyo objetivo es hacer un estudio comparativo entre minerales de diversas granulometrías para establecer el diámetro que favorece una mejor recuperación del cobre. La investigación es aplicada, explicativa y de diseño experimental. Las pruebas realizadas permitieron identificar que las partículas que mejor se comportaban durante la flotación fueron las que pasan por la malla 200.

En el año 2019, Rengifo, A., presentó su tesis titulada: Efecto de las partículas finas en la flotación de sulfuros de cobre, a la Universidad Nacional de Argentina, cuyo objetivo fue establecer las ventajas y desventajas de las partículas finas de sulfuros durante la flotación. Los ensayos realizados por el autor indican que durante la flotación por espuma, las partículas finas se sedimentan en el fondo de la celda y no se flotan reteniendo consigo al metal, por lo que hay mucha pérdida en el concentrado. El autor concluye que es necesario llevar a cabo la molienda de tal forma que no haya una sobre molienda del mineral.

. **A nivel nacional:**

En el año 2018, Salas, R y Pocco, J., presentaron su tesis titulada: Recuperación de cobre por flotación de los minerales sulfurados del yacimiento Catanga, a la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, cuyo objetivo fue establecer las variables adecuadas para el proceso de flotación, entre ellos la granulometría de ls partículas que se obtienen e el proceso de conminución. Los ensayos de flotación que realiza el autor están muy ligadas al control de la molienda, por lo que se hace un minucioso control del diámetro de las partículas de mineral empleado en cada ensayo de flotación. Los resultados obtenidos indican que el mineral con granulometría de malla entre -150 y -200, permite una mejor recuperación de cobre.

En el año 2019, Ramírez, R., presentó su tesis titulada: Preparación física de los minerales sulfurosos de cobre para la flotación por espuma empleando xantato Z-4 como colector, a la Universidad Nacional Del Centro, Huancayo, cuyo objetivo fue establecer la granulometría adecuada de las partículas del mineral que van a formar parte de la carga de las celdas de flotación, La investigación es aplicada, explicativa de diseño experimental. Para demostrar la validez de la hipótesis se realizaron los ensayos correspondientes con diferentes diámetros de partícula, considerando un límite entre malla -150 y -400. El resultado del trabajo indica que la malla -150 es la más adecuada para lograr óptimos resultados en la recuperación del cobre.

A nivel local.

No existe registro alguno sobre investigaciones relacionadas con el tema que se desarrolla en el presente proyecto en las Universidades locales.

2.2. Marco teórico.

Con el fin de obtener una granulometría adecuada del mineral y conseguir una máxima recuperación del cobre, es necesario abordar el tratamiento preliminar del mineral, que incluye el chancado y la molienda. Dichas operaciones son fundamentales para reducir el tamaño de los trozos y partículas del mineral, aumentando así su superficie de contacto y permitiendo la liberación de las especies mineralógicas que contienen el cobre. En cuanto a la molienda reduce el tamaño del material hasta alcanzar la granulometría deseada, utilizando aparatos que operan por choques, aplastamiento o desgaste. La molienda es la etapa que los minerales valiosos son liberados y pueden separarse de otros componentes. La carga destinada a ingresar al molino para su pulverización tiene un tamaño uniforme, procedente del chancado, etapa en la que el mineral adquiere un tamaño adecuado, no mayor de una pulgada (25,4 milímetros). El mineral que sale de los molinos varía de tamaño entre malla 100 (147 micrones) y malla 200 (74 micrones). El chancado y la molienda no producen un material uniforme. Hay partículas de diversos diámetros, predominando las más finas, lo que puede afectar el proceso por varias razones.

Tener finalmente un mineral molido con el diámetro adecuado y sin exceso de finos requiere la regulación óptima de todos los parámetros, lo cual resulta difícil tanto desde el punto de vista experimental como industrial. Cuando esto se da se busca disminuir la cantidad de finos en las moliendas, lo que a menudo requiere moler a una malla mayor, como 100 o 150. Esto puede evitar la recuperación del metal durante la flotación, similar a cuando hay muchos finos en el producto molido dirigido a la celda de flotación.

Conseguir una molienda del mineral de manera óptima, requiere operar el molino bajo condiciones ideales. Hay que dosificar la cantidad de mineral y agua para una densidad adecuada de pulpa, ajustar la velocidad de rotación del molino para un choque efectivo de los medios de molienda, mantener las bolas por debajo del 45% de la carga total y asegurar la potencia de motor requerida.

Cuando se lleva a cabo una molienda fina se libera más metal del mineral, pero consume más energía y aumenta los costos. Reducir la granulometría mejora la superficie de contacto del metal y los sulfuros, facilitando su flotación por espuma. La gran cantidad de finos hace que el mineral molido se hunda en la celda, compactándose y evitando contacto con las burbujas de aire. Esto provoca la pérdida de metal, más denso, en el relave del mineral. Para maximizar la recuperación, es necesario regular los parámetros de flotación.

La eficiencia de la molienda depende de varios parámetros, como:

- Alimentar con mineral de granulometría adecuada (no superior a una pulgada de diámetro).
- Seleccionar la velocidad crítica del molino.

- Selección del diámetro de las bolas para el molino.
- Diseño de los revestimientos del molino asegurando que puedan levantar las bolas y el mineral a la altura adecuada para una buena molienda.
- Cálculo y selección del tamaño y cantidad de bolas para la molienda.

Cumplir con estas exigencias implica la regulación de uno en función de los otros. No se puede ajustar uno sin considerar los demás factores, ya que no llevaría a un resultado adecuado. Esto hace que la molienda sea una operación compleja que debe ser realizada por personal capacitado con experiencia, dado que su éxito influye en la flotación de minerales.

Uno de los principales equipos de la sección de molienda es el molino de bola el cual es un cilindro horizontal que rota a velocidad controlada. Se cubren internamente con protectores de acero para evitar corrosión y desgaste. Estos protectores también sostienen y elevan las bolas para asegurar un choque efectivo y reducir el tamaño del mineral.



Figura 1. Molino de bolas industrial mostrando el equipo de fuerza.

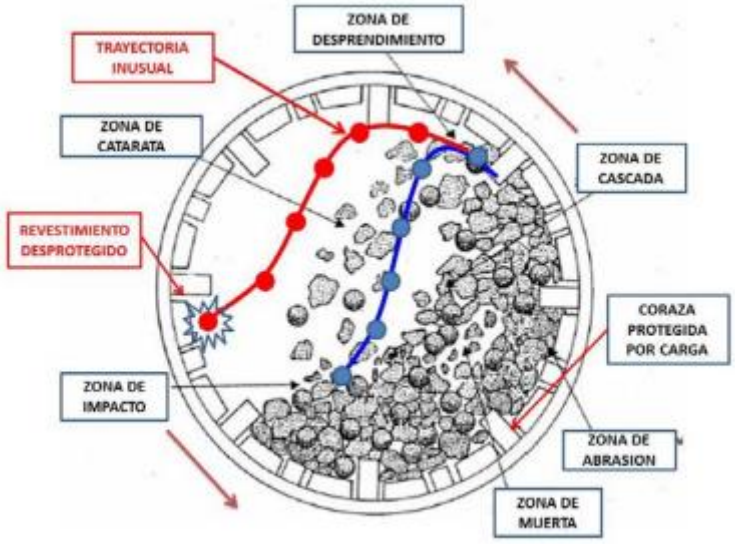


Figura 2. Esquema del mecanismo de molienda en un molino de bolas.

