



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Instituto de Metalurgia

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DIFERENCIA MICROGRÁFICA EN
BOLAS DE ACERO FORJADAS PARA CUANTIFICACIÓN DEL
DESGASTE ISOTRÓPICO EN LA MOLIENDA DE UN MINERAL
POLIMETÁLICO SULFUROSO Y ARENA SÍLICE.”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestría en Ingeniería de Minerales

PRESENTA

Ing. Arantxa Maribel Ovalle Carrillo.

ASESOR

Dr. Cristóbal Alberto Pérez Alonso.

COASESOR

Dr. Gilberto Rosales Marín.

San Luis Potosí, S. L. P

Febrero 2025



Contenido

Introducción.....	1
Hipótesis.....	2
Justificación	2
Objetivos.....	3
Objetivo general.	3
Objetivos específicos.	3
Alcances del proyecto.....	3
1. ANTECEDENTES DEL DESGASTE DE BOLA DE ACERO EN MOLINOS ROTATORIOS.....	4
1.1 Plantas de beneficio	4
1.1.1 Trituración.	5
1.1.2 Molienda.....	6
1.1.3 Concentración.	7
1.2 Descripción de molinos rotatorios de bolas y variables que intervienen en el proceso.....	8
1.2.1 Generalidades de molinos de bolas.	8
1.2.2 Velocidad rotacional del molino.....	9
1.2.3 Medios de molienda.	11
1.2.4 Demanda de energía en la molienda.	11
1.2.5 Tipo y geometría de levantadores.	13
1.2.6 Nivel de carga.	14
1.3 El medio de molienda y su desgaste en la reducción de tamaños.	15
1.3.1 El acero como principal material del medio de molienda.	15
1.3.2 Propiedades físicas del medio de molienda.	22
1.3.3 Pruebas generales para caracterización de las bolas de acero.	23
1.3.4 Mecanismos del desgaste del medio de molienda.....	27
1.3.5 Modelos matemáticos de la teoría del desgaste de los medios de molienda	28
2. METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR EL DESGASTE DE BOLA.....	33
2.1 Caracterización de material	35
2.1.1. Estudio de difracción de rayos x.....	35

2.1.2 Análisis granulométrico	39
2.2 Caracterización de las bolas.....	39
2.2.1 Composición química de bolas.	39
2.2.2 Pruebas de dureza Rockwell C.	40
2.2.3 Análisis metalográfico de medios de molienda.	41
2.3 Pruebas de molienda.....	42
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE PRUEBAS DE DESGASTE DE BOLA.....	45
3.1. Prueba 1: mineral sulfuro con bola forjada.	45
3.2. Prueba 2: mineral de arena sílice con bola forjada.....	49
3.3. Prueba 3: mineral de arena sílice con bola fundida.	53
3.4. Prueba 4: mineral sulfuro con bola fundida.....	57
3.5 Discusión general de resultados comparativos obtenidos de las pruebas de molienda desarrolladas.....	61
CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFIA	66
ANEXOS	68
Análisis granulométrico de muestras.	68
Cálculos de teoría del volumen.....	70
Prueba 1, mineral sulfuro con bola forjada.....	70
Prueba 2 mineral arena sílice con bola forjada.	72
Prueba 3, mineral arena sílice con bola alto cromo	73
Prueba 4, mineral de sulfuro con bola alto cromo	73
Cálculos para la teoría lineal.....	74
Prueba 1, bola forjada con mineral de sulfuro.....	74
Prueba 2, bola forjada y mineral de arena sílice.	76
Prueba 3, bola fundida y mineral de arena sílice.	77
Prueba 4, bola fundida con mineral de sulfuro.	78



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

19 de septiembre de 2024

**ING. ARANTXA MARIBEL OVALLE CARRILLO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Cristóbal Alberto Pérez Alonso 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 19 de septiembre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**"ESTUDIO DEL EFECTO DE LA DIFERENCIA MICROGRÁFICA EN
BOLAS DE ACERO FORJADAS PARA CUANTIFICACIÓN DEL
DESGASTE ISOTRÓPICO EN LA MOLIENDA DE UN MINERAL
POLIMETÁLICO SULFUROSO Y ARENA SÍLICE"**

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES DEL DESGASTE DE BOLAS DE ACERO EN MOLINOS ROTATORIOS.
2. METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR EL DESGASTE DE BOLAS.
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE PRUEBAS DE DESGASTE DE BOLAS.

