



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Determinación de la correlación entre la función de selección y el índice de trabajo de molienda

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ingeniería de Minerales

Presenta:

I.M.M. Dulce Job Benítez Guzmán

Asesor:

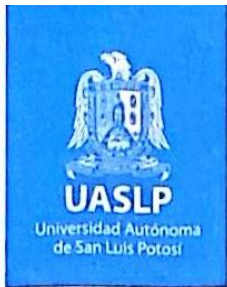
Dr. José Ángel Delgadillo Gómez

Co-asesor:

Dr. Gilberto Rosales Marín

San Luis Potosí, S. L. P.





FACULTAD DE
INGENIERÍA

16 de mayo de 2024

ING. DULCE JOB BENÍTEZ GUZMÁN
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. José Ángel Delgadillo Gómez y Gilberto Rosales Marín** Asesor y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Ingeniería de Minerales**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de mayo del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Determinación de la correlación entre la función de selección y el índice de trabajo de molienda"

Introducción.

- I. Antecedentes de la función de selección e índice de trabajo
- II. Metodología experimental de la determinación de la función de selección e índice de trabajo
- III. Resultados y discusión de la correlación entre la función de selección y el índice de trabajo

Conclusiones.

Referencias.

Anexos.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR





UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

D E C L A R A C I Ó N

El presente trabajo que lleva por título:

Determinación de la correlación entre la función de selección y el índice de trabajo de molienda

se realizó en el periodo enero de 2020 a junio de 2025 bajo la dirección del asesor Dr. José Ángel Delgadillo Gómez y co-asesor Dr. Gilberto Rosales Marin.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis. para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Dulce Job Benítez Guzmán.

Resumen

En esta tesis se determina una correlación entre el índice de molienda de tres minerales y la función de selección para demostrar la influencia que tienen sobre la energía específica en molinos de bolas, tomando en cuenta los mecanismos de fractura que ocurren durante el proceso de reducción de partículas particularmente en función de la cinética de molienda, evaluando la relación entre la velocidad de fractura y el índice de trabajo de cada mineral, centrándose en los diferentes collares de bolas, y la distribución granulométrica de entrada y salida de los minerales después de un tiempo de molienda.

Las condiciones de operación y la cinética de fractura permiten conocer la función de selección y el índice de molienda, los cuales tienen la mayor influencia en el proceso de reducción de tamaño de partículas, aplicados en forma de un balance poblacional permite predecir la cantidad de partículas fragmentadas a una cierta velocidad de molienda.

Así, el índice de molienda es un parámetro que indica la facilidad de molienda de un mineral comparando la energía consumida de los molinos durante la reducción de tamaño de las partículas; y la función de selección muestra cuando las partículas tienen colisiones efectivas a una velocidad de rotación del molino. Entender la relación de ambos parámetros permite comprender cómo es el proceso de molienda de los minerales dentro de los molinos rotatorios. De esta forma se pueden determinar las acciones de control en los collares de bolas utilizados para disminuir la variabilidad del proceso, al estabilizar el consumo específico de energía en los molinos.

Se realizaron cinco pruebas de molienda, aplicando collares de bolas de acero de 1, 1.5 y 2 pulgadas a minerales polimetálicos de Pb-Cu-Zn, sulfuros y óxidos, y fluorita; usando tiempos de molienda de 1.30, 7.30 y 15 minutos para realizar los análisis granulométricos respectivos de cada mineral. Asimismo, se calculó el índice de trabajo respectivo con los datos obtenidos en las granulometrías de entrada y salida de los minerales, el cual se graficó con respecto al tamaño promedio de partícula para obtener la curva de función de selección, en un programa de simulación MolyCop Tools utilizando la hoja de cálculo BallParam_Batch, tomando en cuenta el tiempo mayor de residencia al que se realizaron las cinéticas de molienda en cada mineral. Posteriormente, se encontró una correlación de cinética lineal de primer orden comparando el promedio de la velocidad de fractura de la función de selección contra el índice de molienda; asimismo, se pudo analizar cuál era el

collar óptimo para la conminución de cada mineral después de un tiempo de 15 minutos de molienda.

Índice

Resumen	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
Nomenclatura	7
Introducción.	9
Justificación	11
I. Antecedentes de la función de selección e índice de trabajo	12
I.I Molinos.....	12
I.I.I Nivel de carga.....	13
I.I.II Velocidad de rotación	13
I.I.III Porcentaje de sólidos	13
I.II Fuerzas de interacción durante la molienda.....	14
I.III Teoría de la intensidad de esfuerzo	15
I.IV Relación entre la función de selección y el índice de molienda de los minerales	16
I.V Índice de trabajo o índice de Bond.	17
I.VI Función de selección específica (SiE)	18
I.VII Función de quebrado (Bij)	19
I.VIII Modelo de balance poblacional.....	21
I.VIII.I Modelo de cinética no lineal	22
I.VIII.II Modelo de cinética lineal	22
Hipótesis.....	23
Objetivo	23
II. Metodología experimental de la determinación de la función de selección e índice de trabajo.....	24
II.I Minerales utilizados	25
II.II Material	25
II.III Cálculo del % carga en el molino	25
II.IV Cinéticas de molienda.....	26
II.V Cálculo de potencia.....	29
II.VI Cálculo de la densidad de los minerales.....	30
II.VII Cálculo de la función de selección.....	31
II.VIII Cálculo del Wi para cada tipo de mineral	32
III. Resultados y discusión de la correlación entre la función de selección y el índice de trabajo.....	35
III.I Resultados cálculo de la función de selección específica.....	35

III.II Resultados del índice de trabajo	41
III.III Velocidad de fractura.....	46
III.IV Correlación entre la función de selección y trabajo de molienda.....	48
Conclusiones.	50
Referencias.....	51
Anexos.	53
Apéndice A. Análisis granulométrico inicial.....	53
Apéndice B. Granulometrías con tamaño de bola de 1 pulgada.....	54
Apéndice C. Granulometrías con tamaño de bola de 2 pulgadas.....	59
Apéndice D. Granulometrías con tamaño de bola de 1 y 1.5 pulgadas	63
Apéndice E. Granulometrías con tamaño de bola de 1 y 2 pulgadas.....	68
Apéndice F. Granulometrías con tamaño de bola de 1, 1.5, y 2 pulgadas	72
Apéndice G. Calculo de área total de contacto para los collares.....	77
Apéndice H. Resultados de las cinéticas de molienda	78
Apéndice I. Resultados del cálculo de potencia.	84
Apéndice J. Resultados del calculo de densidad de los minerales.	88

Índice de figuras

Figura 1. Mecanismos de quebrado de partículas	9
Figura 2. Zonas en el interior de un molino	12
Figura 3. Representación de las partes complementarias de la función de selección	19
Figura 4. Eventos de fractura y generación de partículas durante un instante Δt	21
Figura 5. Diagrama de la metodología experimental	24
Figura 6. Homogenización de la muestra del mineral.....	28
Figura 7. Prueba de análisis granulométrico utilizando el Rotap.....	29
Figura 8. Medición del amperaje consumido en el molino a cada tiempo de molienda	30
Figura 9. Homogenización y empaquetado del mineral en la probeta	33
Figura 10. Determinación de función de selección específica para el mineral de Pb-Cu-Zn con diferentes collares de bolas	35
Figura 11. Determinación de función de selección específica de mineral de sulfuros y óxidos con diferentes tamaños de bolas a un tiempo de 15 minutos de molienda	36
Figura 12. Determinación de función de selección de mineral de fluorita con diferentes tamaños de bolas a un tiempo de 15 minutos de molienda	37
Figura 13. Velocidad de fractura promedio de los tres minerales contra el F80	38
Figura 14. Velocidad de fractura contra P80 del mineral de Pb-Cu-Zn con diferentes collares de bolas.....	39
Figura 15. Velocidad de fractura contra P80 de mineral de sulfuros y óxidos con diferentes collares de bolas	40
Figura 16. Velocidad de fractura contra P80 de mineral fluorita con diferentes collares de bolas.....	41
Figura 17. Comportamiento de la carga circulante después de cada ciclo	42

Figura 18. Comportamiento de la carga circulante después de cada ciclo	43
Figura 19. Comportamiento de la carga circulante después de cada ciclo	45
Figura 20. Velocidad de fractura del mineral 1 (Pb-Cu-Zn) con respecto a los distintos collares de bolas	47
Figura 21. Velocidad de fractura del mineral 2 (sulfuros y óxidos) con respecto a los distintos collares de bolas	47
Figura 22. Velocidad de fractura del mineral 3 (Fluorita) con respecto a los distintos collares de bolas.....	48
Figura 23. Velocidad de fractura promedio contra índice de molienda de los tres minerales	49

Índice de tablas

Tabla 1. Dimensiones del molino de Bond para para determinar el W_i	25
Tabla 2. Gradiente de bola utilizado en cada prueba de molienda	27
Tabla 3. Diseño y condiciones de operación para mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn)	31
Tabla 4. Diseño y condiciones de operación para mineral No. 2 (sulfuros y óxidos)	32
Tabla 5. Diseño y condiciones de operación para mineral No. 3 (fluorita)	32
Tabla 6. Resultados de índice de Bond para mineral No. 1.....	42
Tabla 7. Resultados del índice de Bond en mineral No. 1	43
Tabla 8. Resultados de índice de Bond para mineral No. 2.....	43
Tabla 9. Resultados del índice de Bond en mineral No. 2	44
Tabla 10. Resultados de índice de Bond para mineral No. 3.....	44
Tabla 11. Resultados del índice de Bond en mineral No. 3	45
Tabla 12. Identificación de las muestras minerales e índice de trabajo.....	45

Nomenclatura

A	Corriente eléctrica promedio del motor del molino en operación, amperios.
P	Potencia promedio, kW.
F_{80}	80% del peso del mineral alimentado en la metodología de Bond (1960), g.
P_{80}	80% del producto del mineral, g.
b_{ij}	Función de distribución de quebrado, adimensional.
B_{ij}	Función acumulativa de distribución de quebrado, adimensional.
C	Porcentaje de carga del molino, %
D_{int}	Diámetro interno del molino, m.
L_{int}	Longitud interna del molino (m).
k	Parámetro de velocidad de fractura, min^{-1} .
i, j	Índices de clase de tamaño (1 partículas gruesas hasta n partículas más finas).
S^E	Función de selección específica, t/kWh.
S_j	Función de selección para correspondiente a tamaños de partículas j.
t	Tiempo, m o h.
m_{bolas}	Masa total de las bolas, t.
V_{bolas}	Volumen de las bolas, m ³ .
V_{molino}	Volumen del molino, m ³ .
ε	Fracción de porosidad, adimensional.
ρ_b	Densidad de las bolas, t/m ³ .

m_b	Masa de las bolas, kg.
f_1	Fracción de partículas de entrada, adimensional.
Gpb	Gramos netos producidos por revolución, g.
r^*	Número de revoluciones necesarias para obtener la carga circulante de 250%.
W_i	Índice de trabajo del mineral, kWh/t.
w	Masa total de la carga del mineral al molino.

Introducción.

El objetivo de la conminución en el procesamiento de minerales es reducir el tamaño de partícula para mejorar la liberación de minerales valiosos y permitir la separación de la ganga para mejorar el grado y su recuperación. Esto implica etapas de trituración, molienda y, por último, clasificación. Las etapas usualmente implican varias operaciones unitarias en serie usando quebradoras de quijada, cono, martillo, rodillos de alta presión etc., distribuidas de manera estratégica para alcanzar un tamaño de partícula adecuado en la última etapa de trituración, para, posteriormente pasar a los molinos (Gupta A. y Yan D., 2006).

Las ecuaciones básicas que rigen el fenómeno de conminución varían de acuerdo con el tamaño de partícula; el quebrado de partículas puede ocurrir en una variedad de formas, pero en función de las características del material y el nivel de fuerza aplicada, debido a que entre minerales existen distintos enlaces cohesivos y acciones de repulsión a nivel atómico y molecular. Por este motivo, el quebrado en molienda ocurre por tres mecanismos: abrasión, impacto y compresión como se muestra en la Figura 1.

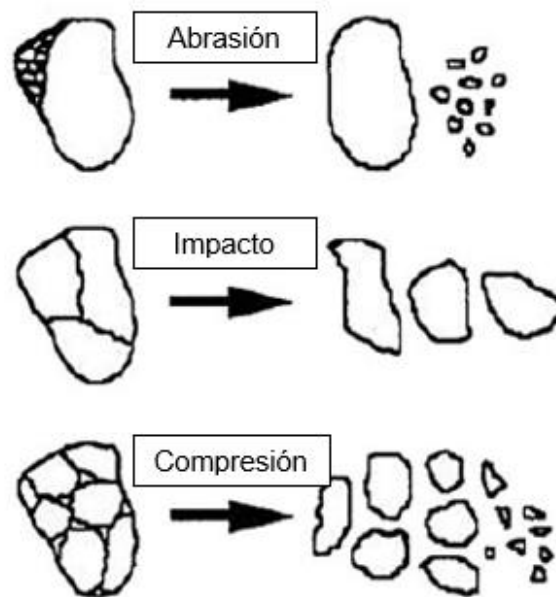


Figura 1. Mecanismos de quebrado de partículas

La energía en los molinos depende de varios factores, los cuales ocurren de forma directa al interior del molino. Algunos de los factores que intervienen son los medios de molienda y el tipo de mineral con el que se trabaja.

Los medios de molienda transfieren la energía en forma de colisiones efectivas o choques con las partículas de alimentación. Esta transferencia de energía depende de la energía cinética de los medios y el índice de trabajo de los minerales; por lo tanto, la densidad también juega un papel importante en la transferencia de energía del molino a las partículas alimentadas durante una colisión, debido a que los medios más densos y los minerales más duros tienen más energía almacenada, lo que permite exista una mayor energía durante las colisiones al momento de la agitación del molino. Esta mayor energía interviene considerablemente con la función de quebrado, con respecto a la conminución de las partículas (Makosa et al., 1986; Blecher et al., 1996; Kwade et al., 1996; Bel Fadhel y Frances, 2001), debido a que la función de selección selecciona las partículas que serán fracturadas, mientras que la función de quebrado determina el grado de fragmentación de estas partículas. Además, esto propicia un aumento de la energía del molino; es decir, la energía del molino aumentará considerablemente si el producto requerido es más fino.

La eficiencia de la molienda depende de varios factores, en los cuales están la función de selección y el índice de molienda. La función de selección es un parámetro que describe la probabilidad de que una partícula sea seleccionada para ser molida en función de su tamaño y otras propiedades, esta función es influenciada por algunos factores como la velocidad del molino, el tamaño de los medios de molienda y la cantidad de mineral dentro del molino. Por otro lado, el índice de molienda describe la facilidad con la que los minerales pueden ser molidos, este índice depende de la dureza del mineral, la cantidad de este dentro del molino y la eficiencia del proceso de molienda.

La correlación entre la función de selección y el índice de molienda de los minerales es un tema de investigación importante en la industria minera, debido a que una mayor eficiencia en la función de selección maximiza la fractura de partículas lo que contribuye a una mayor eficiencia en la moliendabilidad del mineral, por lo tanto, entender este aspecto permite optimizar el proceso de molienda, lo que da como resultado una mayor recuperación de los minerales valiosos y una reducción de los costos de producción.

Justificación

Rittinger (1867) postuló que la entrada de energía para la conminución es proporcional a la superficie específica de la partícula generada (Hogg,1999), mientras Kick (1885) se basó en el volumen de la masa; posteriormente, Bond (1952), considero el valor proporcional a la fractura de la partícula como una variable dependiente, lo que da como resultado que hoy en día este método sea el más utilizado y confiable para predecir la energía en la molienda de minerales.

Las leyes de conminución están ligadas al tamaño de partícula para determinar el consumo y eficiencia energética de los molinos de bolas; por lo tanto, la energía de molienda requerida para la reducción de tamaño de cualquier mineral se basa en la energía del eje del molino, la cantidad y tipo de medios de molienda, la carga efectiva del molino y la moliendabilidad del mineral entre otros.

Cuando se aplica una fuerza de intensidad creciente a una partícula que se requiere fragmentar, en un primer momento esta se deforma y la deformación aumenta hasta rebasar el límite de resistencia y se fractura, creando partículas nuevas a partir de la partícula inicial. La velocidad a la cual aumentan su área superficial las partículas puede ser descrita en una cinética de fragmentación (Austin y Concha, 1994).

Partiendo de la teoría de balance de población, la cual permite explicar cómo pueden cambiar las partículas con respecto al tiempo, se puede plantear un balance entre las partículas que desaparecen contra las partículas nuevas producidas por la fractura, usando la función de selección con respecto al índice de molienda, asimilando que esta desaparición/aparición es debido a la energía específica de los molinos en función de la potencia consumida. Por esta razón, es importante determinar la energía específica de los molinos rotatorios, ya que si la velocidad de fractura aumenta, la potencia del molino también aumentará; y viceversa, al determinar la función de selección del mineral se puede conocer qué porcentaje de mineral se fractura en distintos intervalos de tiempo, principalmente con base a la eficiencia energética del proceso de molienda. Al mismo tiempo, el conocer la función de selección del mineral, en conjunto con su índice de trabajo, ayuda a establecer cuáles son los factores necesarios por corregir para evitar sobre molienda y excesos de energía consumida en los molinos.

I. Antecedentes de la función de selección e índice de trabajo

I.1 Molinos

Los molinos son cilindros grandes que giran sobre su eje, en su interior existe una mezcla de material para moler junto con medios de molienda o cuerpos moledores, estos medios pueden ser: cilindros metálicos, bolas de acero o cerámica. El tipo de material del medio de molienda depende del grado de conminución requerido, así como del tipo de mineral a moler (Austin, L.G, 1997).

El mecanismo de fractura principal en un molino es la abrasión, la cual se produce al girar el eje de este, y debido a que las partículas del mineral se desplazan sobre si mismas, se produce un gran roce y el desgaste de la superficie, por lo que se generan distintos fragmentos.

Por otra parte, cuando el molino gira se producen fuerzas rotatorias, las que junto con la velocidad de molienda, producen fuerzas de impacto, la velocidad de rotación generada hace que las partículas sean lanzadas junto con los medios de molienda en forma de cascada, creando pequeños choques efectivos entre los medios de molienda y las partículas para producir una fragmentación desde una partícula inicial de tamaño j (Austin, L.G, 1997).

Dentro de un molino se pueden definir zonas según el grado de llenado y la velocidad de rotación, en la Figura 2 se puede distinguir las zonas del interior de un molino.

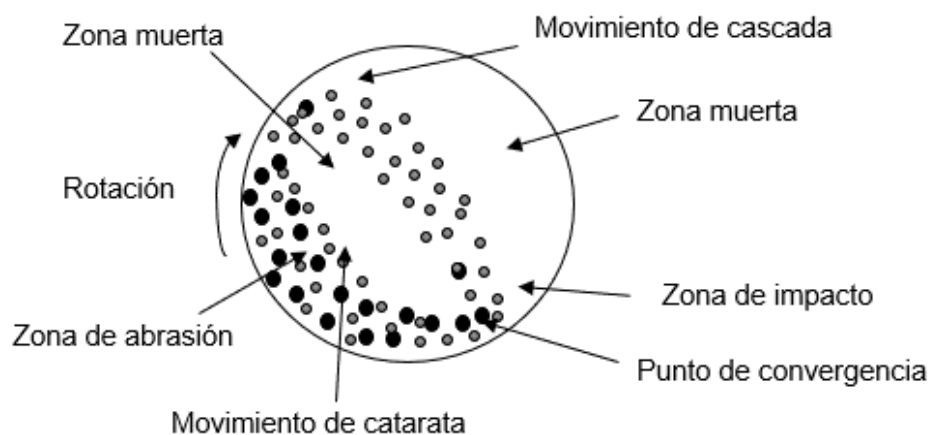


Figura 2. Zonas en el interior de un molino

Se consideran como elementos característicos, con respecto al funcionamiento de un molino, los siguientes factores:

- A. Nivel de carga
- B. Velocidad de rotación.
- C. % de solidos (relación agua/sólidos).

I.I.I Nivel de carga

El grado de nivel de carga se refiere a la proporción de volumen interno del molino que ocupa en conjunto con el material a moler y el medio de molienda, es un factor de alta importancia debido a que afecta el rendimiento del molino; es decir, representa la variación de la potencia consumida por el molino en función del grado de llenado. El nivel de carga de los molinos depende de varios factores, incluyendo el tipo de molino y el mineral a moler; el valor máximo carga de un molino oscila entre el 40 y 45% de llenado, ya que, al rebasar este rango, la potencia del molino se hace nula debido a que los medios de molienda aportan una masa que se opone al movimiento de este (L. Guzmán,2002).

En la práctica el grado de llenado ideal del molino comprende entre el 30 al 45%, y en general el 45% se conforma por el mineral y los medios de molienda.

I.I.I.I Factores que influyen la carga de los molinos

- Velocidad del molino: se encuentra entre el 70 al 75% de la velocidad crítica del molino.
- Dimensiones del molino y medios de molienda.
- Volumen del mineral alimentado o volumen de carga.

I.I.II Velocidad de rotación

La velocidad de rotación en un molino es de suma importancia debido a que produce el desplazamiento de la carga lo que hace que se produzcan choques efectivos entre las partículas y los medios de molienda, es así como con los mecanismos de abrasión e impacto se obtiene la fragmentación de las partículas (Hogg and Fuerstenau,1972).

I.I.III Porcentaje de sólidos

El porcentaje de solidos se refiere a la proporción de material sólido en la mezcla de mineral y agua que se alimenta al molino. Este porcentaje es crucial para determinar la eficiencia y la efectividad del proceso de molienda, debido a que un porcentaje adecuado de solidos

permite una mejor moliendabilidad de los minerales distribuyendo los sólidos uniformemente dentro del molino.

Es importante considerar que la molienda de minerales se puede realizar en medio húmedo o seco, esto depende del grado de fragmentación y el rendimiento del molino que se quiera, a mayor humedad en la molienda, mayor grado de fractura de las partículas.

Cada tipo de molienda tiene sus ventajas y desventajas; la molienda en húmedo proporciona confinación de finos en la pulpa, mejor control del tamaño de partícula y menor consumo de energía, mientras que la molienda en seco se utiliza para minerales que pueden ser sensibles al agua para evitar la alteración de sus propiedades o materiales con aplicaciones más específicas de la industria aeroespacial o farmacéutica. Por lo tanto, se prefiere la molienda en húmedo debido al control de polvos, mayor eficiencia en la molienda y menor desgaste de los equipos, ya que la molienda en seco puede ser más costosa debido a los desafíos y costos asociados con un mayor consumo de energía, y mayor desgaste de los equipos de molienda (Hogg and Fuerstenau, 1972).

I.II Fuerzas de interacción durante la molienda

La fragmentación es la reducción de una partícula a tamaños menores, con respecto a uno inicial, como resultado de romper la cohesión molecular en algunas partes marcando líneas de fractura (Wang y Forssberg, 2018).