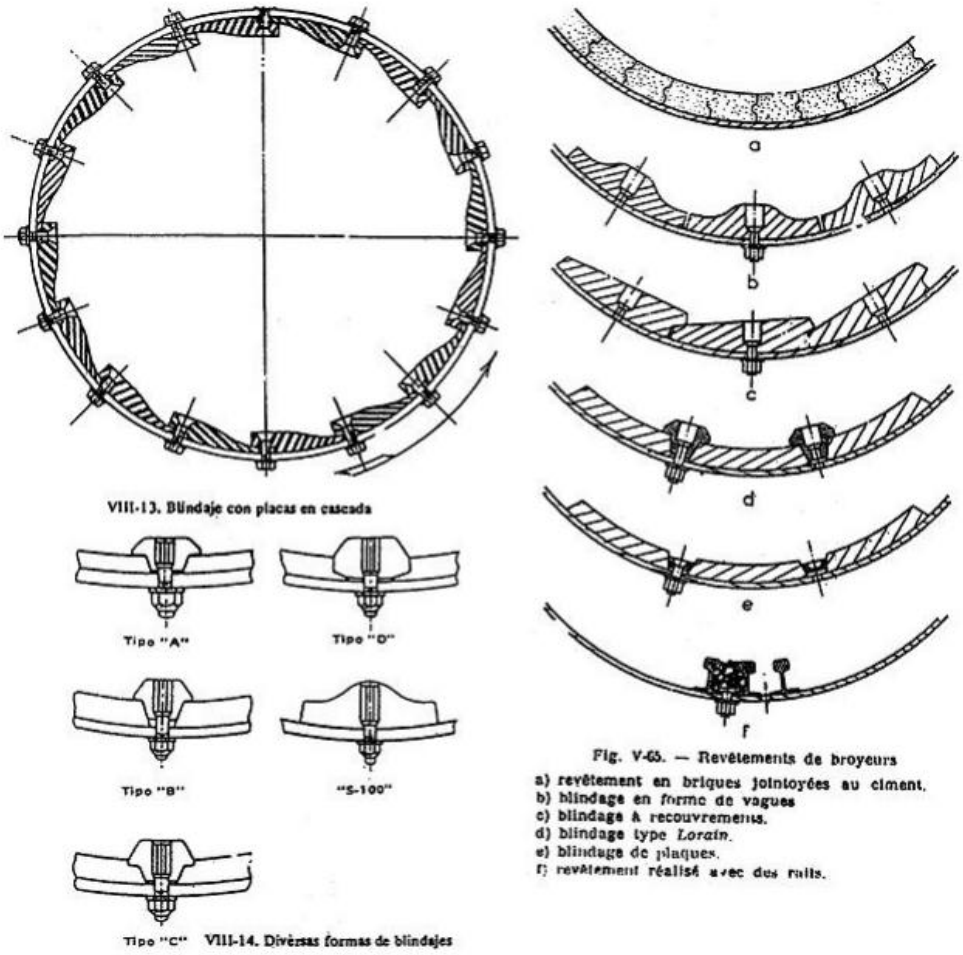


Figura 3. Diversos tipos de blindajes de molinos de bolas.

Estructuralmente los protectores internos de los molinos son placas de acero aleado de diferentes diseños que proporcionan resistencia a la abrasión, desgaste y corrosión. Se fijan directamente a la pared del cilindro mediante pernos, lo que resulta en la apariencia característica del molino de bolas visto desde el exterior.

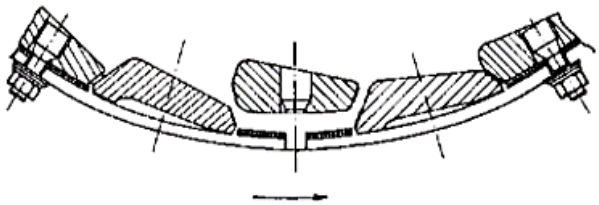


Figura 4. Forma como se aseguran los protectores al cilindro del molino.

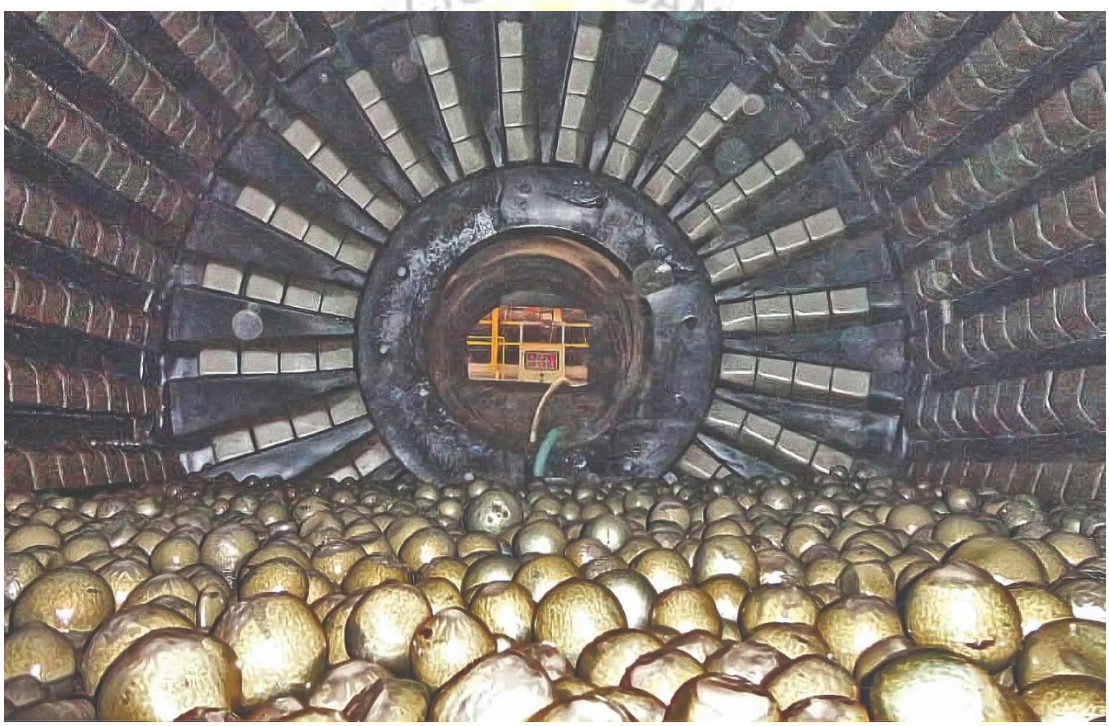


Figura 5. Vista del interior de un molino mostrando los protectores y las bolas.

Este tipo de equipos de molienda utilizan como medios de molienda bolas de hierro fundido o acero forjado como medios moledores, las cuales varían en diámetro según el material deseado: 4 pulgadas para molienda gruesa y 3/4 de pulgada para molienda fina. Estas últimas también se usan para remoler el mineral separado en los hidrociclones y devuelto al circuito.