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

ANEXOS.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336

"UASLP, con profesionistas abiertos al mundo"

Agradecimientos.

Este camino fue largo, más de lo que esperaba. Por fortuna muchas personas estuvieron para apoyarme.

Gracias a mis asesores el Dr. Cristobal y el Dr. Gilberto, por apostar y creer en mi tema de tesis. Gracias a mis Sinodales por sus valiosas aportaciones.

Un agradecimiento muy especial para mi amiga Claudia Ramos. Muchas veces me animaste a seguir y me ayudaste para lograrlo, tu apoyo y amistad son invaluable para mí.

Gracias a mi mamá Cecilia Carrillo por cuidarme y apoyarme. A mis tíos Elsy y Sergio por hacerme sentir siempre como otra hija más.

Gracias a Etsuko por el apoyo para los trámites y por ser mi hermana incondicional.

Para Enrique Díaz, Dulce Job, y amigos hechos en el posgrado, su compañía siempre me animo en días difíciles.

Índice de ilustraciones.

Ilustración 1. Diagrama del proceso de beneficio de minerales.	5
Ilustración 2. Molino de bolas industrial.	7
Ilustración 3. Esquema de las partes de un molino de bolas.	9
Ilustración 4. Esquema de movimiento de carga de un molino de bolas.	10
Ilustración 5. Collar de bolas de un molino industrial.	11
Ilustración 6. Costos de una molienda primaria.	12
Ilustración 7. Blindaje interno de un molino de bolas industrial.	13
Ilustración 8. Ejemplo de una micrografía. https://www.struers.com/en/Knowledge/Materials/Stainless-Steel	17
Ilustración 9. (a) estructura BCC: cúbica centrada en el cuerpo, (b) FCC: cúbica centrada en las caras.	17
Ilustración 10. Diagrama Hierro-Carbono, tomada de: Materials Science and engineering and introduction, Callister, pag, 319.	19
Ilustración 11. Micrografía convencional de un acero antes de tratamiento térmico. Por: Castillo y col, 2018.	20
Ilustración 12. Micrografía de una estructura martensítica típica. Por: Castillo Gutierrez, 2017.	21
Ilustración 13. Diagrama de proceso de un ensayo metalográfico.	24
Ilustración 14. Esquema de proceso para una prueba de dureza Rockwell	25
Ilustración 15 Mecanismo de difracción.	26
Ilustración 16 Diagrama de pruebas de caracterización de los minerales del presente estudio.	33
Ilustración 17. Diagrama de pruebas para caracterización de las bolas.	34
Ilustración 18. Esquema general de experimentación.	35
Ilustración 19. Espectro de difracción de muestra de arena sílice	38
Ilustración 20. Análisis granulométrico de muestras de experimentación.	39
Ilustración 21. Micrografía a 200x de bola fundida, obtenida por microscopía electrónica de barrido, UASLP.	41
Ilustración 22. Micrografía de bola forjada a 2000x, por microscopía electrónica de barrido, UASLP.	42
Ilustración 23. Molino de bolas utilizado en experimentación.	43
Ilustración 24. Gráfico para teoría de volumen, mineral sulfuro con bola forjada.	46
Ilustración 25. Gráfico para teoría de superficie, mineral sulfuro con bola fundida.	47
Ilustración 26. Gráfico de mineral molido vs. predicción de peso de bola. Teoría lineal y de volumen para prueba con mineral sulfuro y bola fundida.	48
Ilustración 27. Consumo de bola en kg por tonelada molida para prueba sulfuro con bola fundida.	49
Ilustración 28. Gráfico de teoría de volumen para mineral arena sílice con bola forjada	50
Ilustración 29. Gráfico para teoría de volumen, mineral sulfuro con bola forjada.	51
Ilustración 30. Gráfico de mineral molido vs predicción de peso de bola por teoría lineal y de volumen para prueba de arena sílice con bola forjada.	52
Ilustración 31. Consumo de bola en kg por tonelada molida para prueba de mineral de arena sílice con bola forjada.	53
Ilustración 32. Gráfico de teoría de volumen para prueba con arena sílice y bola fundida	54
Ilustración 33. Gráfico de teoría lineal para mineral de arena sílice con bola fundida.	55
Ilustración 34. Gráfico de mineral molido vs pérdida de peso de bola por teoría lineal y de volumen para prueba con arena sílice y bola fundida	56
Ilustración 35. Consumo de bola en kg de bola por tonelada molida. Prueba de mineral arena sílice con bola fundida.	57
Ilustración 36. Gráfico de teoría de volumen prueba con mineral sulfuro y bola fundida	58