Los materiales y las sustancias presentan diferentes propiedades de fragmentación con respecto a su composición y características físicas, entre las propiedades más importantes están:

- *Molturabilidad*: Facilidad para la fragmentación, normalmente relacionada con la energía necesaria o con la dificultad para su fragmentación.
- *Abrasividad*: Carácter más o menos agresivo en cuanto al desgaste de los equipos y de los materiales entre sí (abrasión o atricción).
- *Pegajosidad*: Calidad de adherencia entre los materiales, que es función, normalmente de la humedad.
- *Viscosidad*: Definida como la fuerza de corte respecto a la velocidad de deformación cortante de las partículas.

I.III Teoría de la intensidad de esfuerzo

Cuando se aplica una fuerza de intensidad creciente a una partícula a fragmentar, la partícula, en un primer momento se deforma y la deformación aumenta hasta que se rebasa el límite de resistencia entre las fuerzas tensoras y compresoras, así se crean superficies nuevas a partir de una partícula inicial (Walton O. R, 1994).

El estudio de este proceso con respecto a la energía consumida aborda como el total de la energía necesaria se transforma en energía cinética, debido a la rotación de los equipos y la masa en movimiento dentro de los mismos.

La energía específica del molino dividida entre la masa o volumen total de partículas es un parámetro que influye en la fragmentación dentro de ciertos límites, si cambia la concentración del contenido de sólidos la energía puede aumentar o disminuir, lo que hace que la captura entre partícula y bolas sea deficiente (Wang Y., & Forssberg E., 2018).

Por lo tanto, a bajos contenidos de sólidos la eficiencia de captura entre bola y partícula es menor a 1, lo que indica un desperdicio de energía. Por el contrario, si existen altos contenidos de sólidos varias partículas se rompen, pero la eficiencia de captura es mayor a 1; por lo tanto, la reducción de las partículas no es buena. (Wang Y., & Forssberg E., 2018).

De esta forma se puede entender que, la entrada de energía específica es proporcional al producto de dos componentes: número de esfuerzo (SN) y la energía de esfuerzo (SE).

El SN está relacionado al número de colisiones por partícula durante determinado tiempo, y la SE es una medida de la energía promedio de dichas colisiones (Litster et al., 2004).

Para cualquier material existe siempre una intensidad de esfuerzo óptima, (SI_{OP}), con la que se obtiene un tamaño mínimo de partícula, esto relaciona a partículas de cierto tamaño y composición con el esfuerzo crítico al que se rompen. Una intensidad de esfuerzo demasiado baja hace que las partículas se deformen elásticamente por lo que no se produce la molienda; al aumentar la intensidad de esfuerzo aumenta el número de colisiones y se produce una molienda eficaz (Walton O. R, 1994). Conforme la intensidad de esfuerzo se incrementa, se produce un exceso de energía de colisión que se desperdicia, ya que se reduce la velocidad de fragmentación en las partículas, con intensidades de esfuerzo muy altas la eficiencia de captura es mayor a 1, y la energía de colisión no es la adecuada (L. Taylor et al., 2020).

Con respecto al área transversal de las partículas, a menor área transversal es menor la energía de intensidad de esfuerzo aplicada, debido a que la intensidad de esfuerzo disminuye con el tamaño de partícula.

I.IV Relación entre la función de selección y el índice de molienda de los minerales

Una revisión de la literatura demuestra que los estudios que relacionan la función de selección de los minerales con el índice de molienda son pocos y no incluyen parámetros que deben de ser considerados. A continuación, se muestran algunos estudios e investigadores que han analizado ambos parámetros:

- (Malcolm G. et. Al.2020) realizaron un estudio de correlación entre los valores de dureza Vickers y el índice de trabajo para la molienda de minerales, obteniendo resultados con respecto a la energía necesaria para la conminución de los minerales en relación con su dureza.
- (Norazirah, et Al. 2016), en su trabajo sobre el efecto del tamaño y forma en las características de fractura de los minerales, realizaron una prueba de caída de peso para estimar la fragmentación de las partículas y la forma de estas, utilizando diferentes niveles de energía de entrada. Esto demostró que el tamaño y forma de las partículas influyen en la función de quebrado y el índice de molienda de los minerales.
- (Concha et al., 1992) expusieron la eficiencia del proceso de conminución mediante teorías relacionadas con la fractura de las partículas para rangos de partículas a distintos tamaños, observando el rendimiento de los molinos con respecto a el índice de molienda de los minerales y la distribución del tamaño de los medios de molienda utilizando carga de collares de bolas óptimos para una molienda más eficiente, realizando diferentes pruebas de molienda para caracterizar las propiedades de los minerales mediante la velocidad de rotación de los molinos y el tamaño de los medios de molienda.
- (Francois M. et al.,2009) realizaron un estudio para determinar el efecto del tamaño ideal de bola con respecto a la velocidad de fractura. Este estudio se centra en la determinación de los parámetros de la función de selección que describen el efecto del tamaño de bola en la velocidad de molienda utilizando tres distintos tamaños de

bola, dando como resultado distintos efectos de conminución de las partículas a diferentes velocidades de fractura.

- (Fuerstenau et al., 1999) presentaron el efecto del tamaño de bola con respecto a la eficiencia energética en molienda híbrida en un molino de rodillos de alta presión (HPRM), encontrando que la energía de este sistema puede aumentar la eficiencia energética del molino; por lo tanto, con este análisis se pudo relacionar el tamaño de los medios de molienda y el tamaño mínimo de partícula final.

Estos son algunos de los ejemplos de investigadores y pruebas realizadas, los cuales contribuyen con sus trabajos a analizar la función de selección y el índice de molienda con diferentes pruebas, relacionando ambos parámetros por separado con distintas variables dentro de los procesos de molienda.

La relación entre la función de selección y el índice de molienda de los minerales, es importante debido a que la función de selección describe la velocidad de reducción de las partículas seleccionadas para ser molidas mediante el proceso de molienda, mientras que el índice de molienda es una medida de la energía necesaria para lograr esta reducción de partículas; por lo tanto, este trabajo se centró en obtener una relación de ambos parámetros, argumento que no toman en cuenta los trabajos citados.

I.V Índice de trabajo o índice de Bond.

Este método de cálculo fue diseñado por F.C. Bond (1952-1961), tiene más de 50 años y aún se sigue utilizando con molinos estándar de bolas para laboratorio, o molinos de Bond con esquinas redondeadas e interior liso (Walton O. R, 1994).

Bond definió los ensayos experimentales para la determinación de este parámetro, tanto en trituración como en molinos de barras y bolas. El índice de trabajo es un método de caracterización de un mineral para conocer el comportamiento de este con respecto a la molienda aplicada, con base en la dureza y resistencia a la fractura; mientras más duro o resistente a la tracción sea un mineral, más difícil puede ser su molienda y, por lo tanto, el valor del índice de trabajo y la energía del molino aumentan (Bond, F. C., 1961).

El índice de trabajo (W_i) es un cálculo de la potencia requerida para moler un material desde un tamaño teóricamente infinito x_G , hasta un tamaño de descarga X_Q , en donde pase el 80% de partículas menores a 100 μm , esto permite estimar la energía necesaria para una molienda eficiente kWh/t.

Para calcular el W_i se requieren datos experimentales en condiciones estrictas de operación para minimizar los errores, de esta forma se pueden comparar los datos obtenidos en diferentes laboratorios, esto para que los valores utilizados sean más confiables en comparación distintos minerales y a distintas condiciones de operación de molienda, con respecto al diseño y escala de los molinos (Bond, F. C., 1961).

I.VI Función de selección específica (S_i^E)

La función de selección específica es una forma para definir la probabilidad de que una partícula se fracture al ocurrir un evento de molienda. Con base a las características del mineral, tales como composición y tamaño de partícula, se puede estimar la fracción de las partículas de un tamaño i presentes en la carga del molino que se fracturarán en una unidad de tiempo.

Para tamaños grandes de partícula la función de selección es alta debido a que es muy probable que se fracturen; de igual forma, conforme el tamaño de partícula disminuye, la función de selección decrece debido a que hay menor probabilidad de que existan fracturas en las partículas. La energía, al ser una variable que controla el proceso de molienda, se puede derivar de la función de selección específica la cual es invariante y característica del mineral. En Figura 3 se muestra una representación de la función de selección específica, con base a los parámetros que la controlan, con respecto a la carga de los medios de molienda (J.A Herbst. & Fuerstenau, 1980).

También, de esta función se puede obtener la función de selección, S_i , como se demuestra a continuación:

$$S_i^E = \frac{S_i H}{P} \dots\dots\dots 1$$

$$S_i = \frac{S_i^E P}{H} \dots\dots\dots 2$$

$$S_i^E = \frac{\alpha_0 (d_i)^{\alpha_1}}{[1 + (d_i/d_{crit})^{\alpha_2}]} \dots\dots\dots 3$$

Donde S_i^E es la función de selección específica (t/ kWh), S_i es la función de selección (tiempo⁻¹), α_0 es el valor de la función de selección para partículas de 1 μ m, depende de la distribución de carga de las bolas (adimensional). α_1 es la pendiente de la función de selección en las partículas más finas, varía entre (0.5 – 1.5) (adimensional), α_2 indica la tasa de decrecimiento de la función de selección en la zona de gruesos. (adimensional). H es el nivel de llenado de partículas del molino (t), P es la Potencia del molino (kW).

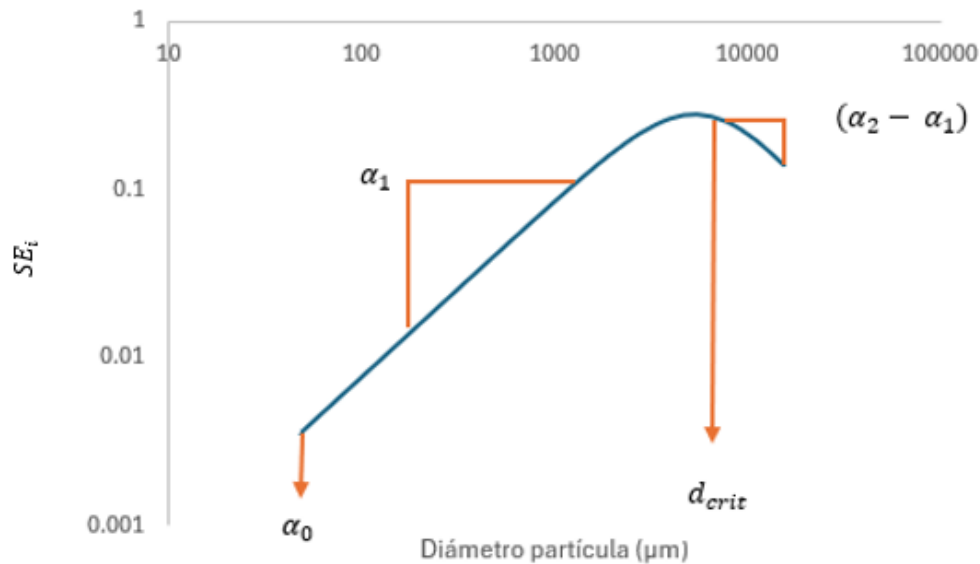


Figura 3. Representación de las partes complementarias de la función de selección

I.VII Función de quebrado (B_{ij})

Esta función define la distribución granulométrica de los productos obtenidos después de un proceso de molienda, depende de la dureza del mineral, el tamaño del medio de molienda, el tamaño de las partículas alimentadas y de la viscosidad de la pulpa dentro del molino (Tavares, 2014).

Si un material de tamaño j es fracturado, la fracción en peso del producto de tamaño i se denomina b_{ij} , la matriz de estos tamaños describe la fractura de todos los tamaños de interés. En general, las distribuciones de partículas se trabajan de manera acumulada; así, B_{ij} es la fracción en peso acumulativa de material fracturado del tamaño j que es menor al tamaño superior del intervalo del tamaño i (Austin y Concha, 1994).

$$B_{ij} = b_{nj} + b_{n-1j} + b_{ij} = \sum_{k=i}^n b_{kj} \dots \dots \dots 4$$

Los valores de B_{ij} se determinan mediante pruebas de molienda a tiempos cortos y a condiciones de operación normal.

Si se realiza la analogía entre un reactor y un molino, los reactivos son las partículas gruesas que ingresan al molino y los productos son las partículas finas que salen; es decir, la velocidad específica de ruptura de un tamaño es equivalente a una constante de velocidad de reacción química de primer orden (Austin y Concha, 1994). Del mismo modo

que en un reactor, si las condiciones de operación del molino cambian (medios de molienda, carga del molino, velocidad de agitación, granulometría de alimentación, entre otras), la velocidad de fractura también cambiará.

La velocidad de desaparición de partículas de determinado tamaño es proporcional a la masa de partículas de ese tamaño presentes en el molino en determinado tiempo. Si se considera W como la cantidad de masa disponible para fragmentarse en el molino y $w_1(t)$ es la fracción del tamaño i , la velocidad de desaparición de la masa de la fracción de tamaño i en un intervalo de tiempo será correspondiente a lo siguiente:

$$\frac{d[w_1(t)W]}{dt} \propto -w_1(t) \dots \dots \dots 5$$

Como la masa en el molino W es constante, es posible plantear la ecuación anterior como sigue:

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 w_1(t) \dots \dots \dots 6$$

Donde S_1 es la velocidad específica de fractura (min^{-1}) y puede ser determinada mediante pruebas de molienda con un solo tamaño de partícula y un W fijo.

Esta función se complementa con la función de selección (S_i), la cual describe a la velocidad de fractura de cada partícula en un instante (t) cualquiera (Baawuaha et al., 2020). Para las partículas retenidas en una malla ($i + 1$) donde i es la fracción y 1 es la malla con abertura más amplia la cual no debe retener partícula alguna. Dado que la función de selección describe la velocidad de cada partícula, el producto ($S_i \Delta t$) representa la fracción del mineral retenido en la malla ($i + 1$) al instante t durante el periodo posterior al tiempo de molienda aplicado.

La función de quebrado, (B_{ij}), es la fracción en peso de los fragmentos provenientes de la fractura de las partículas antes retenidas en la malla ($j + 1$) y que resultan retenidos en la malla inferior ($i + 1$). En la Figura 4 se muestra una representación esquemática de las dos funciones para llegar a distintos grados de conminución (Morrison et al., 2007).

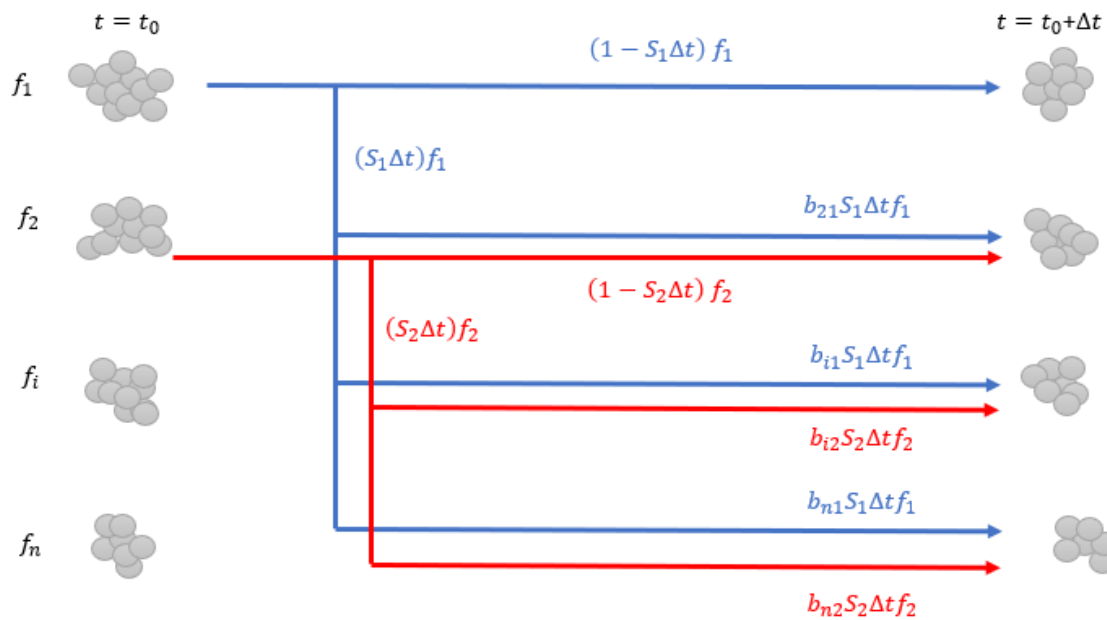


Figura 4. Eventos de fractura y generación de partículas durante un instante Δt

Por definición la función de quebrado se calcula de la siguiente forma:

$$B_{ij} = \sum_{k=n}^{i+1} b_{ij} \dots \dots \dots 7$$

Donde B_{ij} es la función acumulativa de quebrado (adimensional), b_{ij} es la función de distribución de quebrado (adimensional) y k es el parámetro de velocidad de fractura (min^{-1}).

I.VIII Modelo de balance poblacional

Los modelos de balance poblacional describen el comportamiento simulado de cualquier proceso, en el caso de los procesos de molienda se basan en la distribución del tamaño de partículas.

Los modelos de balance poblacional para molienda se basan en los conceptos de selección y distribución de quebrado, debido a que en un evento de quebrado las partículas de tamaño x tienen la probabilidad certera de quebrado. La probabilidad de selección de quebrado depende de x , pero es independiente de la densidad de la masa de las partículas. La fractura de un conjunto de partículas de tamaño x es descrita como un proceso de velocidad, mediante las interacciones de las partículas existentes dentro del molino con diferentes tamaños; esto puede llevar a una dependencia poblacional de la velocidad

especifica de fractura $S_i(x)$, considerando un intervalo de tiempo Δt , durante el cual solo ocurrirá un evento de quebrado de ciertas partículas de tamaño x .

Dentro del balance poblacional se presentan dos modelos de cinética de molienda, el no lineal y el lineal.

I.VIII.I Modelo de cinética no lineal

En un volumen representativo de mineral cuando se encuentra girando en un molino, las partículas tienen choques efectivos, lo que transmite energía entre ellas mismas. Algunas partículas se fracturan si los esfuerzos son altos, y otras se deforman solamente si los esfuerzos no son lo suficientemente altos. Desde el punto de vista de las interacciones físicas y mecánicas, se espera que la función de selección y la función de quebrado dependan de la densidad del mineral; sin embargo, en el modelo no lineal la función de quebrado es menos sensible al cambio en las condiciones de operación y a la distribución de tamaño de alimentación que los parámetros de la función de selección (Rajamani y Guo, 1992). Por lo tanto, la función de quebrado es independiente de la densidad del mineral y la función de selección depende de la interacción entre las partículas.

I.VIII.II Modelo de cinética lineal

La velocidad de producción de cada tamaño se representa en términos de la función de selección y la función de quebrado, debido a que la producción de partículas de tamaño i , a partir de las partículas de tamaño j , corresponde a la fracción de partículas de tamaño j , que por fractura pasan a tamaño i , con respecto a la carga del mineral y a la velocidad de fractura, considerando que la carga del molino permanece siempre mezclada y a una velocidad constante. El balance matemático se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{Wd_{wi}(t)}{dt} = [b_{i1}S_1Ww_1(t) + b_{i2}S_2Ww_2(t) + \dots + b_{ii-1}S_{i-1}Ww_{i-1}(t)] - S_iWw_i(t) \dots \dots \dots 8$$

La expresión negativa de la ecuación representa las partículas acumuladas, y la parte positiva representa las nuevas partículas fragmentadas, ambas partes corresponden a la cinética de molienda (la figura 4); de igual forma, para una molienda discontinua, donde la carga del molino permanece mezclada, el balance poblacional queda como:

$$\frac{Wd_{wi}(t)}{dt} = -S_i w_i(t) + \sum_{j=i}^{i-1} b_{ij}S_jw_j(t) \dots \dots \dots 9$$

Donde i, j son índices de clase de tamaño (1 partículas gruesas hasta n partículas más finas), w_i es la fracción de masa de partículas en el tamaño de clase i , b_{ij} es la función de quebrado para partículas formadas cuando un tamaño de partícula j es fracturado en partículas i . S_j es la función de selección correspondiente a tamaños de partículas j .

Esta ecuación también se conoce como modelo lineal de tiempo invariante, debido a que la velocidad específica de fractura no varía con el tiempo y su valor discretizado solo depende del valor de la partícula del producto.

Hipótesis

La función de selección indica la eficiencia de la reducción de tamaño de las partículas, mientras que el índice de molienda es una medida de la energía requerida para obtener esa reducción. Por esta razón, se puede realizar una asociación entre ambos parámetros debido a que un mineral con una alta función de selección; es decir, que se fractura rápidamente, requerirá de menos energía para alcanzar un determinado tamaño de partícula en comparación con un mineral con baja función de selección. Así, un mineral con un valor alto de función de selección tendrá un menor índice de molienda y por lo tanto existiría entre ambos parámetros una correlación inversamente proporcional.

Objetivo

Correlacionar el índice de trabajo del mineral con la función de selección para demostrar el comportamiento que adoptan ambos parámetros.

Objetivos específicos

1. Realizar cinéticas de molienda a diferentes tiempos con collares de bolas de 1, 1.5 y 2 pulgadas para obtener análisis granulométricos
2. Obtener la función de selección mediante el programa de simulación de Molycop Tools para determinar la velocidad de fractura de las partículas.
3. Calcular los índices de molienda de los minerales para determinar la energía necesaria para la molienda de estos.

Interpretando los datos de la velocidad de fractura de las partículas mediante la función de selección al compararlos con los índices de molienda se podrá determinar si la hipótesis se puede confirmar.

II. Metodología experimental de la determinación de la función de selección e índice de trabajo

En el presente trabajo se realizaron cinco pruebas de molienda a tres tiempos distintos, con collares de bolas de 2, 1.5 y 1 pulgadas para tres minerales distintos. A partir de las cinéticas de molienda se obtuvieron las granulometrías de entrada y salida a cada tiempo de molienda, y se midió la corriente eléctrica promedio del molino, para calcular la potencia promedio de este. Posteriormente se obtuvieron las curvas de función de selección utilizando el programa de simulación Molycop Tools usando los datos de los análisis granulométricos de entrada y salida de los minerales; y se determinaron los índices de trabajo de cada mineral; para realizar un análisis entre la velocidad de fractura (función de selección) y los índices de molienda de cada mineral.

Finalmente, a partir del análisis entre velocidad e índice, se obtuvo una correlación lineal de primer orden, para demostrar la correlación entre ambos.



Figura 5. Diagrama de la metodología experimental

II.I Minerales utilizados

El mineral No 1 fue un mineral polimetálico de Pb-Cu-Zn, el mineral No 2 un compuesto de sulfuros y óxidos y el mineral No 3 de fluorita, estos minerales se homogenizaron para tomarse muestras de 2 kg y realizar las cinéticas de molienda.