Al iniciar su giro el molino las bolas y el mineral que está pegado a la superficie del protector interno se eleva en la dirección de rotación hasta un punto en el cual por su peso el material y las bolas caen en forma de cascada o de catarata. Ambos tipos de caídas Cuando el molino gira, las bolas y el mineral en su interior se elevan hasta caer por su propio peso en forma de cascada o catarata. Estos tipos de caídas dependen de la velocidad de giro del molino, y a veces ocurren simultáneamente.

En el momento que gira el molino, la pulpa del mineral y los medios de molienda se mueven, generando fricción. Esta fricción reduce el tamaño del material y desgasta las bolas por el roce entre ellas, especialmente cuando soportan mucho peso o la pulpa es muy fluida. La pulpa debe tener una densidad que permita formar una masa adherente a las bolas para protegerlas del choque metal-metal, sin llegar a ser pegajosa. Esta densidad es ideal para realizar una molienda eficiente y con mayor rendimiento.

Previamente mediante cálculo se selecciona la velocidad crítica del molino de bolas que en la molienda húmeda es entre el 70% y 80%. A una velocidad del 70%, las bolas caen por cascada, lo cual es efectivo; al 80%, caen por catarata, causando mayor desgaste por impacto entre ellas y contra el blindaje.

Dentro del molino, las bolas realizan tres tipos de movimientos durante la reducción de tamaño de las partículas de mineral: rotación alrededor de su eje, caída en cascada rodando sobre otras bolas y la pulpa (figura 6), y caída en catarata separándose del grupo y siendo lanzadas hacia el pie de la carga en un movimiento curvilíneo (figura 7).

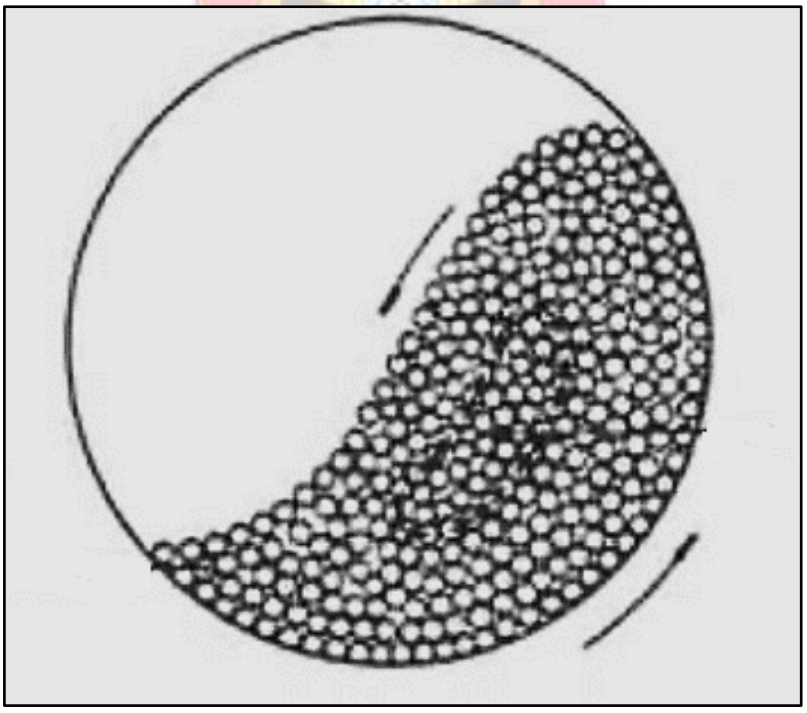


Figura 6. Esquematización del movimiento en cascada de las bolas.

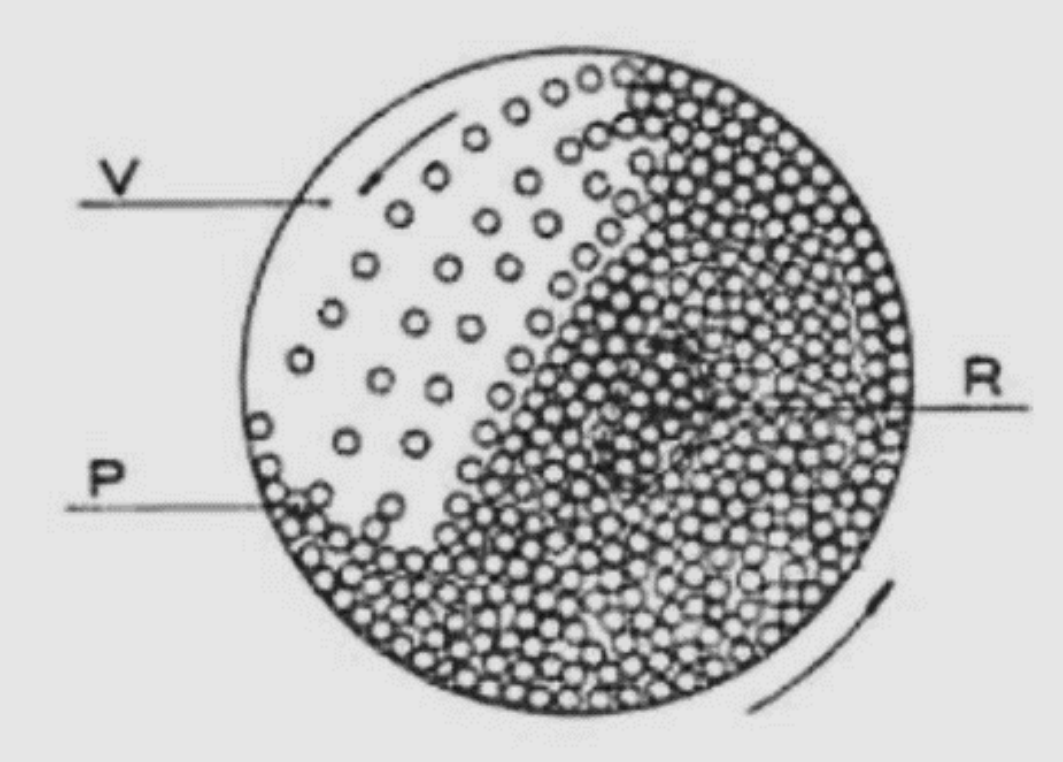


Figura 7. Esquematización del movimiento en cataratas de las bolas del molino.

Cuando al interior del molino se produce un movimiento de catarata permite una molienda fina. El movimiento de cascada resulta en una molienda gruesa, ya que la bola cae sobre las partículas grandes y las rompe por impacto.

La efectividad de la molienda depende de tres factores: la velocidad crítica, la capacidad portante de los blindajes y el tipo de caída dentro del molino. La velocidad crítica es la mínima que permite que las bolas y la pulpa se adhieran a la superficie interna del molino durante la rotación, gracias a la fuerza centrífuga.

Si durante la rotación se excede la velocidad, las bolas y el material se adhieren a las paredes del molino sin realizar la molienda. Por el contrario, si la velocidad es muy baja, solo hay fricción y caídas de cascada, produciendo finos, pero tomando demasiado tiempo y consumiendo mucha energía, lo que incrementa los costos.