Ilustración 37. Gráfico de teoría lineal para prueba con mineral sulfuro y bola fundida	58
Ilustración 38. Gráfico de mineral molido vs predicción de peso de la bola por teoría lineal y de volumen para prueba de mineral sulfuro con bola fundida.	59
Ilustración 39. Consumo de bola en kg de bola por tonelada molid para prueba de mineral sulfuro con bola sulfuro con bola fundida	60
Ilustración 40. Comparativo de pérdida de masa experimental	62
Ilustración 41. Consumo de bola en kg/t	64
Ilustración 42, %Pasado acumulado vs tamaño de partícula para mineral de arena sílice. ...	69
Ilustración 43. %Pasado acumulado vs tamaño de partícula para mineral de sulfuro.....	70
Ilustración 44. Mineral molido vs ln de masa para prueba de bola forjada con mineral sulfuro.	71
Ilustración 45. Gráfico de teoría lineal para prueba de bola forjada con mineral sulfuro.	75
Ilustración 46. Gráfico de teoría lineal para prueba de bola fundida con mineral de arena sílice.	77
Ilustración 47. Gráfico de teoría lineal para prueba de bola fundida con mineral de sulfuro.	78

Índice de tablas.

Tabla 1. Ficha técnica de bolas en el mercado, por Mol-Cop.....	22
Tabla 2. Prueba de desgaste de bola.	34
Tabla 3. Dureza en minerales encontrados para muestra de sulfuros.	36
Tabla 4. Dureza individual en minerales encontrados en muestra de arena sílice	36
Tabla 5. Composición química de las bolas utilizadas	40
Tabla 6. Dureza de un acero en función de su porcentaje de carbono,	40
Tabla 7. Dureza Rockwell C de muestras	40
Tabla 8. Información inicial de carga de bola.....	43
Tabla 9. Datos experimentales de prueba 1, mineral sulfuro con bola forjada.	45
Tabla 10. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.....	49
Tabla 11. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola fundida.	54
Tabla 12. Datos experimentales de prueba con mineral de sulfuro y fundida.	57
Tabla 13. Comparativa de pérdida de pesos reales en cada experimento.....	61
Tabla 14. Consumo de bola en kg/ton para cada experimento.	63
Tabla 15. Análisis granulométrico de muestra de cabeza de mineral de arena sílica.	68
Tabla 16. Análisis granulométrico de muestra de cabeza de mineral sulfuro.....	69
Tabla 17. Datos experimentales de prueba con mineral sulfuro y bola forjada..	71
Tabla 18. Predicción de la masa con teoría del volumen.....	72
Tabla 19. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.	72
Tabla 20. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.	73
Tabla 21. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.....	73
Tabla 22. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral sulfuro.....	74
Tabla 23. Cálculo de predicción de masa con teoría lineal.	75
Tabla 24. Consumo en g/t real, por teoría de volumen y teoría lineal..	76
Tabla 25. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral de arena sílice..	76
Tabla 26. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral de arena sílice.	77
Tabla 27. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral de sulfuros.....	78