II.II Material

El material utilizado para llevar a cabo la experimentación es el siguiente;

Para determinar el W_i se utilizó un molino de 0.20 m de diámetro y 0.26 m de largo con el cual se realizaron los 5 tipos de pruebas y el cálculo del índice de trabajo de cada mineral. Las dimensiones del molino se observan en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del molino de Bond para determinar el W_i

Dimensiones	Valor
Diámetro (m)	0.2032
Longitud (m)	0.2667
%Carga	40
Volumen Interno (m ³)	8.65
Densidad de la bola (t/m ³)	7.75

Para realizar el análisis granulométrico se utilizó el siguiente material: Mallas de la serie Tayler de # 10, 12, 14, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270 y 400, WS Tyler Rotap RX-29 Sieve Shaker, charolas, espátulas y brochas.

Se utilizó un amperímetro, para medir la corriente después de cada tiempo de molienda que se utiliza para calcular potencia promedio de molienda en cada prueba.

II.III Cálculo del % carga en el molino

El porcentaje de carga (%C) representa el porcentaje del volumen interior del molino ocupado por las bolas y el mineral. Para este trabajo se estableció una carga de 40% de llenado para determinar la cinética de la molienda.

El volumen total interno del molino se calcula como:

$$V_{molino} = \frac{\pi}{4} D_{int}^2 L_{int} \dots\dots\dots 10$$

donde D_{int} es el diámetro interno del molino (m) y L_{int} : longitud interna del molino (m).

Una vez calculado el volumen interno del molino, se puede calcular el volumen de la carga para poder conocer la porosidad ideal del sistema, la cual es la cantidad de huecos entre las bolas y el mineral. Para lograr una captura eficiente de 1, entre bolas y partículas (ε), la fracción de porosidad en los molinos es generalmente de 0.35, por lo que para calcular la porosidad ideal del sistema (P), se usa la ecuación:

$$P = 1 - \varepsilon \dots\dots\dots 11$$

Con base en la ecuación anterior se calcula el volumen de las bolas (V_{bolas}), y la masa total de las bolas (m_{bolas}) tomando en cuenta la densidad de estas (ρ_{bolas}).

$$V_{bolas} = \frac{\pi}{4} D^2 L * \frac{\%C}{100} (1 - \varepsilon) \dots\dots\dots 12$$

$$\rho_{bolas} = \frac{m_{bolas}}{V_{bolas}} \dots\dots\dots 13$$

$$m_{bolas} = \rho_{bolas} \left[\frac{\pi}{4} D^2 L * \frac{\%C}{100} (1 - \varepsilon) \right] \dots\dots\dots 14$$

II.IV Cinéticas de molienda

Se realizaron cinco pruebas de molienda, cada una con 2 kg de mineral y una distribución granulométrica desde la malla #10 hasta la malla #400. Para cada molienda se utilizó el molino de la Figura 6, y las pruebas se llevaron a cabo a tiempos de 0,1.5, 7.5 y 15 minutos con el mineral correspondiente.

Cada una de las pruebas se diferencian por el collar de bolas empleado. Para determinar el peso de las bolas con respecto a las dimensiones del molino, se calculó aproximadamente un peso de 17.27 kg para aforar a un 40% de carga del molino; por lo tanto, en este caso se optó por proponer los porcentajes llenado de los collares de bolas, como se puede ver en la Tabla 2.



Figura 6. Molino de bolas utilizado en las pruebas de cinética de molienda

Tabla 2. Gradiente de bola utilizado en cada prueba de molienda a 40% de carga de molino

Collar	% Llenado de bolas (%)	cantidad de bolas	Área de contacto (m ²)
1 in	100	259.66	0.211
2 in	100	32.46	0.105
1 y 1.5 in	50/50	168.30	0.175
1 y 2 in	50/50	146.06	0.158
1, 1.5 y 2 in	33/33/33	121.79	0.151

Tomado en cuenta el valor de 17.27 kg (40% de carga), para el collar de bolas de 1 pulgada se requieren 259.66 bolas para obtener un área de contacto de 0.211 m². Para el collar de bolas de 2 pulgadas se determinaron 32.46 bolas para obtener un área de contacto total de 0.105 m².

Para 50% de llenado de bola de 1 pulgada y 50% de llenado de 1.5 pulgada, se requieren 8.63 kg de bolas de cada tamaño, por lo que se necesita un estimado de 168.30 bolas para completar el llenado del molino, es decir 129.83 bolas de 1 pulgada y 38.47 bolas de 1.5 pulgadas, obteniéndose un área total de contacto de 0.175 m².

Se empleó 50% de tamaño de bolas de 1 pulgada y 50% de llenado de bola de 2 pulgadas teniendo un peso aproximado de 8.63 kg en masa total de las bolas de cada tamaño para 40% de carga del molino, por lo que se emplearon 146.06 bolas aproximadamente para

este collar, considerando que se requirieron 129.83 bolas de 1 pulgada y 16.23 bolas de 2 pulgadas, obteniendo un área total de contacto de 0.158 m².

El collar de 1, 1.5 y 2 pulgadas ocupó 33% de cada tamaño de bola que resultó en 5.70 kg en masa total de cada tamaño de bola considerando 85.69 bolas de 1 pulgada, 25.39 bolas de 1.5 pulgadas y 10.71 bolas de 2 pulgadas, sumando 121.79 bolas totales al 40% de llenado del molino y un área total de contacto de 0.151 m².

Se puede analizar de esta tabla que, conforme disminuye el tamaño de las bolas el área de contacto aumenta, por lo que los puntos de contacto entre bola y partícula también aumentan y pueden beneficiar la selección de partículas fracturadas.

La distribución granulométrica de la alimentación para cada mineral se muestra en el apéndice A; además, se reporta el análisis granulométrico de salida para cada tiempo con diferentes collares de bolas. En apéndice B se encuentran las granulometrías con el gradiente de 1 pulgada, en el apéndice C para el gradiente de 2 pulgadas, en el apéndice D para el gradiente de (1 y 1.5) pulgadas, en el apéndice E para el gradiente de (1 y 2) pulgadas y en el apéndice F para el gradiente de (1, 1.5 y 2) pulgadas. Los cálculos de área de contacto de los collares y cantidad de bolas se pueden encontrar en el anexo G, mientras que los resultados de las diferentes cinéticas de molienda realizadas se pueden observar en el anexo H.

El producto obtenido de cada tipo de mineral y a cada a tiempo de molienda se homogenizó como se ilustra en la Figura 6 donde se toman 500 g de muestra representativa para realizar la prueba de análisis granulométrico en el WS Tyler Rotap RX-29 Sieve Shaker como se muestra en la Figura 7.



Figura 6. Homogenización de la muestra del mineral



Figura 7. Prueba de análisis granulométrico utilizando el Rotap

II.V Cálculo de potencia

Una vez realizado el análisis granulométrico de cada mineral y medido el amperaje a cada tiempo de molienda, se procedió a determinar la potencia promedio. Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación (15) donde el voltaje utilizado fue de 110 V con un factor de potencia de 0.8. Este cálculo se realizó para cada cinética de molienda después de cada tiempo transcurrido con los distintos collares de bolas utilizados durante la experimentación. Se utilizó un multímetro de gancho MUL-110 marca Steren para medir la corriente después de cada tiempo de molienda, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Medición del amperaje consumido en el molino a cada tiempo de molienda

Para obtener la potencia se utilizó la fórmula:

$$p = \frac{V \cdot I \cdot FP}{1000} \dots\dots\dots 15$$

Donde p es la potencia (kW), V es el voltaje (volts), I es la Corriente (A) y FP es el factor de potencia, los resultados de calculo de potencia promedio se pueden apreciar en el anexo I.

II.VI Cálculo de la densidad de los minerales

Para el cálculo de la densidad de los minerales se utilizó un picnómetro de 100 ml con el cual se realiza el proceso experimental:

- I. Pesar el picnómetro vacío y registrar el peso como M_1 .
- II. Pesar el picnómetro llenado con el mineral y registrar este peso como M_2 .
- III. Aforar el picnómetro con agua hasta la línea de enrasado y registrar el peso del picnómetro conteniendo agua, como M_3 .
- IV. Pesar el picnómetro, llenado previamente con mineral y después llenado con agua hasta el aforo y se registra el peso como M_4 .
- V. Calcular la masa del mineral usando la diferencia del peso del picnómetro con mineral y picnómetro sin mineral, es decir: $M_2 - M_1$.
- VI. Calcular el volumen del mineral (V_m) restando la masa del picnómetro con mineral y líquido, a la masa del picnómetro con líquido, y dividiendo esta diferencia por la densidad del líquido, es decir: $(M_3 - M_4) / \rho$ (densidad del líquido).
- VII. Calcular la densidad del mineral (D_m) dividiendo la masa del mineral por su volumen, es decir:

$$D_m = \frac{m_{\text{mineral}}}{V_{\text{mineral}}} \dots\dots\dots 16$$

Formula general:

$$D_m \frac{M_2 - M_1}{(M_3 - M_4)/\rho} \dots\dots\dots 17$$

Donde D_m es igual a la densidad del mineral, M_1 es el peso del picnómetro vacío, M_2 es el peso del picnómetro con el mineral, M_3 es el peso del picnómetro con el agua, M_4 es el peso del picnómetro con el mineral y el agua, ρ es la densidad del líquido de referencia (agua), los resultados de esta prueba se pueden observar en el anexo J.

II.VII Cálculo de la función de selección

La función de selección se calculó utilizando el programa de simulación de Moly-Cop Tool con hoja BallParam_Batch, el cual permite ingresar los datos referentes de los análisis granulométricos de entrada y salida de los minerales y la potencia promedio obtenida de las cinéticas de molienda. De igual forma, este programa requiere las condiciones de operación a las cuales se trabajó en la experimentación, como se observa en la Tabla 3 donde se muestra el diseño y condiciones de operación para el mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn) después de 15 minutos de molienda.

Tabla 3. Diseño y condiciones de operación para mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn)

Diseño y condiciones de operación			
configuración: Batch			
Mineral, kg	2.00	Diámetro, ft	1.00
Agua, L	0.00	Largo, ft	1.00
Pulpa, kg	2.00	Llenado de bolas, %	40.00
ρ Pulpa, kg/L	0.64	% Vel crítica	75.00
ρ Mineral, kg/L	3.10	App. Dens., t/m ³	5.19
% Sólidos	100.00	Potencia, kW	0.94
Tiempo de molienda, min	15.00	Energía, kWh/t	118.03

Al completar la información que requiere el programa, éste permite ajustar los datos para simular y predecir el comportamiento de los minerales con respecto a la función de selección y quebrado.

En la tabla 4 y 5 se muestran las condiciones de operación empleadas por el programa de simulación para el mineral No.2 (sulfuros y óxidos) y el mineral No. 3 (fluorita).

Tabla 4. Diseño y condiciones de operación para mineral No. 2 (sulfuros y óxidos)

Diseño y condiciones de operación			
configuración: Batch			
Mineral, kg	2.00	Diámetro, ft	1.00
Agua, L	0.00	Largo, ft	1.00
Pulpa, kg	2.00	Llenado de bolas, %	40.00
ρ Pulpa, kg/L	0.64	% vel, crítica	75.00
ρ Mineral, kg/L	3.14	App. Dens., t/m ³	5.19
% Solidos	100.00	Potencia, kW	0.91
Tiempo de molienda, min	15.00	Energía, kWh/t	113.55

Tabla 5. Diseño y condiciones de operación para mineral No. 3 (fluorita)

Diseño y condiciones de operación			
configuración: Batch			
Mineral, kg	2.00	Diámetro, ft	1.00
Agua, L	0.00	Largo, ft	1.00
Pulpa, kg	2.00	Llenado de bolas, %	40.00
ρ Pulpa, kg/L	0.64	% vel, crítica	75.00
ρ Mineral, kg/L	2.97	App. Dens., t/m ³	5.19
% Solidos	100.00	Potencia, kW	0.94
Tiempo de molienda, min	15.00	Energía, kWh/t	116.63

II.VIII Cálculo del W_i para cada tipo de mineral

El procedimiento experimental para determinar el W_i de cada muestra se describe a continuación:

- I. La alimentación estándar se prepara de tal forma que pueda pasar por una malla de 3.36 mm o malla #10, para evitar la sobre molienda.
- II. El mineral se homogeniza y se mide la densidad aparente, haciendo un empaquetamiento de 700 ml en una probeta de 1000 ml, una vez pesado el volumen de 700 ml, el producto se divide entre el factor establecido de Bond de 3.5 para simular 250% de carga circulante (Figura 9).



Figura 9. Homogenización y empaquetado del mineral en la probeta

- I. Se agrega al molino la carga fresca de 700 ml de mineral, y se realiza un primer ciclo a 70 rpm durante 90 s para completar 100 revoluciones.
- II. Se retira la carga del molino y se determina el peso de los finos y los gruesos, esto se hace pasando la carga del primer ciclo por la malla de referencia #80 en medio húmedo.
- III. Los finos se filtran y se secan en una estufa a 80°C, mientras que los gruesos se pasan directamente a una estufa a 80°C por 4 h, posteriormente se pesan y se procede a calcular los gramos por revolución.
- IV. Posteriormente, los gruesos del ciclo anterior se pesan y se meten al molino con una carga fresca suficiente para alcanzar el peso de los 700 ml, el tiempo que tendrá este ciclo se calcula considerando una carga circulante de 250%. Este valor se determina teniendo en cuenta los resultados del periodo previo para producir una cantidad de bajo tamaño igual a $100/3.5$ de la carga total del molino, de esta forma el número de revoluciones del ciclo siguiente se representa con la siguiente ecuación:

$$r_2 = r_1 \frac{100/3.5}{\psi_1(p_1)} \dots\dots\dots 18$$

Donde $\psi_1(p_1)$ es la cantidad de mineral que tiene tamaño menor que el producto 1 (p_1) después de r_1 revoluciones.

- V. Los ciclos continúan hasta que los gramos netos producidos a bajo tamaño de revolución alcancen o se acerquen al equilibrio de carga circulante. Entonces el tamaño y carga circulante se analizan granulométricamente y el promedio de los tres últimos Gpb corresponde al índice de molienda del molino.

$$Gpb = (\psi_{p1} - \psi_{f(p1)}) * \frac{w}{100 r^*} \dots\dots\dots 19$$

Donde $\psi_{f(p1)}$ es el porcentaje menor que la malla de separación $p1$ en la alimentación fresca al molino. w es la masa total de la carga del mineral al molino, r^* es el número de revoluciones necesarias para obtener la carga circulante de 250%.

- VI. Una vez que se realizan los pasos anteriores y se completan los ciclos necesarios para completar una carga circulante de 250%, se aplica la siguiente ecuación para obtener el índice de trabajo del mineral (kWh/t):

$$W_i = \frac{44.5}{P_i^{0.23} * Gpb^{0.82} * \left[\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right]} \dots\dots\dots 20$$

Donde el $P80$ y $F80$ son los tamaños de la malla que dejan pasar el 80% del producto y alimentación respectivamente.

El índice de trabajo de los minerales y la función de selección con respecto a la energía del molino comparten parámetros, esto debido a que el primero tiene unidades de medida de kWh/t y el segundo tiene t/kWh. Una vez que se obtiene la potencia neta demandada por el molino, se puede aplicar una correlación comparando ambas variables con los datos obtenidos de la velocidad de fractura y el índice de trabajo de los minerales.

III. Resultados y discusión de la correlación entre la función de selección y el índice de trabajo

III.I Resultados cálculo de la función de selección específica

Utilizando la molienda a diferentes tiempos se determinó la función de selección específica mediante el programa Moly-Cop Tools para cada tipo de mineral después de 15 minutos de molienda. En la Figura 10 se presenta la cinética de molienda con la función de selección de mineral No.1 polimetálico de Pb-Cu-Zn. Como se aprecia, mientras más grande es el valor de la función de selección específica menos energía se requiere para moler una tonelada de mineral a ese tamaño, indicando que la combinación de los diferentes collares de bola tiene un efecto significativo sobre función de selección específica, resultando que las bolas de 1 pulgada y un gradiente de bolas (1, 1.5 y 2) pulgadas aceleran la molienda disminuyendo el consumo de energía para producir las partículas. Se puede concluir que, la presencia de bolas de 1 pulgada, que se alojan entre los intersticios del mineral, genera una aceleración de la molienda. Por eso se observa en las operaciones industriales que los gradientes de bolas con bolas finas en su gradiente generalmente tienen una mayor productividad.

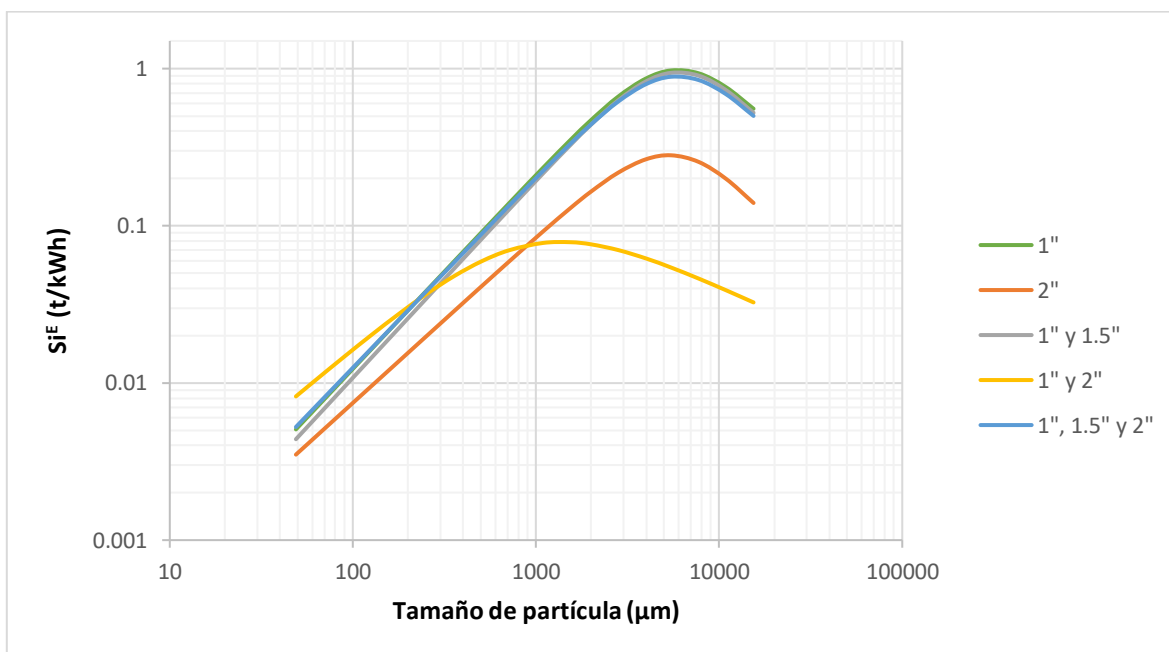


Figura 10. Determinación de función de selección específica para el mineral de Pb-Cu-Zn con diferentes collares de bolas

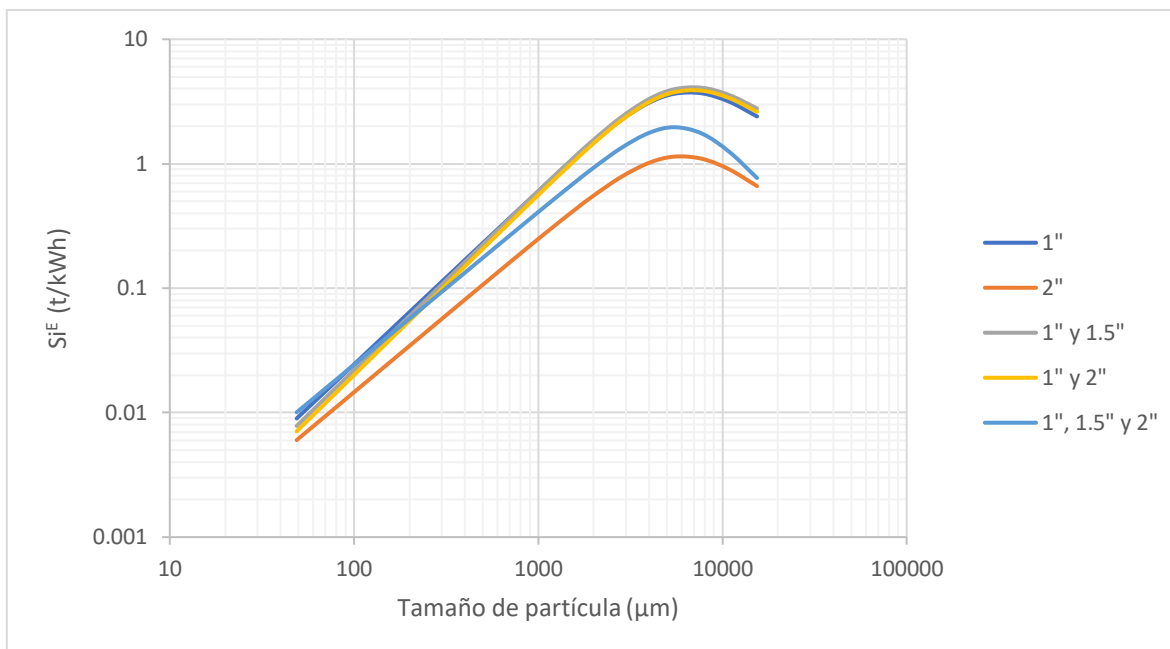


Figura 11. Determinación de función de selección específica de mineral de sulfuros y óxidos con diferentes tamaños de bolas a un tiempo de 15 minutos de molienda

En la Figura 11 se muestra el mineral de sulfuros y óxidos (mineral 2) para una cinética de molienda de 15 minutos utilizando los distintos collares de bolas. La combinación de collares con bola de 1 pulgada, (1, 1.5) pulgadas y (1, 2) pulgadas, son las pruebas con mayor incremento en la energía requerida por el molino; sin embargo, el grado de conminución del mineral permaneció similar en las 5 pruebas, por lo que se deduce que las pruebas con bolas de (1, 2) pulgadas, y (1.5, 2) pulgadas fueron los collares ideales para este mineral debido a que fueron las que necesitaron una menor potencia durante la cinética de molienda. Los resultados para esta segunda muestra siguen mostrando que bolas finas (1 pulgada) y el efecto de la molienda con bolas finas puede ser igualado con un gradiente adecuado.