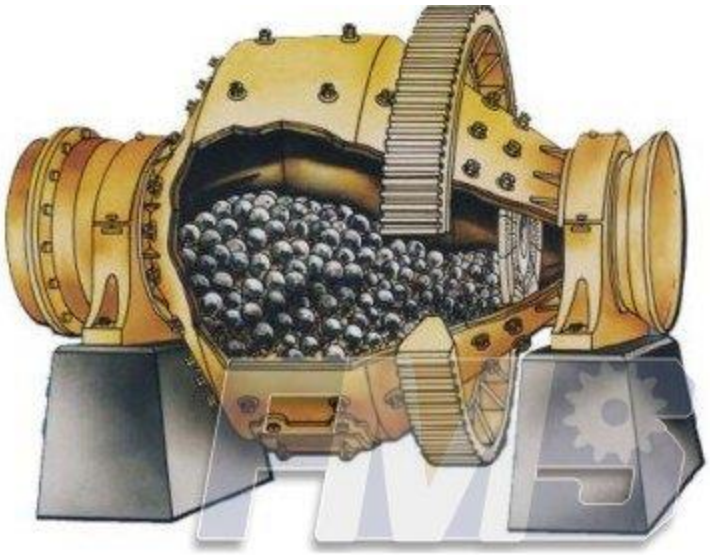


Figura 8. Molino de bolas de tipo cónico.

La investigación realizada abarca dos variables de estudio: el tiempo de molienda y generación de finos durante la recuperación del cobre por flotación. Esta última es un proceso fisicoquímico de concentración que permite separar un componente específico del mineral mediante el uso de reactivos químicos específicos.

El método hidrometalúrgico de la flotación se basa en la afinidad de las partículas minerales con el agua. Las partículas hidrofílicas se mojan y decantan, convirtiéndose en relave. Las partículas hidrofóbicas no se mojan, permanecen en suspensión, se adhieren a las burbujas de aire y son extraídas como concentrado mineral.

Este método se emplea principalmente para concentrar sulfuros, como separar el sulfuro de plomo de otros como el aluminio o zinc. El mineral molido con galena (sulfuro de plomo) se mezcla con agua y reactivos específicos (cal, colectores como xantatos o ditiofosfatos, espumante, depresor y modificador de pH). Estos reactivos se seleccionan cuidadosamente para optimizar la concentración y minimizar la pérdida de material valioso.

El aire presurizado ingresa por la parte inferior de la celda de flotación, creando burbujas a las que se adhiere el sulfuro de plomo. Este se eleva con la pulpa hasta la superficie, formando una capa de espuma verde amarillento oscuro debido a los sulfuros.

Durante la flotación una paleta periódica retira la espuma de la celda de flotación, que se dirige a reservorios para separar el agua y luego se coloca en canchas de secado al sol. En algunas plantas, este proceso se simplifica con un filtro de tambor.



Figura 9. Vista de la formación de espuma en la superficie de la celda.

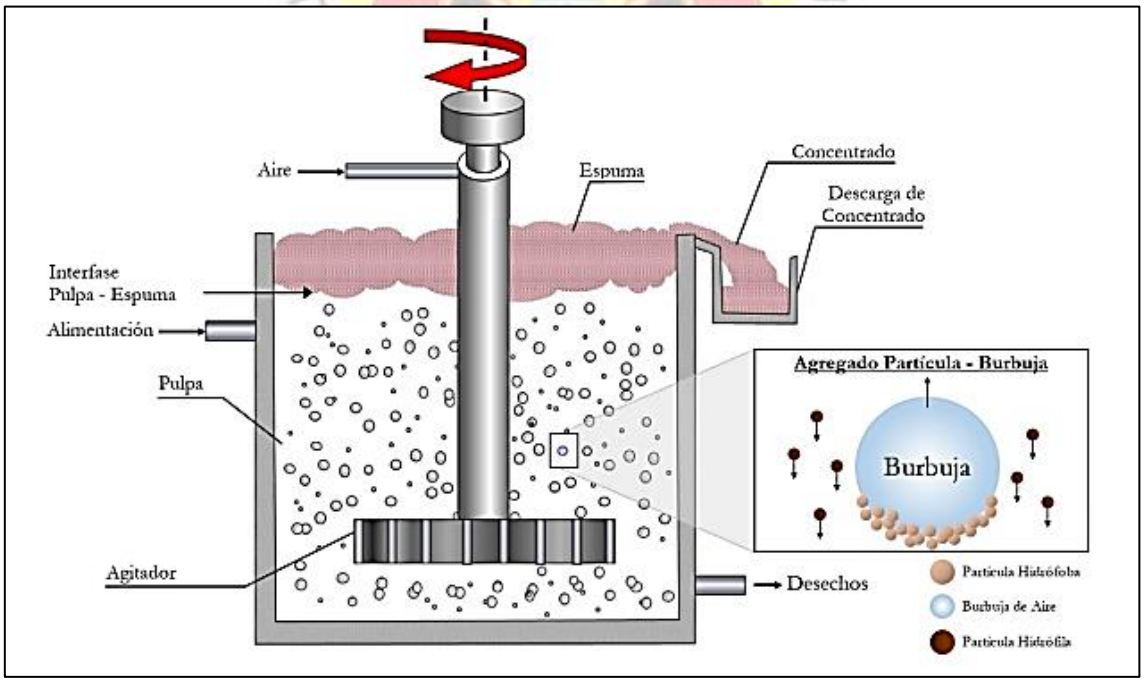


Figura 10. Proceso de la flotación de minerales con agitación mecánica.



Figura 11. Celda de flotación con agitación neumática.



Figura 12. Mecanismo de la flotación en celda de flotación neumática

2.3. Marco conceptual.

Minerales

Pueden definirse como compuestos inorgánicos que se forman naturalmente mediante cambios geológicos y altas temperaturas, interactuando elementos de la corteza terrestre.

Minería

Actividad industrial que consiste en un conjunto de actividades para reconocer, explorar y explotar minerales.

Operaciones mineras

Las operaciones mineras son un conjunto de actividades que tienen como objetivo la explotación de los minerales.

Relave

Se llama así al mineral agotado, al cual se le extraído el material valioso y que resulta como desecho de algún proceso de recuperación de metales.

Metalurgia extractiva

Parte de la metalurgia dedicada al estudio y de las actividades mineras relacionadas con la extracción y tratamiento de los minerales desde los yacimientos hasta el mercado.

Mineral de ganga

Se llama así al material estéril que está junto al mineral que contiene cobre.

Mineral oxidado

Se llama así al mineral cuyas especies mineralógicas contienen compuestos que poseen átomos de oxígeno (CuO, FeSO4, Al(NO3)2) .

Mineral primario

El mineral, como la pirita, se encuentra en zonas profundas y mantiene su composición química desde su origen. Se forma a altas temperaturas y presiones.

Mineral secundario

Son minerales encontrados en zonas de alteración donde interactúan con agua y oxígeno, oxidándose. Ejemplos incluyen la calcopirita, bornita y covelina.

Mineral sulfurado de cobre

El mineral está compuesto por sulfuros metálicos, como sulfuro de cobre, pirita, sulfuro de plomo, sulfuro de zinc y sulfuro de aluminio.

Minerales de cobre

Los compuestos de cobre están presentes en la corteza terrestre, donde se encuentran formando sulfuros, óxidos, hidróxidos, carbonatos o combinaciones de estos.

Molienda

La operación unitaria reduce el diámetro de las partículas minerales de malla # ½" a malla # 400, liberando el material valioso y aumentando su superficie de contacto para una eficiente separación del metal. El mineral de la planta de chancado recibe agua y reactivos

antes de ser llevado a molinos de barras y bolas. Al girar, estos molinos trituran el material.