Nomenclatura

N_c	Velocidad crítica del molino
D	Diámetro del molino
d	Diámetro de la bola de mayor tamaño dentro del molino
V_R	Porcentaje de volumen ocupado del molino por el mineral
E	Energía consumida
x_1	Tamaño de partícula inicial (μm)
x_2	Tamaño de partícula final (μm)
k_1	Constante de proporcionalidad en teoría de Bond.
k	Constante de desgaste lineal
W	Energía inicial en kWh/t
W_i	Índice de trabajo kWh/t
F_{80}	80% del tamaño pasante en la alimentación (μm)
P_{80}	80% del tamaño pasante en el producto (μm)
t	Tiempo en h
d_1	Diámetro de la bola
k_1	Constante de proporcionalidad
n	Exponente constante, que quiere decir que la velocidad de desgaste de la bola es proporcional al diámetro de la bola.
m_o	Masa de la bola inicial
m	Masa perdida de la bola en g
d_1	Diámetro de la bola
T	Cantidad de mineral molido en toneladas o kg
τ	Constante de tonelaje de bola, medida en las unidades de T en la teoría de volumen.
m	Masa de la bola en kg
A_i	Índice de abrasión del material determinado de pruebas de abrasión
b	Constante de desgaste superficial

Resumen

El presente estudio desarrolla pruebas a nivel laboratorio para ajustar al modelo de la teoría de volumen y de superficie que se utilizan en la predicción del consumo de bola a nivel industrial; con la finalidad de correlacionar las propiedades físicas obtenidas por una microestructura específica en las bolas de acero, utilizadas como medios de molienda, además de evaluar el efecto de dos mineralogías diferentes.

Evaluar el comportamiento de un mineral-aleación puede ayudar a analizar el consumo de bola, ya que, en la actualidad para decidir un cambio en el medio de molienda, las pruebas son llevadas a nivel industrial, dichas pruebas pueden tomar hasta 6 meses para alcanzar la estabilidad.

En la experimentación se utilizan 2 bolas de diferentes orígenes de fabricación, siendo una bola forjada y una bola fundida, las cuales fueron evaluadas con dos minerales con durezas diferentes.

Introducción.

El beneficio de minerales prepara el mineral para la extracción del metal de valor (en el caso de minerales metálicos) y produce productos para posteriormente obtener materiales tales como el acero. La concentración de minerales ayuda a la separación de las partículas de mineral valioso de aquellas sin valor (conocidos como ganga) logrando obtener una porción enriquecida o concentrada.

En la actualidad, la decisión del diseño de una planta de beneficio de minerales será en función de las especies mineralógicas de interés, abundancia y su adecuada liberación con respecto al tipo de yacimiento. Muchas nuevas tecnologías se desarrollan con la finalidad de obtener concentrados de buena calidad a bajos costos para justificar la economía de los proyectos mineros. Es por ello la importancia de continuar con la búsqueda de información que pueda ayudar a la disminución de costos de los procesos.