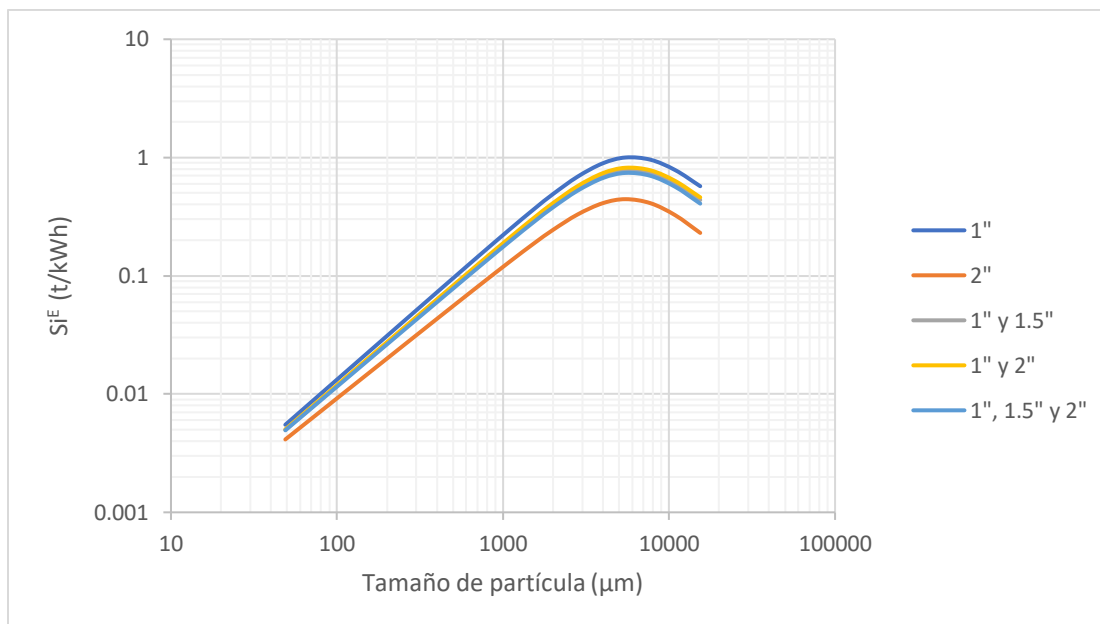


Figura 12. Determinación de función de selección de mineral de fluorita con diferentes tamaños de bolas a un tiempo de 15 minutos de molienda

Por otro lado, en la Figura 12 se muestra el cálculo de la función de selección específica para el mineral de fluorita, utilizando los distintos collares de bolas. Los resultados muestran que la combinación de collares con bola, de las 5 pruebas, fueron similares con respecto al incremento de energía requerida por el molino.

Cuando se utilizan bolas 2 pulgadas la molienda no es eficiente, presentando la velocidad de molienda más lenta; al igual que en la prueba anterior, la molienda muestra que el agregar un gradiente de bola acelera la moliendabilidad del mineral.

Comparando los resultados obtenidos de la función de selección con respecto a la alimentación y producto de los tres minerales al 80% del acumulado pasante (F80 y P80) y la velocidad de fractura, se puede apreciar mejor la moliendabilidad de cada mineral al momento de utilizar cada collar de bolas, como se observa a continuación en las gráficas obtenidas.

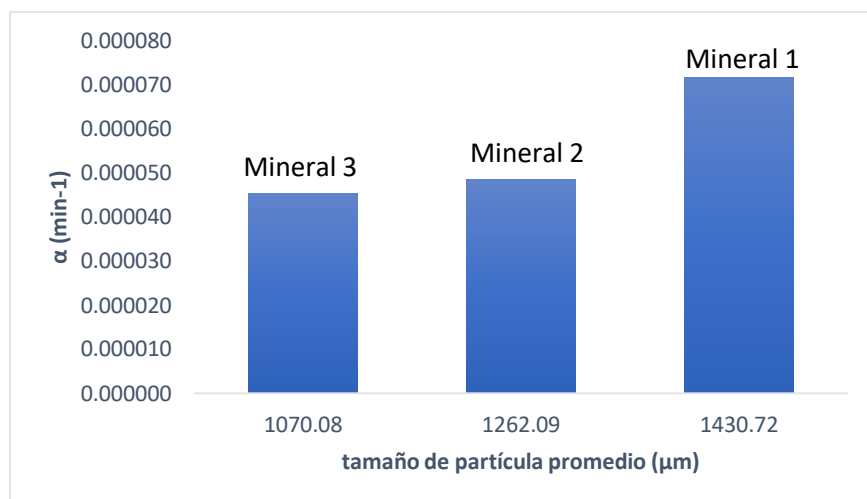


Figura 13. Velocidad de fractura promedio de los tres minerales contra el F80

En la Figura 13 se aprecia que el mineral 1 (Pb-Cu-Zn) entró al molino con el tamaño de partícula más alto (1430.72 μm) y también fue el mineral con la velocidad de fractura más alta (0.000072 min⁻¹); sin embargo, si bien el mineral de sulfuros y óxidos (mineral 2) y fluorita (mineral 3) tenían un tamaño de partícula de entrada similar entre ellos, con 1262.09 μm y 1070.08 μm respectivamente, y menor al tamaño del mineral 1, sus velocidades de fractura fueron menores (0.000045 min⁻¹ y 0.000049 min⁻¹).

Los resultados muestran que los collares de bolas utilizados representa una variable a considerar con respecto al tamaño de las bolas, debido a que la velocidad de fractura se incrementó para el mineral No. 1 Pb-Cu-Zn; lo cual se debe a que los tamaños de partícula y bolas más grandes tienen menor área superficial de contacto y esto disminuye los puntos de contacto entre los medios de molienda y las partículas, por lo que la selección de partículas fracturadas disminuye; sin embargo, a medida que transcurre el tiempo de molienda, las partículas se fracturan y aumentan su área de contacto, lo que propicia una velocidad de fractura mayor con un incremento en la selección de partículas fracturadas.

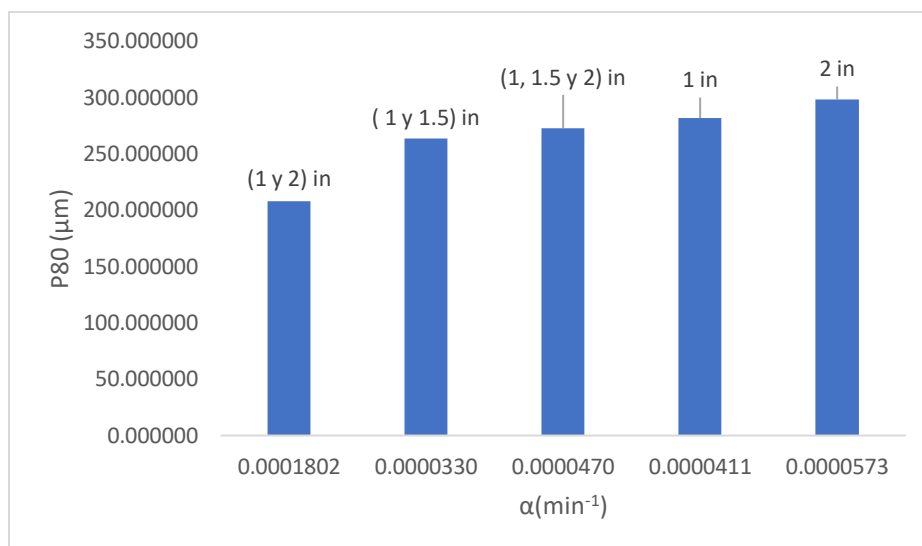


Figura 14. Velocidad de fractura contra P80 del mineral de Pb-Cu-Zn con diferentes collares de bolas

En Figura 14 se analiza la velocidad de fractura contra el producto al 80% del acumulado pasante (P80) después de 15 minutos de molienda utilizando los diferentes tamaños de bola para el mineral 1 (Pb-Cu-Zn). Los resultados muestran que se alcanza un menor tamaño de partícula de 207.90 μm y una alta velocidad de fractura con 0.00018 min^{-1} con un collar de bolas de (1 y 2) pulgadas, por lo que este collar es el ideal para tener una mejor moliendabilidad.

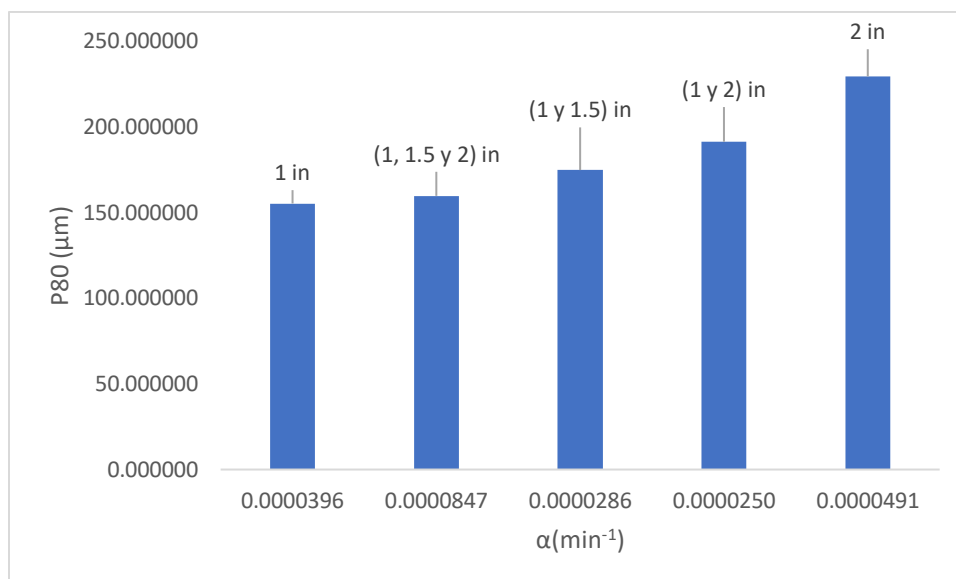


Figura 15. Velocidad de fractura contra P80 de mineral de sulfuros y óxidos con diferentes collares de bolas

En Figura 15 se muestra la gráfica de la velocidad de fractura del mineral de óxidos y sulfuros (mineral 2) con respecto al P80 obtenido después de 15 minutos de molienda, comparando con los diferentes tamaños de collares utilizados. Este tipo de mineral tuvo dos collares buenos para lograr una buena conminución de las partículas, los cuales fueron el collar de 100% bolas de 1 pulgada dando como resultado un tamaño de partícula de 155.28 μm y la combinación del collar de bolas de (1, 1.5 y 2) pulgadas con 159.76 μm de tamaño de partícula final. Sin embargo, el collar de 1 pulgada presentó una velocidad de fractura de 0.000039 min^{-1} , la cual es menor en comparación con el collar de (1,1.5 y 2) pulgadas con una velocidad de 0.0000847 min^{-1} , por lo tanto, es el collar idóneo para el mineral 2.

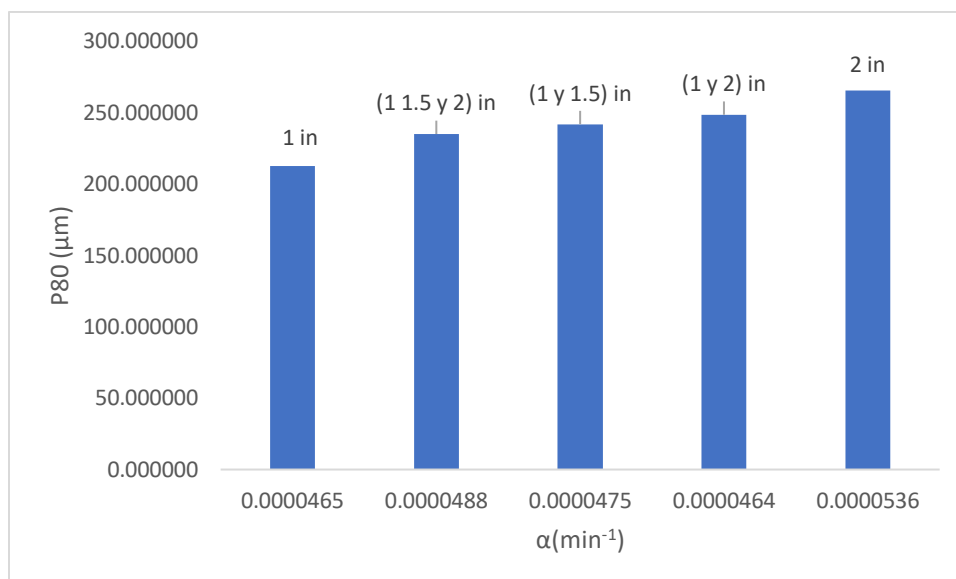


Figura 16. Velocidad de fractura contra P80 de mineral fluorita con diferentes collares de bolas

En Figura 16 se aprecia la velocidad de fractura del mineral 3 de fluorita y el P80 después de un tiempo de molienda de 15 minutos. Analizando la gráfica para las primeras 4 columnas, las velocidades de fractura y los valores de P80 obtenidos son similares y no representaron una variación considerable. En la última columna se observa que el collar de bolas correcto para este tipo de mineral fue el de 2 pulgadas, ya que exhibe la velocidad de fractura más alta, en comparación con los demás collares utilizados, propiciando un tamaño de partícula de 265.39 μm .

III.II Resultados del índice de trabajo

Los índices de Bond permitieron observar cómo fue el comportamiento de cada mineral respecto a la dureza y fragmentación de este. Las tablas siguientes muestran los datos obtenidos en cada ciclo de molienda, hasta llegar a un % de carga circulante equivalente al 250%.

En la tabla 6 se presenta el procedimiento con los datos obtenidos del mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn), el cual después de 9 ciclos alcanzó la carga circulante de casi 250%.

Tabla 6. Resultados de índice de Bond para mineral No. 1

Ciclo	No. Revoluciones	Gruesos obtenidos (g)	Finos obtenidos (g)	Gramos por revolución (gpr)	% Carga circulante (%)
1	100.00	994.70	328.30	1.07	302.99
2	146.31	1123.70	199.30	0.99	563.82
3	327.30	1011.70	311.30	0.85	324.99
4	405.83	949.20	373.80	0.79	253.93
5	411.12	915.30	407.70	0.84	224.50
6	375.76	917.60	405.40	0.90	226.34
7	345.23	969.50	353.50	0.83	274.26
8	374.83	955.20	367.80	0.82	259.71
9	387.21	938.50	348.49	0.83	244.08

En Figura 17 se observa como a partir del ciclo 7 los gramos por revolución se estabilizan, tomando en cuenta un promedio de los últimos 3 ciclos de la Tabla 6 se obtiene un promedio de 0.83 de gramos por revolución y una carga circulante de 259.35%.

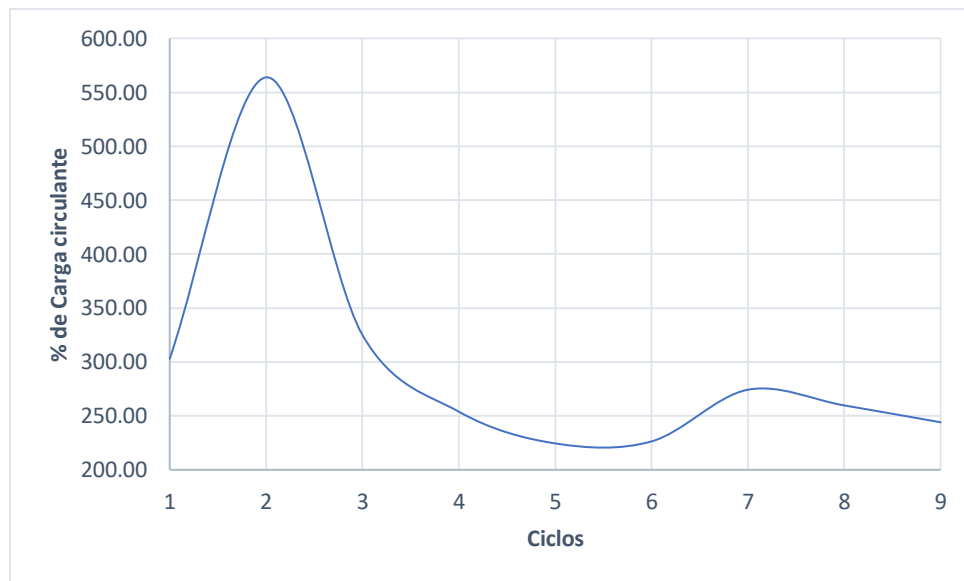


Figura 17. Comportamiento de la carga circulante después de cada ciclo

Utilizando la metodología explicada en la sección experimental, del cálculo del W_i aplicando los datos de la Tabla 7 en la ecuación 20 se obtiene que un W_i para el mineral No.1 de 24.11 kWh/t, el cual indica un mineral muy resistente a la molienda.

Tabla 7. Resultados del índice de Bond en mineral No. 1

Índice de Trabajo	
Gbp	0.85
F80 (μm)	1770.60
P80 (μm)	125.60
W_i (kWh/t)	24.11

Para la segunda muestra se realizó el mismo procedimiento para alcanzar la carga circulante de 250%, después de 8 ciclos como se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de índice de Bond para mineral No. 2

Ciclo	No. Revoluciones	Gruesos obtenidos (g)	Finos obtenidos (g)	Gramos por revolución (gpr)	% Carga circulante (%)
1	100.00	993.70	310.10	0.75	320.45
2	182.89	1055.20	248.60	1.05	424.46
3	300.46	1013.40	290.40	0.82	348.97
4	400.90	942.90	360.90	0.77	261.26
5	415.99	902.70	401.10	0.81	225.06
6	380.61	904.00	399.80	0.86	226.11
7	348.90	923.50	380.30	0.88	242.83
8	340.09	937.30	366.50	0.88	255.74

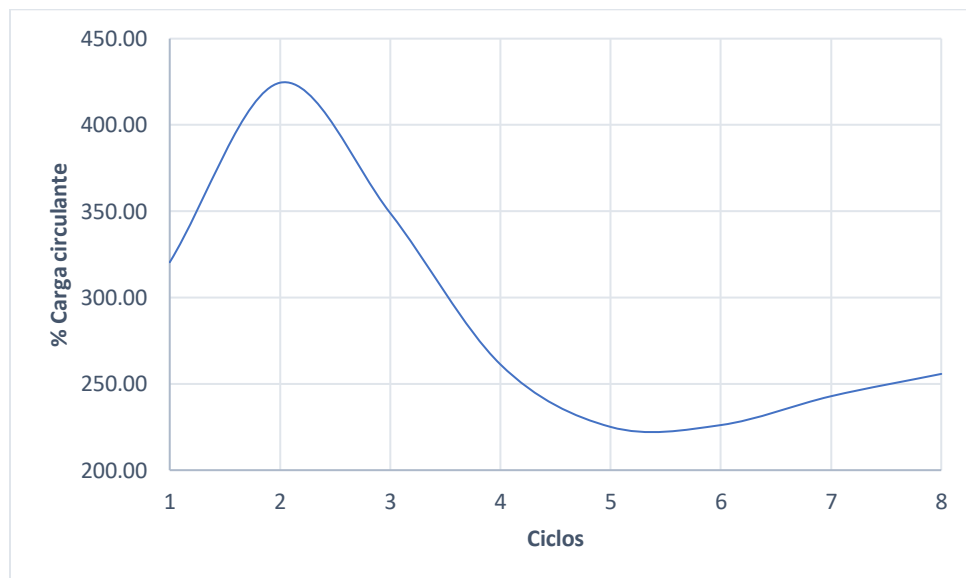


Figura 18. Comportamiento de la carga circulante después de cada ciclo

En la Figura 18 se puede ver como a partir del ciclo 6 se comienzan a estabilizar los gramos por revolución, dando como resultado un promedio de 0.87 gpr; asimismo, el porcentaje de carga circulante promedio durante los 3 últimos ciclos fue de 241.56%

Los resultados obtenidos del W_i para la muestra mineral No.2 (sulfuros y óxidos) se presentan en la Tabla 9, el W_i resulta de 24.56 kWh/t lo que indica un mineral resistente a la molienda.

Tabla 9. Resultados del índice de Bond en mineral No. 2

Índice De Bond	
Gbp	0.85
F80 (µm)	1314.08
P80 (µm)	125.88
W_i (kWh/t)	24.56

Para la muestra mineral No.3 (fluorita) se realizaron 9 ciclos con los cuales se alcanza 250% de carga circulante (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados de índice de Bond para mineral No. 3

Ciclo	No. Revoluciones	Gruesos obtenidos (g)	Finos obtenidos (g)	Gramos por revolución (gpr)	% Carga circulante (%)
1	1.28	786.60	394.40	1.28	199.44
2	1.14	1029.00	152.00	1.14	676.97
3	0.80	971.80	209.20	0.80	464.53
4	0.69	871.70	309.30	0.69	281.83
5	0.69	823.20	357.80	0.69	230.07
6	0.78	795.80	385.20	0.78	206.59
7	0.76	844.90	336.10	0.76	251.38
8	0.78	846.00	335.00	0.78	252.54
9	0.78	844.70	336.30	0.78	251.17

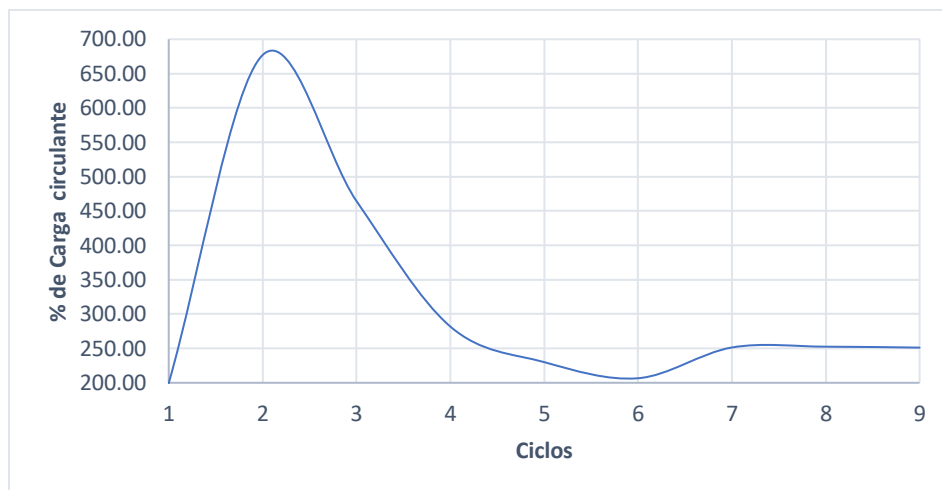


Figura 19. Comportamiento de la carga circulante después de cada ciclo

En Figura 19 se puede ver cómo se llega a la estabilidad con los gramos por revolución y la carga circulante, dando un promedio en los últimos 3 ciclos de 0.77 y 251.70% respectivamente, aplicando la ecuación 20 con los datos obtenidos de la Tabla 11 se calculó un índice de trabajo de 24.55 kWh/t

Tabla 11. Resultados del índice de Bond en mineral No. 3

índice de Bond	
Gbp	0.77
F80 (μm)	1418.99
P80 (μm)	107.74
W_i (kWh/t)	24.55

Tabla 12. Identificación de las muestras minerales e índice de trabajo

Muestra	Mineral	W_i (kWh/t)
1	Pb-Cu-Zn	24.11
2	Sulfuros y óxidos	24.56
3	Fluorita	24.55

En la Tabla 12 se muestra la identificación por el tipo de mineral y el índice de trabajo calculado de los tres minerales. Bond determinó una escala de moliendabilidad de los minerales de acuerdo con el impacto del índice de trabajo dando a conocer que a valores menores a 10 kWh/t los minerales son suaves y fáciles de moler. Para valores entre 18 a

22 kWh/t , los minerales son duros, entre 22 a 26 kWh/t se considera que los minerales son muy duros, y para valores mayores a 26 estos son extremadamente duros. En la Tabla 9 se aprecia que la muestra 2 y 3 fueron las muestras con un índice de trabajo más alto; sin embargo, las tres muestras tienen una alta resistencia a la molienda debido a que se encuentran en la escala de minerales muy duros.