Molino de bolas

Cilindros metálicos donde se muele el mineral usando bolas de acero de varios diámetros. La molienda ocurre por el impacto de las bolas sobre la pulpa al rotar el molino. Puede ser en seco, pero normalmente se usa húmeda con agua y reactivos para formar una pulpa adecuada para flotación.

2.4. Estrategia metodológica.

La presente investigación es aplicada porque trata de dar solución a un problema concreto de la flotación de minerales refractarios de cobre en lo que respecta al tiempo de molienda y a la generación de lamas durante este proceso lo cual afecta la recuperación del cobre. Por su nivel es explicativa y por su diseño es experimental ya que se manipula la variable independiente: tiempo de molienda. La población incluye a todos los minerales sulfurosos de cobre sometidos a molienda en las plantas de beneficio; mientras que la muestra está representada por 50 Kg de mineral sulfuroso de cobre que, en el laboratorio, se trató físicamente para obtener una granulometría adecuada para la flotación, controlando minuciosamente el tiempo que demora esta operación y la granulometría del material resultante.

Las técnicas empleadas fueron las analíticas y los instrumentos los ensayos de laboratorio. Los datos obtenidos fueron seleccionados, tabulados, interpretados y discutidos en función a los datos recabados en el estudio experimental.

2.5. Desarrollo experimental.

2.5.1. Materiales y equipo de laboratorio empleado.

El desarrollo de la parte experimental de esta tesis ha considerado dos etapas fundamentales para demostrar la hipótesis planteada.

1. Chancado del mineral en una chancadora de quijada de laboratorio hasta alcanzar una granulometría uniforme correspondiente a la malla # ½" en todo el mineral recolectado y que ha sido traído al laboratorio metalúrgico.
2. El análisis granulométrico de cada fracción de tiempo de molienda (10, 15, 20, 25 y 30 minutos), empleando mallas # 200, 230, 270, 325, 400.

El desarrollo de estas actividades, además, exigen otras operaciones tales como el tamizado, cuarteo y análisis del mineral empleado en los estudios experimentales. Los materiales, equipos e instrumentos que se emplearon en cada una de ellas fueron las siguientes:

Durante la recolección de muestras:

- 01 balanza granataria,
- 05 sacos de rafia de 10 Kg.

- 01 lampa y 01 comba.
- Implementos de seguridad personal

Para el cuarteo del mineral:

- 01 regla de cuarteo
- 01 manta plastificada.
- 01 espátula
- 10 bolsas plásticas
- 01 balanza tecnoquímica.
- 01 chancadora de quijada de laboratorio
- 01 tamiz de malla # ½”

Para realizar la molienda:

- 50 kilogramos de mineral chancado a malla # ½”
- Molino de bolas de laboratorio.
- Balanza analítica.
- Cronómetro
- Bolsas plásticas de kg
- Plumón y cinta adhesiva
- Medios moledores de diámetros: 1”, 2” y 3”
- Balanza tecnoquímica

Para realizar el análisis granulométrico

- Mineral chancado a malla #-10 0,5 Kg
- Tamices ASTM, mallas # 200, 230, 270 325 y 400
- Rotap
- Balanza tecnoquímica
- Vidrios de reloj
- Plato plástico pequeño.
- Bolsa plástica de cierre hermético.
- Plumón tinta indeleble, cinta adhesiva

Recolección de muestras.

Para llevar a cabo el estudio experimental se ha empleado un mineral que podríamos denominarlo mixto en función a la dureza, es decir está compuesto minerales de distinta dureza, incluyendo un promedio de 40% de minerales de alta dureza. Las muestras se recolectaron en varias canchas de minerales de las plantas hidrometalúrgicas de la provincia de Nasca dedicadas a la flotación de minerales sulfurosos de cobre. Entre los componentes de este mineral están la galena, la pirita, la covelina, la calcopirita, la blenda, ciertos óxidos de hierro y de cobre como la magnetita, la hematita, cuprita, crisocola, malaquita, bornita, etc. La recolección de muestras se hizo manualmente, escogiendo los

diversos minerales de distintos grados de dureza, trozos de tamaño pequeño y de composición variada.

Cribado de la muestra.

El cribado clasifica partículas de diferentes tamaños y formas mediante superficies con distintas aberturas. Las partículas más grandes que no pasan son transportadas a una chancadora de quijadas de laboratorio.

El cribado del mineral es necesario para:

- Separar los fragmentos grandes y evitar la saturación de la chancadora.
- Eliminar las lamas o finos formados por óxidos de hierro y cobre.
- Cumplir con especificaciones técnicas.
- Obtener una granulometría específica en control o investigación.



Figura 13. Foto de una criba vibradora de dos bandejas.

Como ya se manifestó el mineral empleado tiene trozos y partículas de diversos tamaños, desde más de 6” hasta polvo fino. El polvo aparece por el roce entre rocas con materiales arcillosos y arenosos. Estas partículas deben ser separadas para evitar que saturen la

chancadora. El cribado se realiza en tamices con aperturas máximas de ½", que es la granulometría necesaria para alimentar los molinos de bolas.

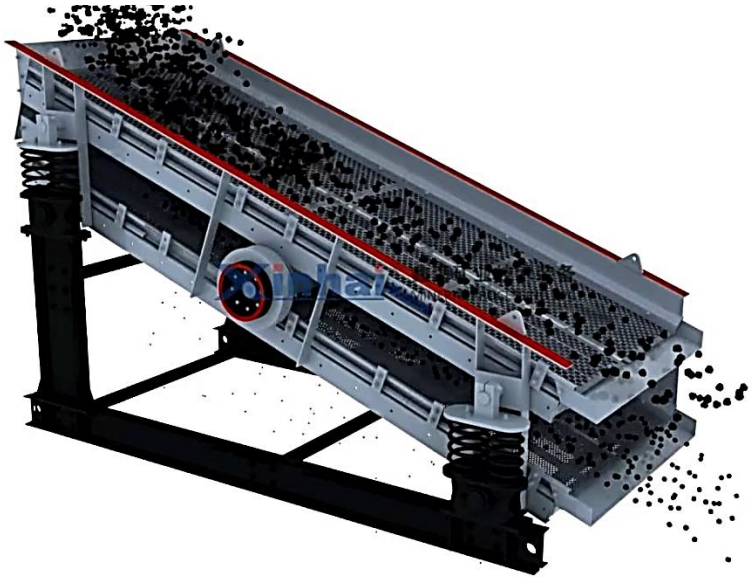


Figura 14. Cribado de un mineral.

Chancado y cuarteo de la muestra.

El chancado se realizó en una chancadora de quijadas de 2¼" x 3½". Se alimenta con partículas de 2 a 3 pulgadas y reduce el tamaño a ½". El mineral tamizado en una malla # ½" separa las partículas grandes para volverlas al chancado hasta que todo el mineral cumpla con la malla requerida.