III.III Velocidad de fractura

La variación de la velocidad de fractura en condiciones de molienda puede ser descrita con base a la energía específica aplicada en el molino dando la siguiente ecuación:

$$Si^E = \alpha \frac{M}{m_b}$$

Donde:

Si^E = Función de selección específica (t/kWh)

α = Velocidad de fractura (min^{-1})

M = Masa de la carga del mineral a moler dentro del molino (t)

m_b = Masa de los medios de molienda (t)

Las Figuras 20, 21 y 22 muestran la velocidad de fractura obtenida mediante la función de selección variando las muestras minerales (Pb-Cu-Zn, sulfuros y óxidos y fluorita) y los tipos de collares de bolas. Para este análisis se buscó que las pruebas pudieran aportar información específica de cuál es el collar de bolas idóneo para cada mineral y así lograr una conminución más eficaz. Además se realizó una comparación entre el índice de molienda y la velocidad de fractura promedio.

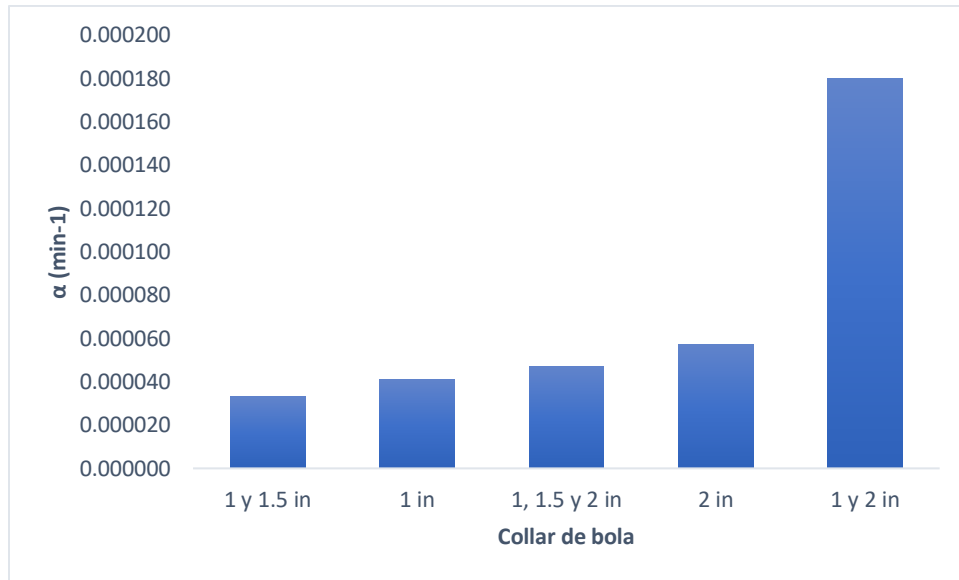


Figura 20. Velocidad de fractura del mineral 1 (Pb-Cu-Zn) con respecto a los distintos collares de bolas

En Figura 20 se observa que la velocidad de fractura del mineral 1 (Pb-Cu-Zn) más alta se obtuvo con el collar de bolas de (1, 2) pulgadas, para los otros collares no hay mucha diferencia entre las velocidades obtenidas y son más bajas en comparación con de (1, 2) pulgadas; por lo tanto, la función de selección será más eficiente con este tipo de collar favoreciendo la conminución del mineral.

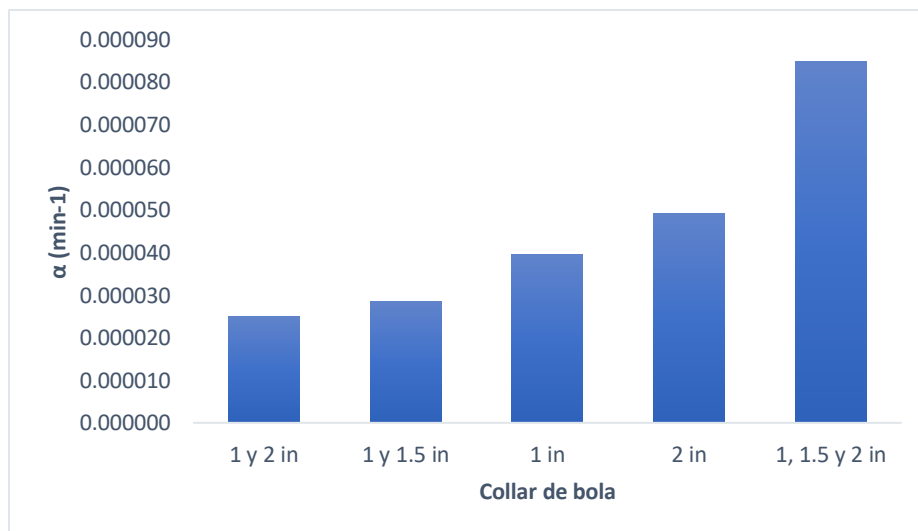


Figura 21. Velocidad de fractura del mineral 2 (sulfuros y óxidos) con respecto a los distintos collares de bolas

La Figura 21 representa una comparación de las velocidades de fractura obtenidas para el mineral 2 (sulfuros y óxidos) con cada tipo de collar. Los resultados muestran que el collar de bolas con la velocidad de fractura más alta fue el de (1,1.5 y 2) pulgadas, ya que se obtuvo una velocidad de $0.000085 \text{ min}^{-1}$. Esto demuestra que con esta combinación de bolas para este tipo de mineral existe un incremento en el área superficial de las partículas, debido a que el área de contacto entre bolas y partículas aumenta, lo que da lugar a una facilidad de choque mayor y un incremento de la velocidad de fractura dentro del molino.

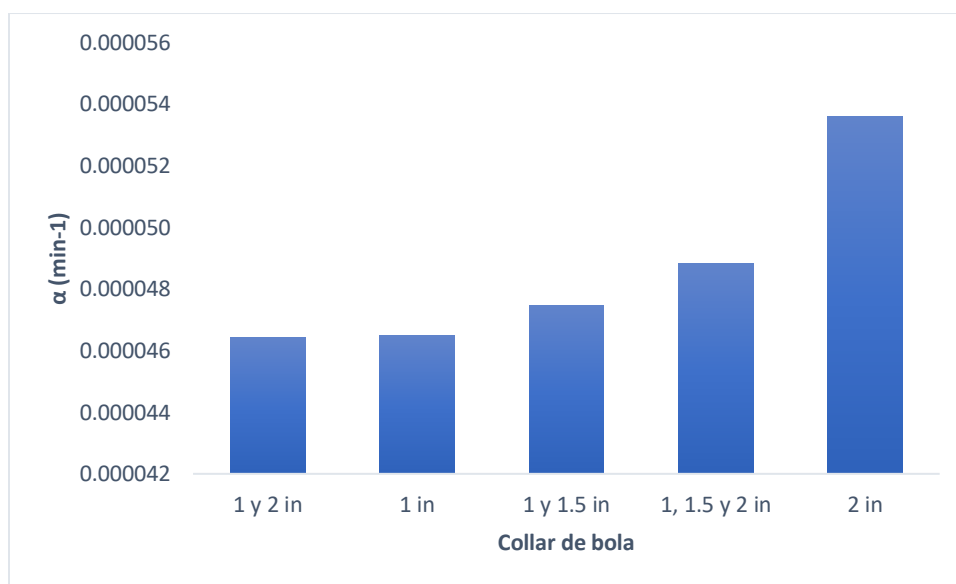


Figura 22. Velocidad de fractura del mineral 3 (Fluorita) con respecto a los distintos collares de bolas

En Figura 22 se puede analizar que el collar ideal para una mejor conminución del mineral 3 (fluorita) es el collar de 2 pulgadas. Este tipo de mineral tuvo datos muy interesantes debido a que la velocidad de fractura con los demás collares fue comparable con las otras; sin embargo, la eficiencia de captura de las partículas de fluorita con respecto a las bolas de 2 pulgadas se vio con mayor eficiencia, dando lugar a una velocidad de fractura más alta.

III.IV Correlación entre la función de selección y trabajo de molienda.

A continuación, se muestra la correlación entre la velocidad de fractura en la función de selección y el trabajo de molienda.

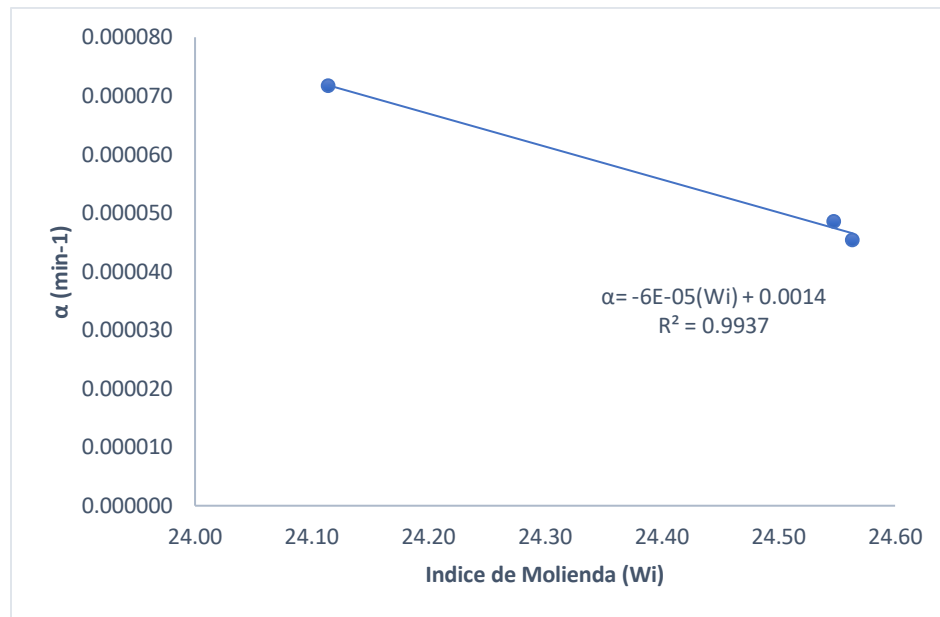


Figura 23. Velocidad de fractura promedio contra índice de molienda de los tres minerales

En Figura 23 se muestra el índice de molienda de cada mineral con respecto a su velocidad de fractura promedio. Se aprecia que el mineral 1 (Pb-Cu-Zn) tiene la velocidad de fractura más alta, con $0.000072 \text{ min}^{-1}$, en comparación con los otros dos minerales y el índice de molienda más bajo con 24.11 kWh/ton . El punto representando al mineral 2 (sulfuros y óxidos) mostró la velocidad de fractura más baja de $0.000045 \text{ min}^{-1}$ y el índice de molienda más alto de los tres minerales con 24.56 kWh/ton , seguido de la fluorita con 24.55 kWh/ton y $0.000049 \text{ min}^{-1}$, demostrando que mientras más alta es la velocidad de fractura el índice de molienda de los minerales es menor. Esto puede deberse a una mejor eficiencia de molienda en el impacto generado entre la interacción bola-mineral, propiciando una disminución en los tiempos de molienda y por lo tanto un incremento en la eficiencia energética de los molinos, ya que al tener una velocidad de fractura alta, el valor de la función de selección se incrementa y por lo tanto el índice de molienda disminuye, dando como resultado una correlación inversamente proporcional entre ambos parámetros.

Asimismo, se observa un índice de correlación (R^2) de 0.9937 para una ecuación de $y = mx + b$, lo que indica que la correlación mostrada es lineal. Con los datos obtenidos de cada mineral se puede ver que hay una relación lineal entre el W_i y el parámetro α que caracteriza la función de selección específica.

Conclusiones.

Se estableció una correlación entre la función de selección y el índice de molienda de cada mineral en función de la velocidad de fractura promedio obtenida, dando como resultado la ecuación lineal: $\alpha = -6E^{-0.5} (W_i) + 0.0014$. Asimismo, se analizó el comportamiento de los tres minerales al emplear distintos collares de bolas, evidenciando su influencia en la función de selección y en la velocidad de fractura promedio, lo que a su vez impacta directamente el índice de molienda. Los puntos clave que demostraron la correlación de la función de selección e índice de molienda:

1. Se observó cuál fue el collar ideal de cada mineral respecto a la función de selección y velocidad de fractura.
2. Con la función de selección se demostró la importancia de los medios de molienda, mostrando que para que exista una buena conminución de partículas es necesario que exista una buena eficiencia de captura entre bola y partícula. Si el collar de bola no es el indicado pueden existir demasiados huecos entre el medio de molienda y el mineral, dando una eficiencia de captura menor a 1, propiciando un aumento de potencia en el molino, y una conminución deficiente del mineral.
3. Los índices de trabajo de cada mineral ayudaron a conocer el tipo de correlación que tiene cada mineral al comparar el área de contacto de los collares con la velocidad de fractura, debido a que se observó un incremento de esta última a medida que el área superficial de las partículas aumenta, esto se debe a que existe un incremento de los puntos de contacto entre las bolas y las partículas, propiciando más choques efectivos y mayor fractura de las partículas.
4. Finalmente, se determinó que la función de selección y el índice de molienda presentan una correlación inversa debido a que cuando existe un incremento en el índice de molienda la velocidad de fractura disminuye, esto quiere decir que la selección de partículas fracturadas durante la molienda es menor y la molienda del mineral requiere de un mayor trabajo.

Referencias.

Austin G. L., & Concha A.F., (1984). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación.*, The Pennsylvania state university, U.S.A.

Austin, L.G., Trass O., (1997). Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment, Capítulo 12 en Handbook of Powder Science & Technology.

Baawuaha E., Kelsey C., Addai-Mensaha J., Skinner W., (2020). *Comparison of the performance of different comminution technologies in terms of energy efficiency and mineral liberation.* University of South Australia, Australia.

Bond, F. C., (1961). *Crushing and Grinding Calculations.* U.S.A.

Bookbinder M. & Panosian K. J., (1987). *Using the coefficient of correlation in method-comparison studies.* Clinical Chemistry 1170–1176.

Gupta A. & Yan D., (2006). *Mineral Processing and Operation.*

Hogg & Fuerstenau, (1972). *Power Relations for Tumbling Mills*, Trans. SMEAIME, Vol. 252, 418-432

Hogg R., 1999. *Breakage mechanisms and mill performance in ultrafine grinding*, University of Pennsylvania, USA.

Herbst J.A & Fuerstenau D.G, (1980). *Scale-up procedure for grinding mill design using population balance methods.* Int Journal, Mineral Processing, Vol 7. Pág 29-31.

Sepúlveda J. E, A (2001). *Phenomenological Model of Semiautogenous Grinding Processes in a Moly-Cop Tools Environment*, Proceedings SAG Conference, Vancouver, B. C., Canada Vol. 4, 301-305.

Guzmán L., (2002), *El Consumo de Medios de Molienda y su relación con las condiciones de impacto en aplicaciones.*

Litster, J., Ennis, B., Liu, L., (2004). *The Science and Engineering of Granulation Processes*, Kluwer Academia Publishers.

Tavares M. L., (2014). *Advance Modeling of Crushing and Grinding*, International Minerals Engineering Congress, IMEC.

Taylor L., Skuse D., Blackburn S., & Greenwood R., *Stirred media mills in the mining industry: Material grindability, energy-size relationships, and operating conditions*, School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, USA. 2020.

Mankosa, M. J., Adel, G. T. & Yoon, R. H., *Effect of Media Size in Stirred Ball Mill Grinding of Coal.* Powder Technology, 105-107. 1986.

Morrison R. Shi F, Whyte R. (2007). *Modelling of incremental rock breakage by impact for use in DEM models*. Minerals Engineering, 303-309.

R. A. Johnson and D. W. Wichern, Applied Multivariate Statistical Analysis, 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1992, 11–12.

Yafle R. A., (2003). *Common correlation and reliability analysis with SPSS for Windows*.

Vinuesa Pablo, (2016). *Correlación teoría y práctica*, CCG UNAM.

Wang Y., & Forssberg E., (2018). *International overview and outlook on comminution technology*. Lulea Tekniska universitet, Lulea, Sweden.

Walton O.R., (1994). *Numerical simulation of inelastic frictional particle-particle interaction*. In particulate Two- phase flow, 884-886.

Anexos.

Apéndice A. Análisis granulométrico inicial

A.1 Granulometría de mineral No.1

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	216.40	10.83	10.83	89.17
12	1700	1700.00	133.60	6.69	17.52	82.48
14	1180	1416.33	215.20	10.77	28.29	71.71
20	850	1001.50	366.40	18.34	46.63	53.37
30	600	714.14	170.40	8.53	55.16	44.84
40	425	504.98	130.40	6.53	61.68	38.32
50	300	357.07	154.80	7.75	69.43	30.57
70	212	252.19	161.20	8.07	77.50	22.50
100	150	178.33	131.60	6.59	84.08	15.92
140	106	126.10	80.80	4.04	88.13	11.87
200	75	89.16	66.20	3.31	91.44	8.56
270	53	63.05	54.40	2.72	94.16	5.84
400	38	44.88	92.80	4.64	98.81	1.19
-400	0	31.94	23.80	1.19	100.00	0.00
Total			1998.00	100.00		

A.2 Granulometría de mineral No.2

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	150.60	7.53	7.53	92.47
12	1700	1700.00	125.80	6.29	13.83	86.17
14	1180	1416.33	184.40	9.23	23.05	76.95
20	850	1001.50	321.60	16.09	39.15	60.85
30	600	714.14	170.80	8.55	47.69	52.31
40	425	504.98	166.40	8.33	56.02	43.98
50	300	357.07	129.20	6.46	62.48	37.52
70	212	252.19	159.20	7.97	70.45	29.55
100	150	178.33	134.80	6.74	77.19	22.81
140	106	126.10	113.20	5.66	82.85	17.15
200	75	89.16	95.20	4.76	87.62	12.38
270	53	63.05	80.30	4.02	91.63	8.37
400	38	44.88	110.80	5.54	97.18	2.82
-400	0	31.94	56.40	2.82	100.00	0.00
Total			1998.70	100.00		

A.3 Granulometría de mineral No.3

Malla #	Tamaño	Tamaño Promedio	peso g	%	Acum (+)	Acum (-)
	µm			peso		
10	1700	2040.48	17.60	0.88	0.88	99.12
12	1700	1700.00	105.60	5.29	6.17	93.83
14	1180	1416.33	263.70	13.20	19.36	80.64
20	850	1001.50	478.80	23.96	43.33	56.67
30	600	714.14	253.50	12.69	56.02	43.98
40	425	504.98	156.70	7.84	63.86	36.14
50	300	357.07	137.50	6.88	70.74	29.26
70	212	252.19	142.10	7.11	77.85	22.15
100	150	178.33	125.20	6.27	84.12	15.88
140	106	126.10	84.40	4.22	88.34	11.66
200	75	89.16	93.20	4.66	93.01	6.99
270	53	63.05	55.10	2.76	95.77	4.23
400	38	44.88	72.80	3.64	99.41	0.59
-400	0	31.94	11.80	0.59	100.00	0.00
Total			1998.00	100.00		

Apéndice B. Granulometrías con tamaño de bola de 1 pulgada

B.1 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño	Tamaño Promedio	peso g	%	Acum (+)	Acum (-)
	µm			peso		
10	1700	2040.48	105.60	5.29	5.29	94.71
12	1700	1700.00	109.80	5.50	10.78	89.22
14	1180	1416.33	174.40	8.73	19.51	80.49
20	850	1001.50	362.60	18.15	37.67	62.33
30	600	714.14	195.60	9.79	47.46	52.54
40	425	504.98	169.60	8.49	55.95	44.05
50	300	357.07	155.00	7.76	63.71	36.29
70	212	252.19	180.20	9.02	72.73	27.27
100	150	178.33	146.20	7.32	80.05	19.95
140	106	126.10	92.80	4.65	84.69	15.31
200	75	89.16	66.60	3.33	88.03	11.97
270	53	63.05	87.00	4.36	92.38	7.62
400	38	44.88	124.80	6.25	98.63	1.37
-400	0	31.94	27.40	1.37	100.00	0.00
Total			1997.60	100.00		

B.2 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	7.60	0.38	0.38	99.62
12	1700	1700.00	11.20	0.56	0.94	99.06
14	1180	1416.33	28.00	1.40	2.34	97.66
20	850	1001.50	139.70	7.00	9.34	90.66
30	600	714.14	151.00	7.56	16.90	83.10
40	425	504.98	188.60	9.44	26.34	73.66
50	300	357.07	213.00	10.67	37.01	62.99
70	212	252.19	270.20	13.53	50.54	49.46
100	150	178.33	267.40	13.39	63.93	36.07
140	106	126.10	195.00	9.76	73.69	26.31
200	75	89.16	129.60	6.49	80.18	19.82
270	53	63.05	188.20	9.42	89.60	10.40
400	38	44.88	170.20	8.52	98.13	1.87
-400	0	31.94	37.40	1.87	100.00	0.00
Total			1997.10	100.00		

B.3 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	1.00	0.05	0.05	99.95
20	850	1001.50	2.10	0.11	0.16	99.84
30	600	714.14	4.00	0.20	0.36	99.64
40	425	504.98	9.00	0.45	0.81	99.19
50	300	357.07	87.40	4.38	5.18	94.82
70	212	252.19	369.60	18.51	23.70	76.30
100	150	178.33	461.60	23.12	46.82	53.18
140	106	126.10	372.40	18.65	65.48	34.52
200	75	89.16	214.60	10.75	76.23	23.77
270	53	63.05	229.60	11.50	87.73	12.27
400	38	44.88	187.20	9.38	97.10	2.90
-400	0	31.94	57.80	2.90	100.00	0.00
Total			1996.30	100.00		

B.4 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso		
				Acum (+)	Acum (-)	
10	1700	2040.48	97.60	4.88	4.88	95.12
12	1700	1700.00	60.00	3.00	7.89	92.11
14	1180	1416.33	100.00	5.00	12.89	87.11
20	850	1001.50	264.00	13.21	26.10	73.90
30	600	714.14	179.20	8.97	35.07	64.93
40	425	504.98	190.40	9.53	44.60	55.40
50	300	357.07	151.20	7.57	52.17	47.83
70	212	252.19	190.40	9.53	61.70	38.30
100	150	178.33	156.00	7.81	69.50	30.50
140	106	126.10	140.80	7.05	76.55	23.45
200	75	89.16	117.60	5.89	82.43	17.57
270	53	63.05	114.40	5.73	88.16	11.84
400	38	44.88	168.20	8.42	96.58	3.42
-400	0	31.94	68.40	3.42	100.00	0.00
Total			1998.20	100.00		