El material chancado a la granulometría requerida se va acumulando sobre una superficie de cemento que se haya limpiado previamente para luego con una pala removerlo repetidas veces para homogenizarlo, después de lo cual con la pala se reúne todo el material homogenizado dándole la forma de un cono. Formado el cono con la pala se golpea en la parte superior achatando el montón hasta darle la forma de una torta, tal como se observa en la figura. La torta formada se parte en cuatro con la regla, dos de las cuatro partes se eliminan (se separan en un montón aparte) y se vuelve a formar el cono, la operación anterior se repite varias veces (cono y torta) hasta haber reducido su tamaño a 1 o 2 kilogramos. Esta pequeña muestra lograda es la muestra representativa del mineral y que servirá para hacer todos los análisis que permitan caracterizar la muestra. Los análisis realizados fueron los siguientes:

- Ensayos para determinar cuantitativamente el cobre, hierro, zinc, aluminio, plomo, níquel, oro y plata.
- Determinación de cuarzo y de azufre.



Figura 15. Homogenización del mineral y formación del cono.

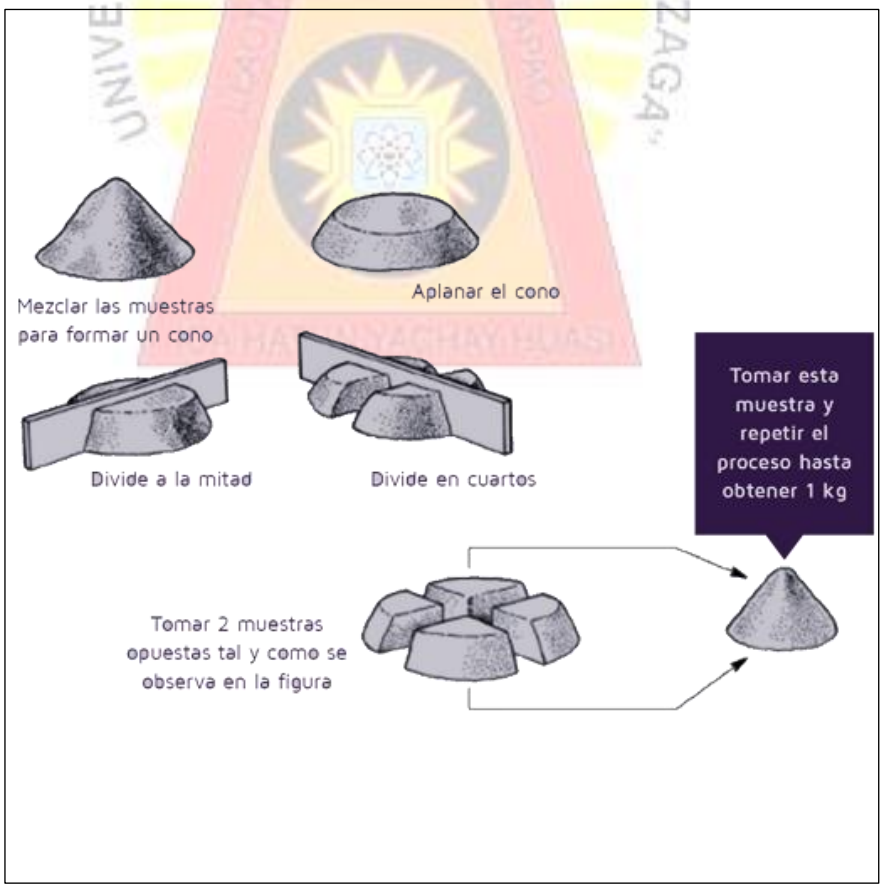


Figura 16. Procedimiento para obtener la muestra representativa.



Figura 17. Cuarteo del mineral en la práctica.

Molienda del mineral

La molienda se realiza en un molino de bolas de laboratorio cuyas especificaciones son:

Dimensiones: 9,8 pulgadas x 7,8 pulgadas (25 cm o 0,8 pies x 20 cm o 0,6 pies)

Carga de bolas: W = 28, 25 libras; W = 12, 81 kg

Volumen del Molino: V = 7853, 98 cm3.

Velocidad crítica del molino: Vc = 94,81 rpm

Velocidad de operación: Vo = 75,84 rpm

Los tiempos de molienda convenidos para los distintos ensayos: 10, 15, 20, 25, 30 min.

Peso de la muestra molida: 1000 g

Tipo de molienda: Molienda seca.

Tipo de mineral: Mineral mixto conteniendo minerales duros y blandos.

Tipo de bolas empleadas: De acero al carbono de diámetros de 1", 2" y 3"

Análisis granulométrico.

Terminada la molienda se procedió a realizar el análisis granulométrico, colocando de manera ordenada una serie de tamices desde el tamiz de malla # 400 hasta el # 100 de tal forma que el tamiz de malla # 100 sea el primero y esté en la parte superior. El mineral molido se carga en la parte superior y se inicia la agitación de los tamices con el sacudidor universal durante 20 minutos, después de este tiempo se desmontan los tamices y se van

pesando los contenidos de cada uno de ellos. Los tamices empleados fueron de la serie US mallas, dados en la tabla:

Tabla 1

Tamices empleados en el análisis granulométrico del mineral

US Malla	Milímetros
100	0,149
120	0,125
140	0,105
170	0,088
200	0,074
230	0,063
270	0,053
325	0,044
400	0,037

Fuente: Sun Power Thermoelectrics SL (2020)



Figura 18. Procedimiento para tamizar.

-

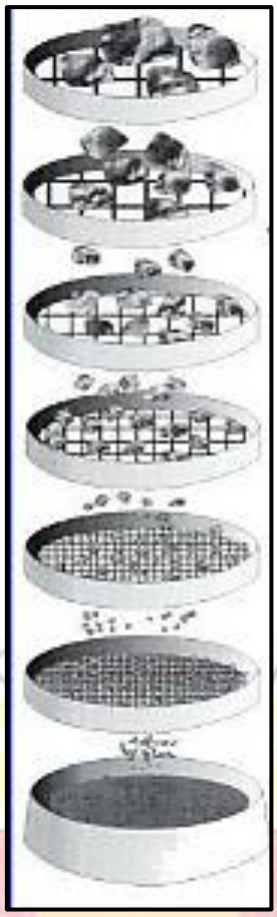


Figura 19. Tamizaje por cascada.



Figura 20. Tamices en el sacudidor universal

III. RESULTADOS

3.1. Del análisis químico del mineral.

Tabla 2

Composición química del mineral empleado

Componente	Concentración
Hierro (Fe), %	5,11
Cobre (Cu), %	8,46
Níquel (Ni), %	0,21
Zinc (Zn), %	0,29
Plomo (Pb), %	0,23
Sílice (Si), %	2,74
Oro (Au), g/t	0,48
Plata (Ag), g/t	0,25
Azufre (S), %	11,26

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 2 muestra los datos de los resultados del análisis químico cuantitativo hecho al mineral que se empleó en el estudio de molienda y generación de finos, como se observa dicho mineral contiene hierro en un 5,11%, cobre 8,46% y sílice 2,74%, además de otros metales como plomo, zinc, aluminio, níquel, oro y plata en concentraciones menores, así mismo se ha reportado 11,26% de azufre.

3.2. De los ensayos de molienda y generación de finos.

Tabla 3

Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 10 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
270	10	45	4,5
270	10	46	4,6
270	10	44	4,4
270	10	47	4,7
270	10	43	4,3
Promedio		45	4,5
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 3 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 270 durante la molienda que se prolongó por 10 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 45 gramos lo que equivale a 4,5% de mineral fino.