B.5 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso		
				Acum (+)	Acum (-)	
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	10.40	0.52	0.52	99.48
30	600	714.14	25.60	1.28	1.80	98.20
40	425	504.98	66.40	3.32	5.13	94.87
50	300	357.07	113.60	5.69	10.81	89.19
70	212	252.19	234.40	11.73	22.54	77.46
100	150	178.33	260.80	13.05	35.60	64.40
140	106	126.10	320.80	16.06	51.66	48.34
200	75	89.16	321.20	16.08	67.73	32.27
270	53	63.05	258.80	12.95	80.69	19.31
400	38	44.88	293.20	14.68	95.36	4.64
-400	0	31.94	92.60	4.64	100.00	0.00
Total			1997.80	100.00		

B.6 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% Acum (+) Acum (-)		
				peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.00	0.00	0.00	100.00
30	600	714.14	0.80	0.04	0.04	99.96
40	425	504.98	0.80	0.04	0.08	99.92
50	300	357.07	2.40	0.12	0.20	99.80
70	212	252.19	16.80	0.84	1.04	98.96
100	150	178.33	178.80	8.95	9.99	90.01
140	106	126.10	520.30	26.05	36.05	63.95
200	75	89.16	383.20	19.19	55.24	44.76
270	53	63.05	422.60	21.16	76.40	23.60
400	38	44.88	350.60	17.56	93.95	6.05
-400	0	31.94	120.80	6.05	100.00	0.00
Total			1997.10	100.00		

B.7 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% Acum (+) Acum (-)		
				peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	4.80	0.24	0.24	99.76
12	1700	1700.00	43.20	2.16	2.40	97.60
14	1180	1416.33	132.00	6.61	9.01	90.99
20	850	1001.50	358.40	17.94	26.96	73.04
30	600	714.14	226.40	11.33	38.29	61.71
40	425	504.98	222.40	11.13	49.42	50.58
50	300	357.07	161.60	8.09	57.51	42.49
70	212	252.19	184.80	9.25	66.77	33.23
100	150	178.33	144.80	7.25	74.02	25.98
140	106	126.10	110.40	5.53	79.54	20.46
200	75	89.16	116.80	5.85	85.39	14.61
270	53	63.05	112.80	5.65	91.04	8.96
400	38	44.88	140.80	7.05	98.09	1.91
-400	0	31.94	38.20	1.91	100.00	0.00
Total			1997.40	100.00		

B.8 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño		peso g	%		
	µm	Tamaño Promedio		peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	2.40	0.12	0.12	99.88
14	1180	1416.33	10.40	0.52	0.64	99.36
20	850	1001.50	85.60	4.29	4.93	95.07
30	600	714.14	130.40	6.53	11.46	88.54
40	425	504.98	214.40	10.74	22.20	77.80
50	300	357.07	203.20	10.18	32.37	67.63
70	212	252.19	251.20	12.58	44.95	55.05
100	150	178.33	227.60	11.40	56.35	43.65
140	106	126.10	189.40	9.49	65.84	34.16
200	75	89.16	241.80	12.11	77.94	22.06
270	53	63.05	192.00	9.62	87.56	12.44
400	38	44.88	198.20	9.93	97.49	2.51
-400	0	31.94	50.20	2.51	100.00	0.00
Total			1996.80	100.00		

B.9 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño		peso g	%		
	µm	Tamaño Promedio		peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.00	0.00	0.00	100.00
30	600	714.14	1.60	0.08	0.08	99.92
40	425	504.98	9.60	0.48	0.56	99.44
50	300	357.07	50.40	2.53	3.09	96.91
70	212	252.19	226.40	11.34	14.43	85.57
100	150	178.33	468.20	23.46	37.89	62.11
140	106	126.10	360.80	18.08	55.97	44.03
200	75	89.16	398.40	19.96	75.93	24.07
270	53	63.05	200.80	10.06	85.99	14.01
400	38	44.88	218.40	10.94	96.93	3.07
-400	0	31.94	61.20	3.07	100.00	0.00
Total			1995.80	100.00		

Apéndice C. Granulometrías con tamaño de bola de 2 pulgadas

C.1 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	135.60	6.79	6.79	93.21
12	1700	1700.00	115.20	5.77	12.56	87.44
14	1180	1416.33	186.20	9.32	21.88	78.12
20	850	1001.50	402.40	20.15	42.02	57.98
30	600	714.14	180.20	9.02	51.04	48.96
40	425	504.98	142.80	7.15	58.19	41.81
50	300	357.07	160.20	8.02	66.21	33.79
70	212	252.19	168.40	8.43	74.64	25.36
100	150	178.33	136.40	6.83	81.47	18.53
140	106	126.10	86.40	4.33	85.80	14.20
200	75	89.16	70.60	3.53	89.33	10.67
270	53	63.05	74.50	3.73	93.06	6.94
400	38	44.88	110.20	5.52	98.58	1.42
-400	0	31.94	28.40	1.42	100.00	0.00
Total			1997.50	100.00		

C.2 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	6.20	0.31	0.31	99.69
12	1700	1700.00	11.80	0.59	0.90	99.10
14	1180	1416.33	38.40	1.92	2.82	97.18
20	850	1001.50	231.20	11.57	14.39	85.61
30	600	714.14	220.20	11.02	25.42	74.58
40	425	504.98	212.80	10.65	36.07	63.93
50	300	357.07	217.60	10.89	46.96	53.04
70	212	252.19	232.60	11.64	58.60	41.40
100	150	178.33	200.60	10.04	68.64	31.36
140	106	126.10	145.30	7.27	75.91	24.09
200	75	89.16	127.60	6.39	82.30	17.70
270	53	63.05	132.20	6.62	88.91	11.09
400	38	44.88	182.40	9.13	98.04	1.96
-400	0	31.94	37.20	1.86	99.90	0.10
Total			1996.10	99.90		

C.3 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	3.20	0.16	0.16	99.84
30	600	714.14	27.20	1.36	1.52	98.48
40	425	504.98	94.80	4.75	6.27	93.73
50	300	357.07	245.00	12.28	18.55	81.45
70	212	252.19	347.20	17.40	35.95	64.05
100	150	178.33	326.40	16.36	52.31	47.69
140	106	126.10	284.20	14.24	66.55	33.45
200	75	89.16	210.60	10.55	77.11	22.89
270	53	63.05	208.60	10.45	87.56	12.44
400	38	44.88	200.00	10.02	97.58	2.42
-400	0	31.94	48.20	2.42	100.00	0.00
Total			1995.40	100.00		

C.4 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	67.20	3.37	3.37	96.63
12	1700	1700.00	51.60	2.58	5.95	94.05
14	1180	1416.33	106.40	5.33	11.28	88.72
20	850	1001.50	302.40	15.15	26.43	73.57
30	600	714.14	198.40	9.94	36.37	63.63
40	425	504.98	203.60	10.20	46.56	53.44
50	300	357.07	154.00	7.71	54.28	45.72
70	212	252.19	187.20	9.38	63.65	36.35
100	150	178.33	152.80	7.65	71.31	28.69
140	106	126.10	134.80	6.75	78.06	21.94
200	75	89.16	112.40	5.63	83.69	16.31
270	53	63.05	89.60	4.49	88.18	11.82
400	38	44.88	168.00	8.42	96.59	3.41
-400	0	31.94	68.00	3.41	100.00	0.00
Total			1996.40	100.00		

C.5 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.80	0.04	0.04	99.96
14	1180	1416.33	1.20	0.06	0.10	99.90
20	850	1001.50	23.20	1.16	1.26	98.74
30	600	714.14	68.80	3.45	4.71	95.29
40	425	504.98	158.80	7.96	12.67	87.33
50	300	357.07	178.80	8.96	21.63	78.37
70	212	252.19	254.40	12.75	34.37	65.63
100	150	178.33	221.20	11.08	45.46	54.54
140	106	126.10	253.20	12.69	58.14	41.86
200	75	89.16	201.20	10.08	68.22	31.78
270	53	63.05	251.20	12.59	80.81	19.19
400	38	44.88	307.20	15.39	96.20	3.80
-400	0	31.94	75.80	3.80	100.00	0.00
Total			1995.80	100.00		

C.6 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.80	0.04	0.04	99.96
20	850	1001.50	2.00	0.10	0.14	99.86
30	600	714.14	2.40	0.12	0.26	99.74
40	425	504.98	5.20	0.26	0.52	99.48
50	300	357.07	23.20	1.16	1.68	98.32
70	212	252.19	121.60	6.09	7.78	92.22
100	150	178.33	292.40	14.65	22.43	77.57
140	106	126.10	561.20	28.13	50.56	49.44
200	75	89.16	340.20	17.05	67.61	32.39
270	53	63.05	244.00	12.23	79.84	20.16
400	38	44.88	320.00	16.04	95.88	4.12
-400	0	31.94	82.30	4.12	100.00	0.00
Total			1995.30	100.00		

C.7 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño		peso g	%		
	µm	Tamaño Promedio		peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	6.00	0.30	0.30	99.70
12	1700	1700.00	49.20	2.46	2.76	97.24
14	1180	1416.33	144.40	7.22	9.99	90.01
20	850	1001.50	397.60	19.89	29.88	70.12
30	600	714.14	236.40	11.83	41.71	58.29
40	425	504.98	218.40	10.93	52.63	47.37
50	300	357.07	156.40	7.82	60.46	39.54
70	212	252.19	175.60	8.79	69.24	30.76
100	150	178.33	134.40	6.72	75.97	24.03
140	106	126.10	102.80	5.14	81.11	18.89
200	75	89.16	102.00	5.10	86.21	13.79
270	53	63.05	96.00	4.80	91.01	8.99
400	38	44.88	144.40	7.22	98.24	1.76
-400	0	31.94	35.20	1.76	100.00	0.00
Total			1998.80	100.00		

C.8 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño		peso g	%		
	µm	Tamaño Promedio		peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	1.20	0.06	0.06	99.94
14	1180	1416.33	8.80	0.44	0.50	99.50
20	850	1001.50	109.60	5.49	5.99	94.01
30	600	714.14	176.40	8.83	14.81	85.19
40	425	504.98	251.60	12.59	27.41	72.59
50	300	357.07	209.20	10.47	37.88	62.12
70	212	252.19	237.60	11.89	49.77	50.23
100	150	178.33	204.80	10.25	60.02	39.98
140	106	126.10	182.00	9.11	69.13	30.87
200	75	89.16	244.00	12.21	81.34	18.66
270	53	63.05	160.40	8.03	89.37	10.63
400	38	44.88	167.60	8.39	97.76	2.24
-400	0	31.94	44.80	2.24	100.00	0.00
Total			1998.00	100.00		

C.9 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño	Tamaño Promedio	peso g	%	Acum (+)	Acum (-)
	µm			peso		
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	1.20	0.06	0.06	99.94
30	600	714.14	5.60	0.28	0.34	99.66
40	425	504.98	50.00	2.50	2.84	97.16
50	300	357.07	146.00	7.31	10.16	89.84
70	212	252.19	354.40	17.75	27.90	72.10
100	150	178.33	381.60	19.11	47.01	52.99
140	106	126.10	322.80	16.16	63.17	36.83
200	75	89.16	315.80	15.81	78.99	21.01
270	53	63.05	180.20	9.02	88.01	11.99
400	38	44.88	182.60	9.14	97.16	2.84
-400	0	31.94	56.80	2.84	100.00	0.00
Total			1997.00	100.00		

Apéndice D. Granulometrías con tamaño de bola de 1 y 1.5 pulgadas

D.1 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño	Tamaño Promedio	peso g	%	Acum (+)	Acum (-)
	µm			peso		
10	1700	2040.48	120.60	6.04	6.04	93.96
12	1700	1700.00	121.20	6.07	12.11	87.89
14	1180	1416.33	191.80	9.60	21.71	78.29
20	850	1001.50	376.60	18.86	40.57	59.43
30	600	714.14	189.60	9.49	50.06	49.94
40	425	504.98	151.20	7.57	57.63	42.37
50	300	357.07	168.20	8.42	66.05	33.95
70	212	252.19	170.40	8.53	74.58	25.42
100	150	178.33	138.60	6.94	81.52	18.48
140	106	126.10	89.60	4.49	86.01	13.99
200	75	89.16	71.60	3.59	89.60	10.40
270	53	63.05	64.80	3.24	92.84	7.16
400	38	44.88	115.40	5.78	98.62	1.38
-400	0	31.94	27.60	1.38	100.00	0.00
Total			1997.20	100.00		

D.2 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	9.60	0.48	0.48	99.52
12	1700	1700.00	12.80	0.64	1.12	98.88
14	1180	1416.33	36.80	1.84	2.96	97.04
20	850	1001.50	170.40	8.53	11.50	88.50
30	600	714.14	177.60	8.89	20.39	79.61
40	425	504.98	200.80	10.06	30.45	69.55
50	300	357.07	215.60	10.80	41.24	58.76
70	212	252.19	253.60	12.70	53.94	46.06
100	150	178.33	224.60	11.25	65.19	34.81
140	106	126.10	182.40	9.13	74.32	25.68
200	75	89.16	163.20	8.17	82.49	17.51
270	53	63.05	150.40	7.53	90.03	9.97
400	38	44.88	160.80	8.05	98.08	1.92
-400	0	31.94	38.40	1.92	100.00	0.00
Total			1997.00	100.00		

D.3 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.80	0.04	0.04	99.96
30	600	714.14	4.00	0.20	0.24	99.76
40	425	504.98	15.20	0.76	1.00	99.00
50	300	357.07	176.40	8.84	9.84	90.16
70	212	252.19	416.20	20.85	30.69	69.31
100	150	178.33	451.60	22.62	53.31	46.69
140	106	126.10	312.80	15.67	68.97	31.03
200	75	89.16	170.80	8.56	77.53	22.47
270	53	63.05	224.60	11.25	88.78	11.22
400	38	44.88	171.20	8.58	97.36	2.64
-400	0	31.94	52.80	2.64	100.00	0.00
Total			1996.40	100.00		

D.4 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	81.20	4.06	4.06	95.94
12	1700	1700.00	55.20	2.76	6.83	93.17
14	1180	1416.33	98.80	4.94	11.77	88.23
20	850	1001.50	266.80	13.35	25.12	74.88
30	600	714.14	182.00	9.11	34.23	65.77
40	425	504.98	197.60	9.89	44.12	55.88
50	300	357.07	154.00	7.71	51.82	48.18
70	212	252.19	192.80	9.65	61.47	38.53
100	150	178.33	159.20	7.97	69.44	30.56
140	106	126.10	141.60	7.09	76.52	23.48
200	75	89.16	122.80	6.14	82.67	17.33
270	53	63.05	102.80	5.14	87.81	12.19
400	38	44.88	176.80	8.85	96.66	3.34
-400	0	31.94	66.80	3.34	100.00	0.00
Total			1998.40	100.00		

D.5 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.80	0.04	0.04	99.96
12	1700	1700.00	0.40	0.02	0.06	99.94
14	1180	1416.33	1.20	0.06	0.12	99.88
20	850	1001.50	8.80	0.44	0.56	99.44
30	600	714.14	22.00	1.10	1.66	98.34
40	425	504.98	70.40	3.52	5.18	94.82
50	300	357.07	125.30	6.27	11.46	88.54
70	212	252.19	248.80	12.45	23.91	76.09
100	150	178.33	261.60	13.09	37.00	63.00
140	106	126.10	330.20	16.53	53.53	46.47
200	75	89.16	251.20	12.57	66.10	33.90
270	53	63.05	275.60	13.79	79.89	20.11
400	38	44.88	314.20	15.72	95.62	4.38
-400	0	31.94	87.60	4.38	100.00	0.00
Total			1998.10	100.00		

D.6 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.80	0.04	0.04	99.96
30	600	714.14	0.80	0.04	0.08	99.92
40	425	504.98	1.60	0.08	0.16	99.84
50	300	357.07	2.40	0.12	0.28	99.72
70	212	252.19	22.40	1.12	1.40	98.60
100	150	178.33	206.40	10.33	11.73	88.27
140	106	126.10	540.20	27.04	38.78	61.22
200	75	89.16	410.60	20.55	59.33	40.67
270	53	63.05	307.40	15.39	74.72	25.28
400	38	44.88	408.20	20.43	95.15	4.85
-400	0	31.94	96.80	4.85	100.00	0.00
Total			1997.60	100.00		

D.7 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	4.80	0.24	0.24	99.76
12	1700	1700.00	48.20	2.41	2.65	97.35
14	1180	1416.33	153.60	7.69	10.34	89.66
20	850	1001.50	387.20	19.39	29.73	70.27
30	600	714.14	228.60	11.45	41.18	58.82
40	425	504.98	213.60	10.69	51.87	48.13
50	300	357.07	155.60	7.79	59.66	40.34
70	212	252.19	174.40	8.73	68.40	31.60
100	150	178.33	134.40	6.73	75.13	24.87
140	106	126.10	104.80	5.25	80.37	19.63
200	75	89.16	110.40	5.53	85.90	14.10
270	53	63.05	95.20	4.77	90.67	9.33
400	38	44.88	149.60	7.49	98.16	1.84
-400	0	31.94	36.80	1.84	100.00	0.00
Total			1997.20	100.00		

D.8 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño µm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.80	0.04	0.04	99.96
12	1700	1700.00	1.20	0.06	0.10	99.90
14	1180	1416.33	12.80	0.64	0.74	99.26
20	850	1001.50	97.60	4.89	5.63	94.37
30	600	714.14	145.60	7.29	12.92	87.08
40	425	504.98	228.00	11.42	24.34	75.66
50	300	357.07	213.60	10.70	35.04	64.96
70	212	252.19	247.20	12.38	47.42	52.58
100	150	178.33	250.40	12.54	59.96	40.04
140	106	126.10	188.00	9.42	69.38	30.62
200	75	89.16	218.20	10.93	80.31	19.69
270	53	63.05	158.40	7.93	88.24	11.76
400	38	44.88	186.60	9.35	97.59	2.41
-400	0	31.94	48.20	2.41	100.00	0.00
Total			1996.60	100.00		

D.9 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño µm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	1.20	0.06	0.06	99.94
30	600	714.14	2.80	0.14	0.20	99.80
40	425	504.98	13.60	0.68	0.88	99.12
50	300	357.07	88.40	4.43	5.31	94.69
70	212	252.19	292.00	14.63	19.95	80.05
100	150	178.33	428.60	21.48	41.43	58.57
140	106	126.10	340.80	17.08	58.50	41.50
200	75	89.16	346.60	17.37	75.87	24.13
270	53	63.05	210.00	10.52	86.40	13.60
400	38	44.88	208.60	10.45	96.85	3.15
-400	0	31.94	62.80	3.15	100.00	0.00
Total			1995.40	100.00		

Apéndice E. Granulometrías con tamaño de bola de 1 y 2 pulgadas

E.1 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	169.80	8.51	8.51	91.49
12	1700	1700.00	111.20	5.57	14.09	85.91
14	1180	1416.33	189.20	9.48	23.57	76.43
20	850	1001.50	301.60	15.12	38.69	61.31
30	600	714.14	154.00	7.72	46.41	53.59
40	425	504.98	144.40	7.24	53.65	46.35
50	300	357.07	201.80	10.12	63.77	36.23
70	212	252.19	182.60	9.15	72.92	27.08
100	150	178.33	151.20	7.58	80.50	19.50
140	106	126.10	101.40	5.08	85.58	14.42
200	75	89.16	89.90	4.51	90.09	9.91
270	53	63.05	56.20	2.82	92.91	7.09
400	38	44.88	99.80	5.00	97.91	2.09
-400	0	31.94	41.70	2.09	100.00	0.00
Total			1994.80	100.00		

E.2 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	80.40	4.03	4.03	95.97
12	1700	1700.00	34.00	1.71	5.74	94.26
14	1180	1416.33	64.80	3.25	8.99	91.01
20	850	1001.50	207.20	10.39	19.38	80.62
30	600	714.14	187.20	9.39	28.77	71.23
40	425	504.98	230.80	11.58	40.35	59.65
50	300	357.07	126.40	6.34	46.68	53.32
70	212	252.19	189.60	9.51	56.19	43.81
100	150	178.33	160.40	8.04	64.24	35.76
140	106	126.10	153.20	7.68	71.92	28.08
200	75	89.16	116.40	5.84	77.76	22.24
270	53	63.05	145.00	7.27	85.03	14.97
400	38	44.88	241.60	12.12	97.15	2.85
-400	0	31.94	56.80	2.85	100.00	0.00
Total			1993.80	100.00		

E.3 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.80	0.04	0.04	99.96
12	1700	1700.00	1.20	0.06	0.10	99.90
14	1180	1416.33	2.80	0.14	0.24	99.76
20	850	1001.50	4.40	0.22	0.46	99.54
30	600	714.14	9.60	0.48	0.94	99.06
40	425	504.98	62.00	3.11	4.06	95.94
50	300	357.07	100.40	5.04	9.10	90.90
70	212	252.19	254.40	12.77	21.87	78.13
100	150	178.33	309.80	15.55	37.42	62.58
140	106	126.10	461.20	23.15	60.57	39.43
200	75	89.16	232.40	11.67	72.23	27.77
270	53	63.05	230.00	11.55	83.78	16.22
400	38	44.88	260.40	13.07	96.85	3.15
-400	0	31.94	62.80	3.15	100.00	0.00
Total			1992.20	100.00		

E.4 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	66.00	3.30	3.30	96.70
12	1700	1700.00	51.60	2.58	5.89	94.11
14	1180	1416.33	92.40	4.63	10.52	89.48
20	850	1001.50	249.60	12.50	23.01	76.99
30	600	714.14	206.40	10.34	33.35	66.65
40	425	504.98	243.20	12.18	45.53	54.47
50	300	357.07	134.80	6.75	52.28	47.72
70	212	252.19	207.60	10.40	62.67	37.33
100	150	178.33	166.80	8.35	71.03	28.97
140	106	126.10	140.40	7.03	78.06	21.94
200	75	89.16	113.60	5.69	83.75	16.25
270	53	63.05	85.20	4.27	88.01	11.99
400	38	44.88	171.20	8.57	96.58	3.42
-400	0	31.94	68.20	3.42	100.00	0.00
Total			1997.00	100.00		

E.5 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	10.20	0.51	0.51	99.49
12	1700	1700.00	6.20	0.31	0.82	99.18
14	1180	1416.33	7.90	0.40	1.22	98.78
20	850	1001.50	33.20	1.66	2.88	97.12
30	600	714.14	28.40	1.42	4.30	95.70
40	425	504.98	110.80	5.55	9.86	90.14
50	300	357.07	145.80	7.31	17.16	82.84
70	212	252.19	260.40	13.05	30.21	69.79
100	150	178.33	261.60	13.11	43.32	56.68
140	106	126.10	330.40	16.56	59.88	40.12
200	75	89.16	282.80	14.17	74.05	25.95
270	53	63.05	251.20	12.59	86.64	13.36
400	38	44.88	198.40	9.94	96.58	3.42
-400	0	31.94	68.20	3.42	100.00	0.00
Total			1995.50	100.00		