Tabla 4

Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 10 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
325	10	69	6,9
325	10	68	6,8
325	10	69	6,9
325	10	67	6,7
325	10	67	6,7
Promedio		68	6,8
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 4 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 325 durante la molienda que se prolongó por 10 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 68 gramos lo que equivale a 6,8% de mineral fino.

Tabla 5

Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 10 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	10	87	8,7
400	10	85	8,5
400	10	88	8,8
400	10	87	8,7
400	10	88	8,8
Promedio		87	8,7
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 5 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 400 durante la molienda que se prolongó por 10 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 87 gramos lo que equivale a 8,7% de mineral fino.

Tabla 6

Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 14 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
270	14	104	10,4
270	14	104	10,4
270	14	105	10,5
270	14	103	10,3
270	14	104	10,4
Promedio		104	10,4
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 6 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 270 durante la molienda que se prolongó por 14 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 10,4 gramos lo que equivale a 10,4% de mineral fino.

Tabla 7

Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 14 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
325	10	123	12,3
325	10	125	12,5
325	10	124	12,4
325	10	124	12,4
325	10	124	12,4
Promedio		124	12,4
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 7 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 325 durante la molienda que se prolongó por 14 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 124 gramos lo que equivale a 12,4% de mineral fino.

Tabla 8

Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 14 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	14	154	15,4
400	14	153	15,3
400	14	154	15,4
400	14	153	15,3
400	14	155	15,5
Promedio		154	15,4
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 8 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 400 durante la molienda que se prolongó por 10 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 45 gramos lo que equivale a 4,5% de mineral fino.

Tabla 9

Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 18 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
270	18	127	12,7
270	18	127	12,7
270	18	128	12,8
270	18	129	12,9
270	18	126	12,6
Promedio		127	12,7
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 9 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 270 durante la molienda que se prolongó por 18 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 127 gramos lo que equivale a 12,7% de mineral fino.

Tabla 10

Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 18 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
325	18	139	13,9
325	18	139	13,9
325	18	140	14,0
325	18	141	14,1
325	18	141	14,1
Promedio		140	14,0
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 10 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 325 durante la molienda que se prolongó por 18 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 140 gramos lo que equivale a 14,0% de mineral fino.

Tabla 11

Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 18 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	18	175	17,5
400	18	176	17,6
400	18	177	17,7
400	18	175	17,5
400	18	176	17,6
Promedio		176	17,6
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 11 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 400 durante la molienda que se prolongó por 18 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 176 gramos lo que equivale a 17,6% de mineral fino.

Tabla 12

Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 22 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
270	22	146	14,6
270	22	145	14,5
270	22	145	14,5
270	22	147	14,7
270	22	146	14,6
Promedio		146	14,6
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 12 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 270 durante la molienda que se prolongó por 22 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 146 gramos lo que equivale a 14,6% de mineral fino.

Tabla 13

Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 22 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
325	22	162	16,2
325	22	160	16,0
325	22	161	16,1
325	22	161	16,1
325	22	162	16,2
Promedio		161	16,1
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 13 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 325 durante la molienda que se prolongó por 22 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 161 gramos lo que equivale a 16,1% de mineral fino.

Tabla 14

Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 22 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	22	199	19,9
400	22	197	19,7
400	22	197	19,7
400	22	199	19,9
400	22	198	19,8
Promedio		198	19,8
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 14 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 400 durante la molienda que se prolongó por 22 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 198 gramos lo que equivale a 19,8% de mineral fino.

Tabla 15

Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 26 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
270	26	174	17,4
270	26	173	17,3
270	26	174	17,4
270	26	175	17,5
270	26	174	17,4
Promedio		173	17,3
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 15 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 270 durante la molienda que se prolongó por 26 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 173 gramos lo que equivale a 17,3% de mineral fino.

Tabla 16

Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 26 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
325	26	189	18,9
325	26	188	18,8
325	26	189	18,9
325	26	190	19,0
325	26	189	18,9
Promedio		189	18,9
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 16 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 325 durante la molienda que se prolongó por 22 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 189 gramos lo que equivale a 18,9% de mineral fino.

Tabla 17

Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 26 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	26	215	21,5
400	26	217	21,7
400	26	215	21,5
400	26	216	21,6
400	26	216	21,6
Promedio		216	21,6
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 17 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 400 durante la molienda que se prolongó por 26 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 216 gramos lo que equivale a 21,6% de mineral fino.

Tabla 18

Resultados de la molienda del mineral malla # 270 por 30 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
270	30	193	19,3
270	30	195	19,5
270	30	194	19,4
270	30	194	19,4
270	30	194	19,4
Promedio		194	19,4
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 18 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 270 durante la molienda que se prolongó por 30 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 194 gramos lo que equivale a 19,4% de mineral fino.

Tabla 19

Resultados de la molienda del mineral malla # 325 por 30 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
325	30	207	20,7
325	30	208	20,8
325	30	206	20,6
325	30	207	20,7
325	30	206	20,6
Promedio		207	20,7
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 19 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 325 durante la molienda que se prolongó por 30 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 207 gramos lo que equivale a 20,7% de mineral fino.

Tabla 20

Resultados de la molienda del mineral malla # 400 por 30 minutos

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	30	242	24,2
400	30	244	24,4
400	30	243	24,3
400	30	243	24,3
400	30	241	24,1
Promedio		243	24,4
Total		1000	100

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 20 se dan a conocer los datos del análisis granulométrico empleando tamiz malla # 400 durante la molienda que se prolongó por 30 minutos, como se observa el material pasante por dicha malla es de 243 gramos lo que equivale a 24,3% de mineral fino.

Tabla 21

Generación de finos con la variación del tiempo de molienda

Malla #	Tiempo, min	Pasante, g	Pasante, %
400	10	87	8,7
400	14	154	15,4
400	18	176	17,6
400	22	198	19,8
400	26	216	21,6
400	30	244	24,4

Fuente: Datos experimentales.

Peso total de la muestra: 1000 g

La tabla 21 se dan a conocer los datos del porcentaje de material fino que pasa por la malla # 400 en diferentes tiempos de molienda, como se puede observar conforme aumenta el tiempo de molienda es mayor la cantidad de finos que pasa por la malla # 400 llegando a pasar hasta un 24,4%.

IV. DISCUSIÓN

El objetivo de esta tesis es demostrar que el tiempo de molienda influye directamente en la generación de finos, esto es, cuanto más tiempo demora la molienda mucha mayor cantidad de finos se obtendrá, lo cual tiene diversos efectos negativos durante la flotación del mineral, en primer lugar porque estas no se pueden flotar adecuadamente o sencillamente no flotan y en segundo lugar su presencia afecta negativamente la flotación de las partículas que poseen un tamaño adecuado para llevar a cabo este proceso. Sus diminutas dimensiones no le permiten un choque efectivo con la burbuja por lo que no se puede adherir a ella y termina mojándose totalmente siendo arrastradas las finísimas partículas del material rico por las partículas del material estéril y el material no flotable hacia el fondo de la celda para ser eliminadas como relave o ganga. Además, estas partículas finas no poseen la superficie ni la masa requerida para poder adherirse a la burbuja. Esto en definitiva hace que la recuperación del metal en el concentrado sea mucho menor. Otro efecto negativo es el hecho de que cuando se reduce el tamaño de la partícula se aumenta considerablemente su superficie de contacto la cual va a reaccionar efectivamente y con mayor rapidez con los reactivos que se agregan a la pulpa, ocasionando un mayor consumo de estas sustancias. Las partículas pequeñas sufren una mayor oxidación y su dispersión en el seno de la pulpa durante la agitación aumenta la viscosidad de esta y ensucia la espuma con partículas de material estéril finamente pulverizado lo que afecta el rendimiento y la calidad del concentrado.