E.6 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.80	0.04	0.04	99.96
30	600	714.14	0.80	0.04	0.08	99.92
40	425	504.98	1.60	0.08	0.16	99.84
50	300	357.07	3.20	0.16	0.32	99.68
70	212	252.19	36.00	1.80	2.13	97.87
100	150	178.33	276.00	13.84	15.96	84.04
140	106	126.10	678.20	34.00	49.96	50.04
200	75	89.16	368.80	18.49	68.45	31.55
270	53	63.05	272.80	13.68	82.13	17.87
400	38	44.88	273.60	13.72	95.85	4.15
-400	0	31.94	82.80	4.15	100.00	0.00
Total			1994.60	100.00		

E.7 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño µm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	4.80	0.24	0.24	99.76
12	1700	1700.00	51.60	2.58	2.83	97.17
14	1180	1416.33	143.60	7.19	10.02	89.98
20	850	1001.50	364.40	18.25	28.27	71.73
30	600	714.14	248.00	12.42	40.70	59.30
40	425	504.98	253.20	12.68	53.38	46.62
50	300	357.07	142.80	7.15	60.54	39.46
70	212	252.19	175.20	8.78	69.31	30.69
100	150	178.33	138.00	6.91	76.22	23.78
140	106	126.10	127.20	6.37	82.60	17.40
200	75	89.16	101.20	5.07	87.67	12.33
270	53	63.05	80.80	4.05	91.71	8.29
400	38	44.88	140.80	7.05	98.77	1.23
-400	0	31.94	24.60	1.23	100.00	0.00
Total			1996.20	100.00		

E.8 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño µm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	6.20	0.31	0.31	99.69
14	1180	1416.33	8.40	0.42	0.73	99.27
20	850	1001.50	78.20	3.92	4.66	95.34
30	600	714.14	136.40	6.84	11.50	88.50
40	425	504.98	265.60	13.33	24.83	75.17
50	300	357.07	174.40	8.75	33.58	66.42
70	212	252.19	245.60	12.32	45.90	54.10
100	150	178.33	234.40	11.76	57.66	42.34
140	106	126.10	261.20	13.11	70.77	29.23
200	75	89.16	180.00	9.03	79.80	20.20
270	53	63.05	172.00	8.63	88.43	11.57
400	38	44.88	190.20	9.54	97.97	2.03
-400	0	31.94	40.40	2.03	100.00	0.00
Total			1993.00	100.00		

E.9 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño µm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.40	0.02	0.02	99.98
30	600	714.14	1.60	0.08	0.10	99.90
40	425	504.98	16.80	0.84	0.94	99.06
50	300	357.07	91.60	4.60	5.54	94.46
70	212	252.19	232.80	11.69	17.24	82.76
100	150	178.33	413.60	20.77	38.01	61.99
140	106	126.10	579.60	29.11	67.12	32.88
200	75	89.16	257.20	12.92	80.03	19.97
270	53	63.05	182.80	9.18	89.21	10.79
400	38	44.88	189.00	9.49	98.70	1.30
-400	0	31.94	25.80	1.30	100.00	0.00
Total			1991.20	100.00		

Apéndice F. Granulometrías con tamaño de bola de 1, 1.5, y 2 pulgadas

F.1 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño µm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	198.40	9.93	9.93	90.07
12	1700	1700.00	128.80	6.45	16.38	83.62
14	1180	1416.33	167.60	8.39	24.77	75.23
20	850	1001.50	300.80	15.06	39.82	60.18
30	600	714.14	167.20	8.37	48.19	51.81
40	425	504.98	162.00	8.11	56.30	43.70
50	300	357.07	160.20	8.02	64.32	35.68
70	212	252.19	171.80	8.60	72.92	27.08
100	150	178.33	140.80	7.05	79.97	20.03
140	106	126.10	98.20	4.92	84.88	15.12
200	75	89.16	72.40	3.62	88.51	11.49
270	53	63.05	57.20	2.86	91.37	8.63
400	38	44.88	137.20	6.87	98.24	1.76
-400	0	31.94	35.20	1.76	100.00	0.00
Total			1997.80	100.00		

F.2 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	52.00	2.61	2.61	97.39
12	1700	1700.00	21.60	1.08	3.69	96.31
14	1180	1416.33	46.40	2.33	6.02	93.98
20	850	1001.50	175.20	8.78	14.80	85.20
30	600	714.14	181.20	9.08	23.88	76.12
40	425	504.98	242.80	12.17	36.05	63.95
50	300	357.07	162.40	8.14	44.19	55.81
70	212	252.19	182.40	9.14	53.34	46.66
100	150	178.33	173.20	8.68	62.02	37.98
140	106	126.10	167.60	8.40	70.42	29.58
200	75	89.16	159.60	8.00	78.42	21.58
270	53	63.05	153.20	7.68	86.10	13.90
400	38	44.88	232.40	11.65	97.75	2.25
-400	0	31.94	44.80	2.25	100.00	0.00
Total			1994.80	100.00		

F.3 Análisis granulométrico de mineral No.1 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.80	0.04	0.04	99.96
20	850	1001.50	1.60	0.08	0.12	99.88
30	600	714.14	4.00	0.20	0.32	99.68
40	425	504.98	39.20	1.97	2.29	97.71
50	300	357.07	87.20	4.37	6.66	93.34
70	212	252.19	257.60	12.92	19.58	80.42
100	150	178.33	345.60	17.34	36.92	63.08
140	106	126.10	448.20	22.48	59.41	40.59
200	75	89.16	318.40	15.97	75.38	24.62
270	53	63.05	167.20	8.39	83.77	16.23
400	38	44.88	268.20	13.45	97.22	2.78
-400	0	31.94	55.40	2.78	100.00	0.00
Total			1993.40	100.00		

F.4 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	57.60	2.88	2.88	97.12
12	1700	1700.00	43.20	2.16	5.05	94.95
14	1180	1416.33	82.80	4.15	9.19	90.81
20	850	1001.50	241.20	12.08	21.27	78.73
30	600	714.14	208.40	10.43	31.70	68.30
40	425	504.98	251.60	12.60	44.30	55.70
50	300	357.07	137.60	6.89	51.19	48.81
70	212	252.19	215.60	10.80	61.99	38.01
100	150	178.33	169.40	8.48	70.47	29.53
140	106	126.10	146.80	7.35	77.82	22.18
200	75	89.16	111.20	5.57	83.39	16.61
270	53	63.05	98.20	4.92	88.30	11.70
400	38	44.88	164.80	8.25	96.56	3.44
-400	0	31.94	68.80	3.44	100.00	0.00
Total			1997.20	100.00		

F.5 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	1.20	0.06	0.06	99.94
20	850	1001.50	7.60	0.38	0.44	99.56
30	600	714.14	25.20	1.26	1.70	98.30
40	425	504.98	106.00	5.31	7.01	92.99
50	300	357.07	119.20	5.97	12.98	87.02
70	212	252.19	263.20	13.18	26.16	73.84
100	150	178.33	273.20	13.68	39.84	60.16
140	106	126.10	361.60	18.11	57.95	42.05
200	75	89.16	272.40	13.64	71.59	28.41
270	53	63.05	237.20	11.88	83.47	16.53
400	38	44.88	250.40	12.54	96.01	3.99
-400	0	31.94	79.60	3.99	100.00	0.00
Total			1996.80	100.00		

F.6 Análisis granulométrico de mineral No.2 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.80	0.04	0.04	99.96
30	600	714.14	1.60	0.08	0.12	99.88
40	425	504.98	2.80	0.14	0.26	99.74
50	300	357.07	3.20	0.16	0.42	99.58
70	212	252.19	42.00	2.11	2.53	97.47
100	150	178.33	41.60	2.09	4.61	95.39
140	106	126.10	766.80	38.44	43.05	56.95
200	75	89.16	300.40	15.06	58.11	41.89
270	53	63.05	284.00	14.24	72.34	27.66
400	38	44.88	271.20	13.59	85.93	14.07
-400	0	31.94	280.60	14.07	100.00	0.00
Total			1995.00	100.00		

F.7 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 1.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	8.00	0.40	0.40	99.60
12	1700	1700.00	44.40	2.22	2.62	97.38
14	1180	1416.33	145.60	7.29	9.91	90.09
20	850	1001.50	357.80	17.92	27.83	72.17
30	600	714.14	241.80	12.11	39.94	60.06
40	425	504.98	257.60	12.90	52.83	47.17
50	300	357.07	142.80	7.15	59.98	40.02
70	212	252.19	168.20	8.42	68.41	31.59
100	150	178.33	137.20	6.87	75.28	24.72
140	106	126.10	121.20	6.07	81.34	18.66
200	75	89.16	104.20	5.22	86.56	13.44
270	53	63.05	86.80	4.35	90.91	9.09
400	38	44.88	142.80	7.15	98.06	1.94
-400	0	31.94	38.80	1.94	100.00	0.00
Total			1997.20	100.00		

F.8 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 7.30 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	2.00	0.10	0.10	99.90
14	1180	1416.33	10.40	0.52	0.62	99.38
20	850	1001.50	80.40	4.03	4.65	95.35
30	600	714.14	152.80	7.65	12.30	87.70
40	425	504.98	274.80	13.77	26.07	73.93
50	300	357.07	168.40	8.44	34.51	65.49
70	212	252.19	250.20	12.53	47.04	52.96
100	150	178.33	226.40	11.34	58.38	41.62
140	106	126.10	240.40	12.04	70.42	29.58
200	75	89.16	167.60	8.40	78.82	21.18
270	53	63.05	162.40	8.14	86.96	13.04
400	38	44.88	217.20	10.88	97.84	2.16
-400	0	31.94	43.20	2.16	100.00	0.00
Total			1996.20	100.00		

F.9 Análisis granulométrico de mineral No.3 con tiempo de molienda de 15 min

Malla #	Tamaño μm	Tamaño Promedio	peso g	% peso	Acum (+)	Acum (-)
10	1700	2040.48	0.00	0.00	0.00	100.00
12	1700	1700.00	0.00	0.00	0.00	100.00
14	1180	1416.33	0.00	0.00	0.00	100.00
20	850	1001.50	0.80	0.04	0.04	99.96
30	600	714.14	2.40	0.12	0.16	99.84
40	425	504.98	22.20	1.11	1.27	98.73
50	300	357.07	71.60	3.59	4.87	95.13
70	212	252.19	288.20	14.46	19.33	80.67
100	150	178.33	375.80	18.85	38.18	61.82
140	106	126.10	348.20	17.47	55.65	44.35
200	75	89.16	342.20	17.17	72.82	27.18
270	53	63.05	212.80	10.68	83.49	16.51
400	38	44.88	266.20	13.36	96.85	3.15
-400	0	31.94	62.80	3.15	100.00	0.00
Total			1993.20	100.00		

Apéndice G. Calculo de área total de contacto para los collares

G.1 conversión del tamaño de las bolas a metros y obtención del radio

	Bolas	
pulgadas	metros	radio (m)
1	0.0254	0.0127
1.5	0.0381	0.01905
2	0.0508	0.0254

Posteriormente considerando un peso total de 17.27 kg del llenado del molino al 40% se calculó la cantidad de bolas de cada tamaño con la fórmula de P/p donde P es igual al peso total del llenado del molino y p es el peso de cada tamaño de bola, este último se calculó utilizando la fórmula de $m = \rho * V$ donde m es igual a la masa de las bolas, ρ es la densidad de estas y V es el volumen de las bolas, la densidad de estas, es importante resaltar que al ser bolas de acero se ocupó una densidad de 7.75 t/m³.

G.2 Calculo de cantidad de medios y área superficial para cada tamaño de bola.

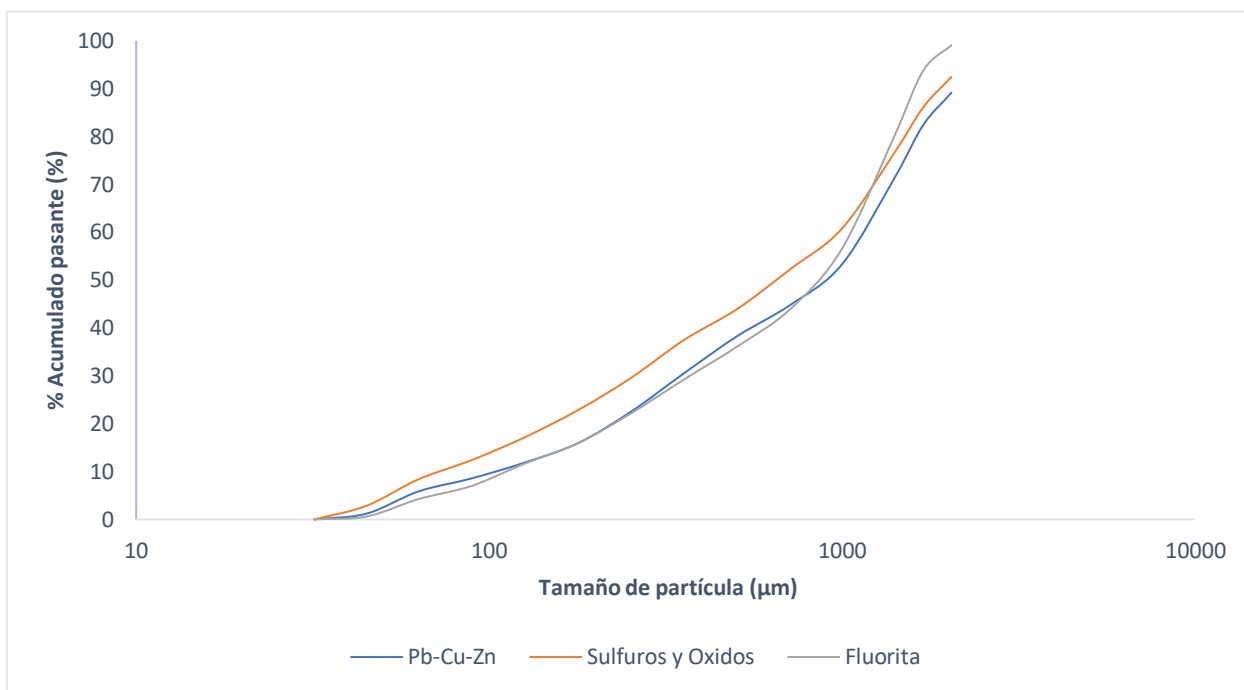
Bola (pulgadas)	No. Bolas 100%	Vol. de una bola (m ³)	Área de sup. 1 bola (m ²)
1	259.66	0.0000	0.0020
1.5	76.94	0.0000	0.0046
2	32.46	0.0001	0.0081

Una vez que se determinó el área superficial para cada tamaño de bola, se calculo el área total de contacto con la fórmula de $AT = (N)(\text{área sup. de una bola})(\text{porcentaje de llenado})$, donde AT es igual al área total de contacto, y N es el número total de bolas, realizando la combinación de bolas que se utiliza para cada collar se puede obtener la cantidad aproximada y el área total de contacto como se observa en G.3.

G.3 Cálculo del área total de contacto de cada collar

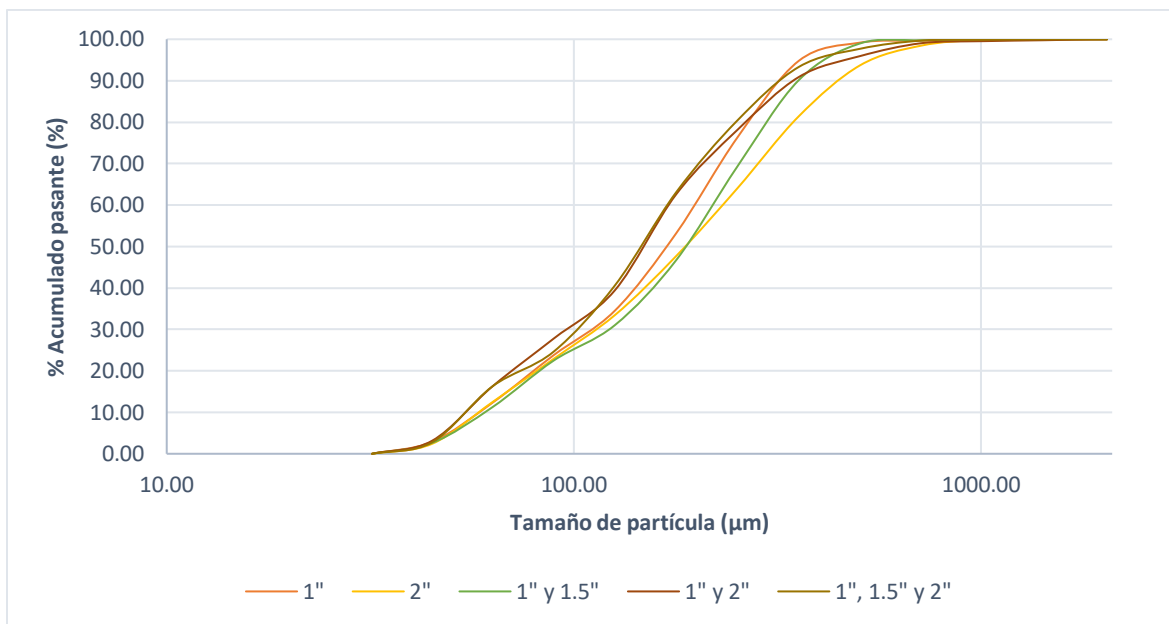
Collar	% Llenado de bolas (%)	N	AT (m ²)
1 in	100	259.66	0.211
2 in	100	32.46	0.105
1 y 1.5 in	50	168.30	0.175
1 y 2 in	50	146.06	0.158
1, 1.5 y 2 in	33	121.79	0.151

Apéndice H. Resultados de las cinéticas de molienda



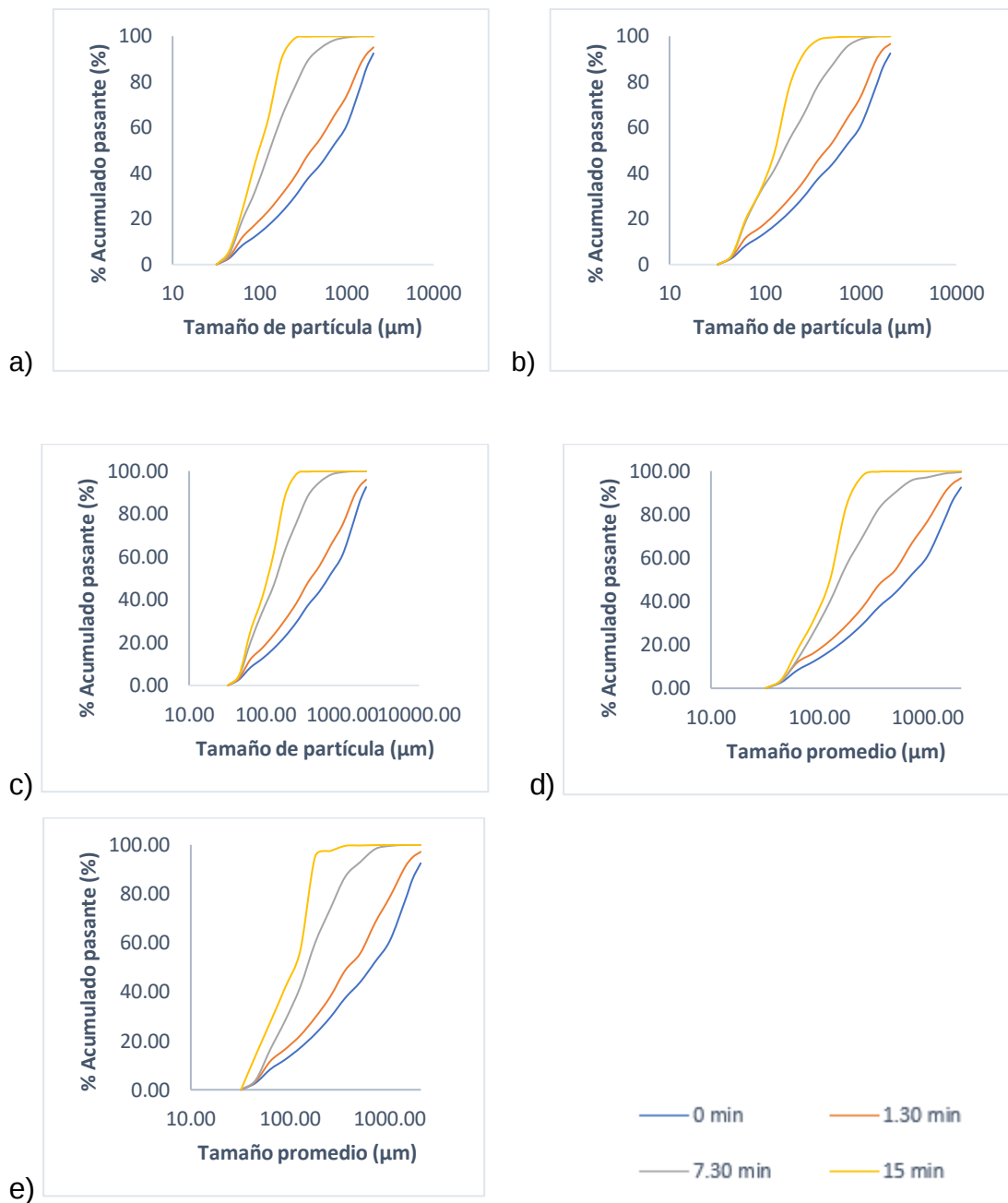
H.1 Análisis granulométrico a 0 minutos de las muestras

En el apéndice H.1 se muestra el análisis granulométrico a 0 minutos de molienda para los tres minerales. Se aprecia que el mineral polimetálico de sulfuros y óxidos (mineral No. 2) presenta una granulometría más fina, con respecto al mineral polimetálico de Pb-Cu-Zn (mineral No.1) y la fluorita (mineral No.3); sin embargo, esto no influye en la determinación de la cinética de molienda debido a que es independiente del tamaño de alimentación.