Las partículas con tamaño adecuado para la flotación se considera que están en el rango establecido entre las mallas # - 200 y 230, por lo que en el diseño experimental de esta tesis se han considerado ensayos con mallas entre # -200 y # - 400, para poder determinar cuantitativamente un promedio de finos que se generan durante la molienda durante tiempos de 10, 14, 18, 22, 26 y 30 minutos. Los resultados de estos ensayos reportan los siguientes valores: En 10 minutos se generan 8,7% de finos, en 14 minutos se producen 15,4% de lamas, en 18 minutos alcanza los 17,6 %, en 22 minutos la generación de finos es de 19,7% y en 26 minutos este valor sube a 21,6% y finalmente durante 30 minutos se producen 24,4% de finos. De estos resultados se infiere que conforme el tiempo aumenta la cantidad de finos también lo hace y esto debido a que para lograr que un 60% del mineral que se muele pase por la malla # 200, en el caso de los minerales duros hay que aumentar el tiempo de molienda para poder fracturar la pirita y el cuarzo a tamaño adecuado, pero como el mineral contiene también especies mineralógicas blandas y arcilla, estas se fracturan al máximo, generando un alto porcentaje de finos.

V. CONCLUSIONES

1. El estudio experimental realizado ha permitido establecer la relación directa entre el tiempo de molienda y la generación de lamas durante la molienda del mineral sulfuroso destinado a la flotación de cobre.
2. Tanto teórica como experimentalmente se ha determinado que la granulometría más adecuada para llevar a cabo la flotación de minerales sulfurosos de cobre corresponde al rango de apertura de las mallas # 200 y 230.
3. Se ha **e**stablecido que el tiempo de molienda afecta directamente a la granulometría del mineral sulfuroso de cobre, a mayor tiempo se produce un mayor porcentaje de finos, por ejemplo, en 30 minutos se obtiene 24,4% de finos.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar ensayos con muestras minerales de diferentes niveles de dureza, tanto blandos como duros, siguiendo las condiciones establecidas en esta tesis, con el objetivo de obtener resultados que permitan verificar sus conclusiones.

2. Es recomendable verificar los datos obtenidos en esta tesis mediante la molienda húmeda y establecer las diferencias con el método utilizado en el desarrollo de esta investigación.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

Alcántara Valladares, J. R. (2018). "Diseño práctico de un molino de bolas". México D.F: Instituto Politécnico Nacional.

Austin G., L. & Concha A., F. (2016). "Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación". Concepción, Chile.

Austin, L. &. (2018). "Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment, Handbook of Powder Science & Technology". Nueva York E.E.U.U.: Chapman & Hall, N.Y.

Blanco Fernández, J. & Félix Sanz, A. (2018). "Cad.Cam: Gráficos, Animación y Simulación por Computador". Madrid, España: Thomson Paraninfo, S.A.

Brown, J. (2018). "CAD/CAM from principles to practice". U.S.A.: Addisson-Wesley.

Chillcce V. M. & Rojas R. H. (2018). "Implementación del Sistema Experto en Molinos Para Optimizar la Molienda del Circuito de Cobre en la Planta Concentradora de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.". Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro.

Espinosa de León, L. & López Aburto, V. M. (2017). Teoría Y Prácticas de Trituración y Molienda. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

F. Singer & L. Pytel. (2019). Resistencia de Materiales, 3ra Edición. Alfahomega.

González, G. (2016). "Control de Plantas de Procesamiento de Minerales". Chile: Universidad de Chile.

Gutiérrez Gutiérrez, O. A. (2017). "Estudio Para Calibración De Molinos". Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.

ANEXOS

MOLIENDA HÚMEDA DEL MINERAL

OBJETIVOS:

Moler el mineral a malla #200 (60%), liberación de la partícula valiosa, formar la pulpa.

MATERIALES:

(1) Molino de bolas
(2) Mesa de rodillos
(3) Balde de 5 litros
(4) Cronómetro
(5) Probeta de 1L
(6) Pizeta
(7) Cocina eléctrica
(8) Rodillo de plástico
(9) Periódico
(10) Brocha
(11) Balanza de 250 g

PROCEDIMIENTO:

En primer lugar se debe de limpiar el molino ya que las impurezas dejadas por las pruebas anteriores pueden dar resultados erróneos, esto se hace echando 200g de arena, 5g de cal y 1/2L de agua y cargando al molino con las bolas se lo hace funcionar por 1 minuto y se lava tanto las bolas como el molino con la pizeta.

En esta primera parte moleremos el mineral para hallar su curva de moliendabilidad y el tiempo estimado para que el mineral este a 60% malla 200 es por eso que no se hará aun la adición de los reactivos. se procede a moler el mineral, se carga las bolas al molino luego el mineral, el peso del mineral calculado para la celda de flotación es el que se usara también para la molienda se echa la muestra de mineral al molino y luego el agua para esto se usara la probeta de 1L, se tapa el molino y se pone a moler.

Probaremos diversos tiempos de molienda como mínimo 3, como ya sabemos que la granulometría deseada para nuestro mineral está en aproximadamente 11-14 minutos nos guiaremos por estos tiempos.

Recepcionamos el mineral en el balde de 5 litros enjuagando el molino con la pizeta y lavando las bolas para luego cargarlas otra vez al molino. Una vez que ya tenemos nuestra pulpa en el balde le echamos floculante para eliminar la máxima cantidad de agua que se pueda, seguidamente de echa a una bandeja de secado y se hace secar en la cocina eléctrica.

El tiempo de secado es aproximadamente 30 minutos, una vez seco a este mineral se le deberá pasar rodillo para soltar a las partículas se procede a hacer el cuarteo hasta llegar a 100gr. Estos

100 g se pasan por tamiz #200 se pesa y se calcula el % sólidos en peso que han pasado la malla 200, se hace los apuntes necesarios.

Una vez hecho esto y hallado el tiempo óptimo de molienda se procede a moler el mineral esta vez ya para flotarlo.

Echamos el mineral al molino asimismo el agua en esta parte a diferencia de la anterior en la que solamente se quería hallar el tiempo de molienda agregaremos ciertos reactivos, primero se agregaran los modificadores, en este caso el modificador del pH es la cal, luego los colectores estos se agregan parcialmente en esta etapa en el acondicionamiento se agregan al 100%, para nuestro caso el complejo sulfato de Zn/cianuro que es nuestro depresor también se deberá agregar en esta etapa.

Se da el tiempo óptimo de molienda hallado aprox. 12min el control del es muy importante para esto usaremos el cronometro, demasiado tiempo puede ocasionar una sobre molienda y esto podría ser perjudicial por la formación de lamas. Se recibe el mineral en el balde de 5 litros y se echa a la celda de flotación.

En esta etapa es importante protegerse bien los oídos debido al ruido alto que origina el molino.