H.2 Análisis granulométrico del mineral de Pb-Cu-Zn utilizando los diferentes tamaños de bolas, después de 15 minutos de molienda

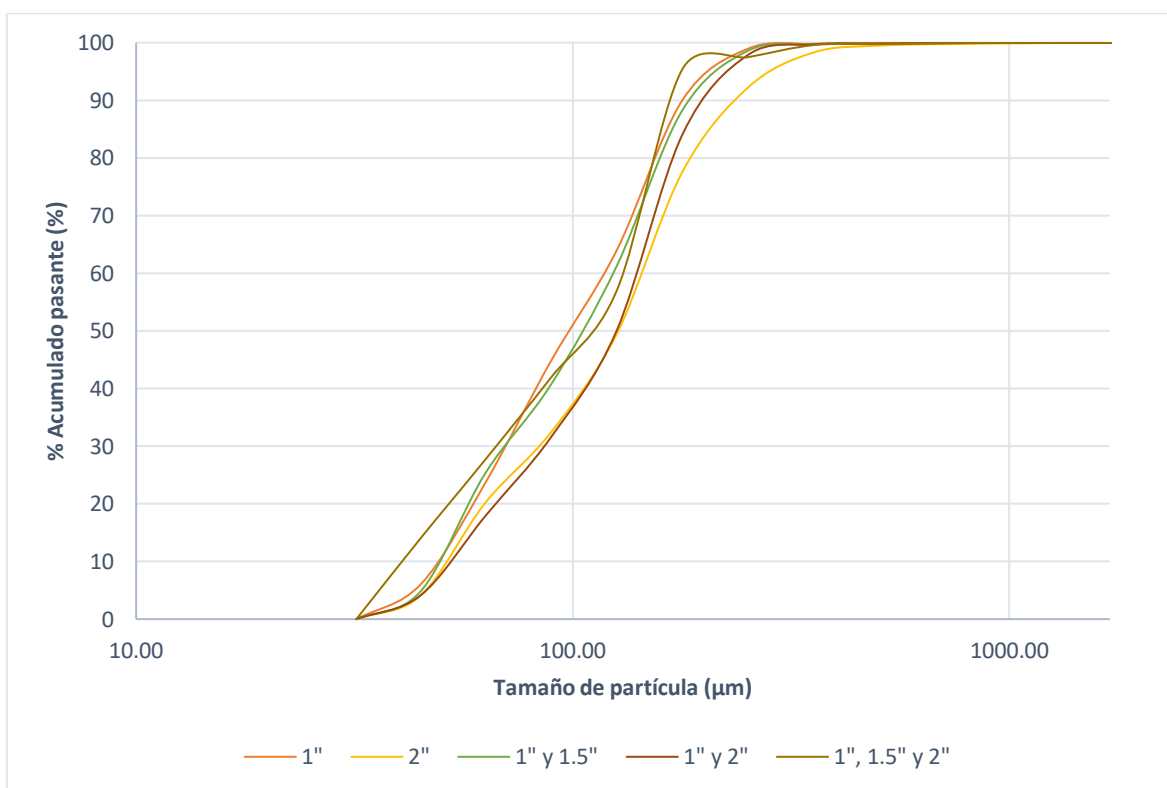
En el apéndice H.2 se muestran los análisis granulométricos para un tiempo de molienda de 15 minutos de la muestra mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn) variando el collar de bola utilizado. Se observa que la prueba con collar de bolas de 2 pulgadas fue la que necesitó una mayor eficiencia energética con un P80 de 298.21 μm seguido de los collares de bola de 1 pulgada con P80 de 281.76 μm y collar de 1 y 1.5 pulgadas con P80 de 263.72 μm , las cuales tuvieron una mejor eficiencia del quebrado de las partículas, mientras que el collar de bolas de 1 y 2 pulgadas fue el collar con mejor eficiencia energética con un P80 de 207.90 μm , asimismo como el collar de bolas de 1, 1.5 y 2 pulgadas el cual tuvo un P80 de 273.04 μm .



H.3 Análisis granulométrico a los tres tiempos de molienda, para el mineral de sulfuros y óxidos con tamaño de bola de a) 1 pulgadas, b) 2 pulgadas, c) 1 y 1.5 pulgadas, d) 1 y 2 pulgadas, y e) 1, 1.5 y 2 pulgadas

En el apéndice H.3 se observa el mineral de sulfuros y óxidos, de izquierda a derecha se muestran los distintos comportamientos con base al cambio de los collares de bolas, de izquierda a derecha, a) bola 1 pulgada al 100%, b) 2 pulgadas al 100%, c) 1 y 1.5 pulgadas al 50%, d) 1 y 2 pulgadas al 50%, y e) bola de 1, 1.5 y 2 pulgadas al 33%.

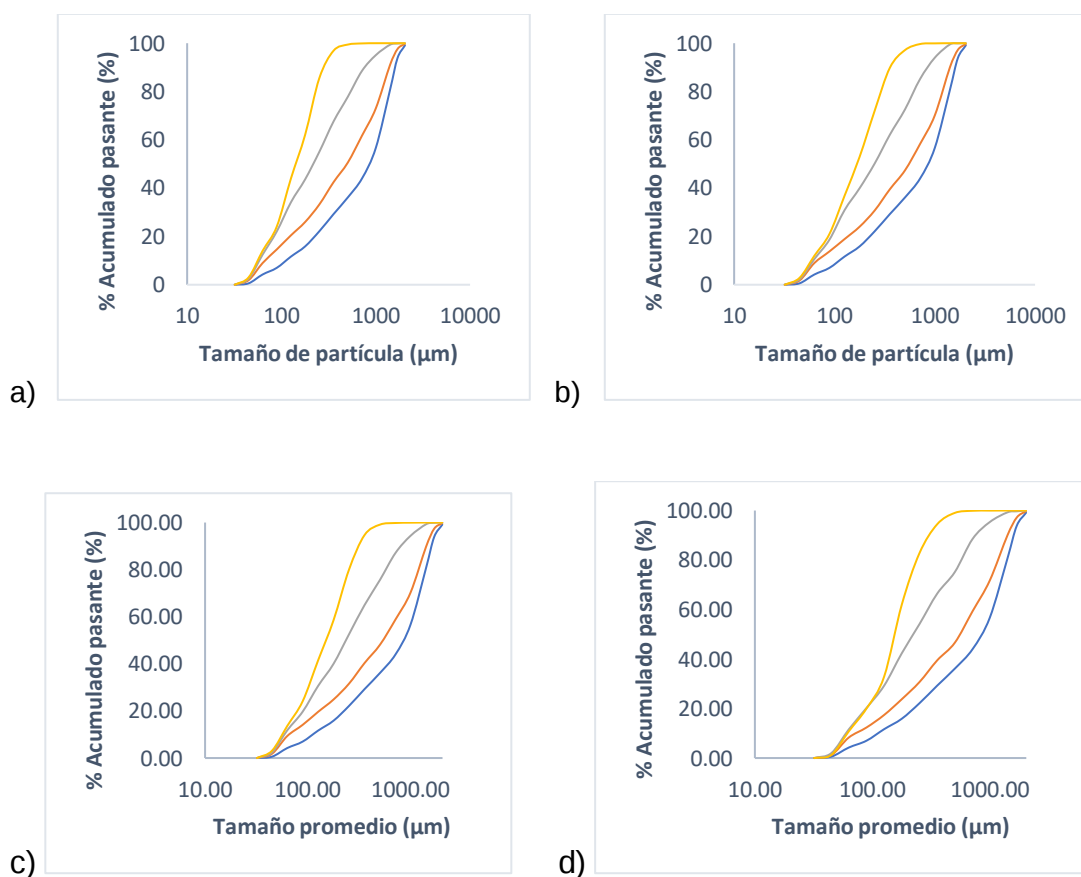
Se puede apreciar cómo se alejan las distribuciones del producto (naranja, gris y amarilla) con respecto a la distribución de alimentación (azul), dando a entender que conforme aumenta el tiempo de molienda, las líneas crecen de forma paralela respecto a la curva de alimentación, en esta figura, la distribución de las curvas es lo que determina que tan eficiente fue la molienda y cual collar de bolas requiere mayor energía para llegar a la conminución del mineral, en este caso b) y d) tienen un distribución muy parecida se puede observar como la curva del producto gris (tiempo después de 7.3 min) tiene una eficiencia de molienda baja en comparación con las otras gráficas, así mismo la curva del producto amarilla (tiempo después de 15 min) es poco uniforme, por lo que se ocupa mayor energía para la conminución del mineral No.2 si se utiliza un collar de bolas de 2 pulgadas al 100% o un collar de 1 y 2 pulgadas al 50% de retenido.

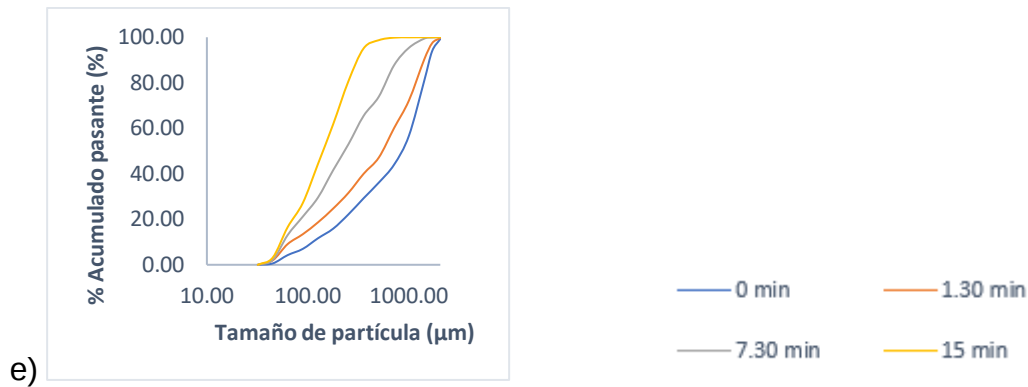


H.4 Análisis granulométrico del mineral de sulfuros y óxidos utilizando los diferentes tamaños de bolas, después de 15 minutos de molienda

En el apéndice H.4, se puede observar que en las tres pruebas con el mineral No 2 (sulfuros y óxidos) se obtuvo una mejor moliendabilidad con el collar de bolas 1, 1.5 y 2 pulgadas debido a que se obtuvo un menor tamaño de partícula con un P80 calculado de 156.76 µm seguido por el collar de 1 y 2 pulgadas el cual tuvo un P80 de 191.34 µm, estos collares como se puede analizar en la gráfica tuvieron la mejor eficiencia energética, posteriormente

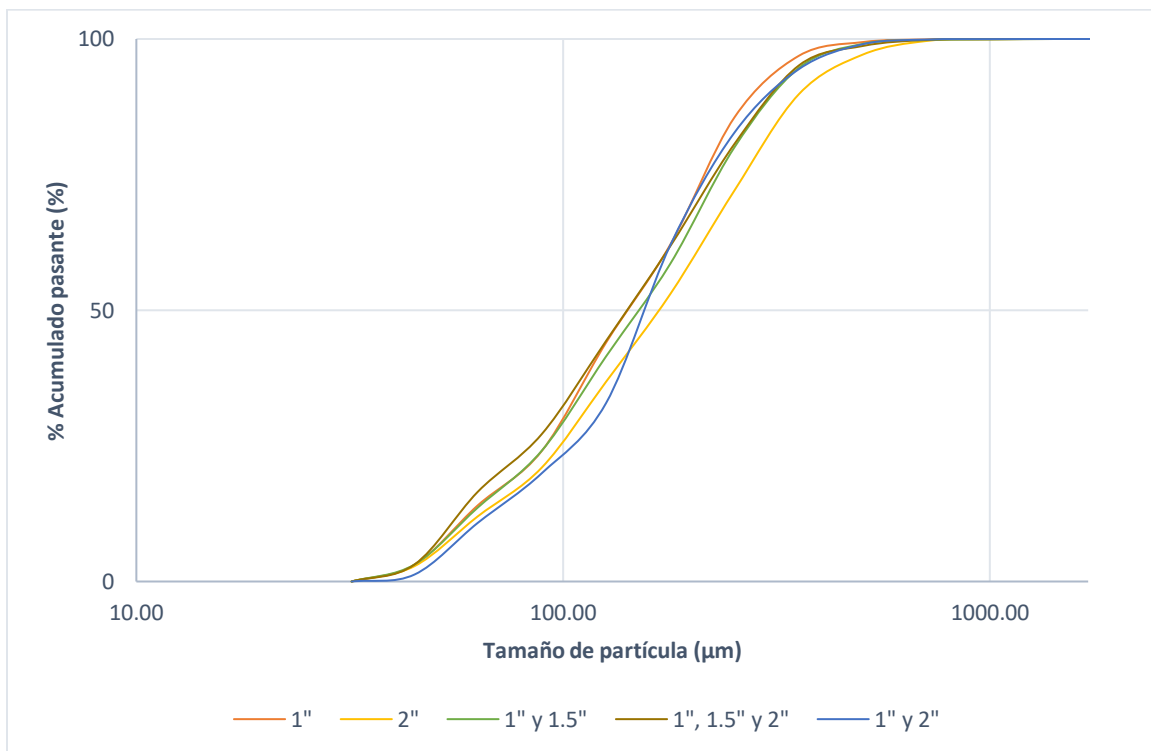
se puede ver que los collares que no tuvieron buena eficiencia energética fue en primera posición el collar de 2 pulgadas con el mayor tamaño de partícula logrado con un P80 de 229.48 μm , asimismo el collar de 1 y 1.5 pulgadas con P80 de 174.78 μm que a pesar de que logro un tamaño de partícula menor en comparación con el collar de 1 y 2 pulgadas también se observó que la molienda de las partículas empezó de forma más lenta y antes de llegar al final de la molienda la eficiencia energética aumento, por lo que se logró un tamaño de partícula menor, de igual forma se aprecia que el collar de 1 pulgada tuvo el mejor tamaño de partícula con P80 de 155.28 μm sin embargo, también comenzó con una molienda más lenta y por ende su eficiencia energética no fue de las mejores.





H.5 Análisis granulométrico a los tres tiempos de molienda, para el mineral de fluorita con tamaño de bola de a) 1 pulgada al 100%, b) 2 pulgadas al 100%, c) 1 y 1.5 pulgadas al 50%, d) 1 y 2 pulgadas al 50%, y e) 1, 1.5 y 2 pulgadas al 33%

En el apéndice H.5, se observa el mineral de fluorita, de izquierda se muestra el comportamiento con base al cambio de los collares de bolas, de izquierda a derecha, a) bola 1 pulgada al 100%, b) 2 pulgadas al 100%, c) 1 y 1.5 pulgadas al 50%, d) 1 y 2 pulgadas al 50%, y e) bola de 1, 1.5 y 2 pulgadas al 33%.



H.6 Análisis granulométrico del mineral de fluorita utilizando los diferentes tamaños de bolas, después de 15 minutos de molienda.

En el apéndice H.6, se puede ver que el mineral No 3 de fluorita, tuvo un comportamiento muy parecido en las cinéticas de molienda, ya que el grado de conminución se mantuvo similar utilizando los diferentes collares de bolas, sin embargo, la diferencia entre cada prueba radica en la potencia promedio obtenida y la velocidad de fractura de las partículas con respecto a la eficiencia energética, ya que como se puede observar la mejor eficiencia energética se logró con el collar de 1 pulgada dando lugar a un P80 calculado de 212.65 μm , seguido de el collar de bolas de 1, 1.5 y 2 pulgadas con P80 de 235.02 μm , posteriormente el collar de bolas de 1 y 1.5 pulgadas con P80 de 241.89 μm y collar de bolas de 1 y 2 pulgadas con P80 calculado de 248.49 μm , estos últimos collares en comparación con el collar de 1 pulgada tuvieron menos eficiencia energética debido a que tuvieron en un inicio una fragmentación de partículas más lento, esto se puede deber a una selección de partículas menos al momento de la colisión o choques efectivos entre las bolas con las partículas, sin embargo tuvieron estos collares de bolas tuvieron un mejor rompimiento de partículas en comparación con el collar de bolas de 2 pulgadas, ya que este tuvo un P80 calculado de 265.39 μm .

Apéndice I. Resultados del cálculo de potencia.

I.1 Potencia promedio con tamaño de bola de 1 pulgada al 100%

Tipo de mineral	Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia promedio (kW)
Muestra No 1	0	10.75	0.944
	1.3	10.82	
	7.3	10.65	
	15	10.7	
Muestra No 2	0	10.68	0.936
	1.3	10.65	
	7.3	10.6	
	15	10.61	
Muestra No 3	0	10.85	0.948
	1.3	10.75	
	7.3	10.87	
	15	10.61	

En apéndice I.1, se puede apreciar el análisis de potencia que generó el molino con los tres minerales. La prueba con collar de 1 pulgadas al 100% comparando los distintos tiempos de molienda, se aprecia que, la muestra mineral No.3 (fluorita) levemente es el que mayor

energía ocupa con 0.948 kW, seguido de la muestra mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn) la cual tuvo un promedio de potencia de 0.944 kW y por último la muestra mineral No. 2 (sulfuros y óxidos) con una potencia promedio calculada de 0.936 kW, cabe resaltar que estos datos pueden indicar que tan rápido fue la velocidad de fractura de las partículas de los minerales, sin embargo, no siempre propician un mejor tamaño de partícula final, como más adelante se explicará.

I.2. Potencia promedio con tamaño de bola de 2 pulgadas al 100%

Tipo de mineral	Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia promedio (kW)
Muestra No 1	0	10.80	0.945
	1.3	10.75	
	7.3	10.71	
	15	10.68	
Muestra No 2	0	10.91	0.943
	1.3	10.76	
	7.3	10.59	
	15	10.61	
Muestra No 3	0	10.58	0.933
	1.3	10.55	
	7.3	10.60	
	15	10.66	

En apéndice I.2, se puede apreciar el resultado de cálculo de potencia promedio de los tres minerales utilizando collar de bolas de 2 pulgadas, los cálculos demostraron que la muestra mineral No.3 (fluorita) presentó 0.933 kW siendo la menor potencia promedio en comparación con el mineral de No.2 (sulfuros y óxidos) el cual presentó una potencia promedio de 0.943 kW y el mineral No.1 (Pb-Cu-Zn) el cual tuvo una potencia promedio de 0.945 kW. El cálculo de potencia con collar de 2 pulgadas no demostró tener los datos más altos de energía calculada, sin embargo si estuvo en el rango de energía más alta, asimismo demostró que tuvo los P80 más altos, por lo que puede decir que con este tamaño de medios de molienda al utilizar 100% en el collar solo bolas de este tamaño propicio a que la existiera una eficiencia energética menor para los tres minerales al momento de ocurrir el evento de fractura de las partículas dentro del molino, dando como evidencia que no siempre una alta energía propicia una velocidad de fractura mejor.

I.3 Potencia promedio con tamaño de bola de 1 y 1.5 pulgadas al 50%

Tipo de mineral	Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia promedio (kW)
Mineral No 1	0	10.54	0.930
	1.3	10.63	
	7.3	10.51	
	15	10.61	
Mineral No 2	0	10.76	0.936
	1.3	10.7	
	7.3	10.49	
	15	10.61	
Mineral No 3	0	10.6	0.933
	1.3	10.7	
	7.3	10.61	
	15	10.5	

En apéndice I.3, se puede observar el cálculo de potencia promedio en los tres minerales con respecto al uso del collar de bolas de 1 y 1.5 pulgadas, los datos permiten ver que no existió mucha variabilidad con los resultados obtenidos; sin embargo, se puede decir que el mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn) tuvo una menor potencia promedio con 0.930 kW, en comparación con el mineral No.3 (fluorita) con 0.933 kW seguido por el mineral No. 2 (sulfuros y óxidos) el cual tuvo un cálculo de potencia promedio de 0.936 kW. Lo que se puede analizar de estos datos es que las potencias promedio más bajas se obtuvieron con este tipo de collar, asimismo la velocidad de fractura de las partículas fue menor en comparación con otras pruebas utilizando los diferentes collares de bolas.

I.4 Potencia promedio con tamaño de bola de 1 y 2 pulgadas al 50%

Tipo de mineral	Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia promedio (kW)
Mineral No 1	0	10.62	0.963
	1.3	10.97	
	7.3	11.05	
	15	11.11	
Mineral No 2	0	10.76	0.960
	1.3	10.8	
	7.3	11.06	
	15	11.02	

	0	10.48	
Mineral No 3	1.3	10.55	0.945
	7.3	10.88	
	15	11.03	

En apéndice I.4, se puede observar analizar los resultados de la potencia promedio calculada con collar de bolas de 1 y 2 pulgadas, los datos obtenidos demostraron que el mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn) tuvo la mayor potencia con 0.963 kW, seguido del mineral No. 2 (sulfuros y óxidos) con 0.960 kW y posteriormente el mineral No. 3 (fluorita) con 0.945 kW, en estos cálculos obtenidos se pudo analizar que la potencia con este tipo de collar propicio a tener una de las potencias promedio más altas en comparación con los otros collares de bolas, sin embargo al contrario de lo que se esperaría que la velocidad de fractura fuera mayor para las partículas, no fue así, al menos con el mineral de sulfuros y óxidos y fluorita, ya que tuvieron velocidades de fractura menor al utilizar este tipo de collar de bolas.

I.5. Potencia promedio con tamaño de bola de 1", 1.5" y 2 "al 33%

Tipo de mineral	Tiempo (min)	Corriente (A)	Potencia promedio (kW)
Mineral No 1	0	10.72	0.94996
	1.3	10.88	
	7.3	10.58	
	15	11	
Mineral No 2	0	10.65	0.90838
	1.3	10.7	
	7.3	9.23	
	15	10.71	
Mineral No 3	0	10.62	0.9493
	1.3	10.67	
	7.3	11.05	
	15	10.81	

En apéndice I.5, se observan los resultados obtenidos del cálculo de potencia promedio utilizando collar de bolas de 1, 1.5 y 2 pulgadas al 33%, en esta prueba hubo una disminución considerable de la potencia del molino para el mineral No. 2 (sulfuros y óxidos) con 0.908 kW de igual forma este collar demostró que propicio a una velocidad de fractura más alta lo que favoreció a la selección de partículas para una mejor fractura, dando una mejor eficiencia energética y logrando un P80 menor; esto se puede deber a que la

combinación de los tres tamaños de bola dentro del molino con el mineral de sulfuros y óxidos ayudo a tener una mejor colisión entre las bolas con las partículas, de igual forma como se puede ver el mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn) y No. 3 (fluorita) tuvieron datos similares con el promedio de potencia, la diferencia es que el mineral de fluorita con este collar tuvo la potencia promedio más alta en comparación con los demás collares de bolas y de igual forma la velocidad de fractura fue mayor, por lo que se podría entender que este collar también genero una buena eficiencia energética con este mineral. Algo similar se pudo observar con el mineral polimetálico de Pb-Cu-Zn, debido a que tuvo una potencia promedio de 0.949 kW y una velocidad de fractura alta, sin embargo, el P80 calculado con este collar de bolas no dio un tamaño de partícula menor en comparación al utilizar otro tipo de collar.

Apéndice J. Resultados del calculo de densidad de los minerales.

J.1 Densidad del mineral No. 1 (Pb-Cu-Zn)

Peso (g)	1er análisis	2do análisis	3er análisis	Densidad promedio
M1	38.89	38.89	38.89	
M2	40.22	40.12	40.45	
M3	63.91	63.91	63.91	
M4	64.83	64.73	64.96	
Densidad (g/cc)	3.25	3.00	3.04	3.10

J.2 Densidad del mineral No. 2 (Sulfuros y óxidos)

Peso (g)	1er análisis	2do análisis	3er análisis	Densidad promedio
M1	38.89	38.89	38.89	
M2	39.89	40.11	40.73	
M3	63.91	63.91	63.91	
M4	64.59	64.74	65.16	
Densidad (g/cc)	3.15	3.15	3.11	3.14

J.3 Densidad del mineral No. 3 (Fluorita)

Peso (g)	1er análisis	2do análisis	3er análisis	Densidad promedio
M1	38.89	38.89	38.89	
M2	40.35	40.25	40.30	
M3	63.91	63.91	63.91	
M4	64.87	64.83	64.82	
Densidad (g/cc)	2.95	3.11	2.85	2.97