Hay dos operaciones fundamentales en el procesamiento de minerales: a) la liberación de los minerales de valor y b) las etapas de separación para la concentración de minerales. La liberación requiere una etapa de reducción de tamaño de los minerales que involucran etapas de quebrado y molienda para obtener el tamaño de partícula en el cual los minerales de valor puedan ser recuperados. Asimismo, los costos típicos de una operación minera (B.A. Wills, 2006) se pueden dividir entre la extracción (30-70%), trituración y molienda (30-50%) y separación (5-20%). El costo del proceso de reducción de tamaño representa una importante contribución al costo total de la operación de mina, perteneciendo al 30% del total que representan para la operación; a su vez, éste se puede subdividir en energía (50%) y el desgaste de las linternas y el medio de molienda (50%). Algunas veces el costo del medio de molienda constituye del 40-50% del total del costo de la conminución. Un consumo mundial estimado del acero utilizado como medio de molienda se reporta alrededor de 600 000 toneladas por año desde el año de 1980 lo que nos da una idea de la escala del problema. (Iwasaki, 1985).

Debido al beneficio económico que podría representar eficientizar la molienda al utilizar un cierto medio de molienda, la predicción del consumo del medio de molienda puede entonces jugar un rol importante en el control y mantenimiento de los costos de una producción minera. Además, los costos asociados con el medio de molienda son principalmente determinados por dos factores: a) el precio del acero y b) el comportamiento del desgaste del medio de molienda. Diferentes condiciones de operación pueden ser comparadas con la efectividad del costo beneficio del medio de molienda. Esto puede ser una tarea desafiante, ya que diferentes condiciones de operación en los circuitos se presentan frecuentemente con los cambios de mineralogía que pueden presentarse en el proceso del beneficio de minerales. El consumo del medio de molienda ha sido extensivamente estudiado por industrias del procesamiento de minerales, comprendiendo los fenómenos envueltos en su desgaste.

Hipótesis

Es posible definir una metodología a nivel laboratorio para determinar el desgaste de bolas utilizando modelos matemáticos de teoría de volumen y de superficie y relacionarlas con las propiedades físicas y mecánicas obtenidas a partir de pruebas de molienda y micrografías.

Justificación

El costo del proceso de molienda es uno de los más elevados en el costo global de una producción minera en la etapa de beneficio de minerales. Del costo total, alrededor del 50% se encuentra en el consumo de acero. En la actualidad, se cuenta en el mercado con diferentes aleaciones para el medio de molienda. Sin embargo, su evaluación de igual manera representa tiempo lo que se traduce en dinero que impacta la rentabilidad de los procesos metalúrgicos del procesamiento de minerales.

Las metodologías utilizadas en la actualidad para evaluar los medios de molienda por lo general se realizan con comparaciones de la aleación del medio y su dureza superficial y volumétrica. Las pruebas se realizan a nivel industrial en un periodo de tiempo definido por la planta de beneficio y el periodo de evaluación usualmente se detiene cuando a nivel planta se observa un consumo de bola estable.

La importancia del cálculo del consumo del medio de molienda tiene un impacto significativo al momento de hacer un cambio en el medio de molienda y poder tener una referencia y estimación buscando la economía del proceso. En la actualidad se ha encontrado poca literatura de pruebas a nivel laboratorio como las propuestas en este trabajo.

Hoy día la evaluación de un cambio de medio de molienda puede llegar a tomar hasta 6 meses ya que la introducción de un nuevo medio a molinos industriales es paulatina y necesita lograr una estabilidad, por lo que habrá que hacer un monitoreo constante del consumo de bola. Esta práctica es una moneda al aire ya que la decisión puede ser influenciada por el costo y el tipo de aleación.

Así, el generar una prueba de laboratorio que de una guía del posible comportamiento puede generar ahorros al proceso de una planta de beneficio, y tomar decisiones más acertadas, sin arriesgar tiempos prolongados las operaciones.

Objetivos.

Objetivo general.

Evaluar el efecto de la diferencia en microestructura en bolas de acero forjadas para cuantificar el desgaste isotrópico en la molienda de un mineral polimetálico sulfuroso y arena sílica en relación con sus diferentes propiedades físicas, en relación con su dureza.

Objetivos específicos.

- Conocer mediante técnicas de caracterización las propiedades físicas y químicas de los diferentes minerales de prueba.
- Determinar composiciones físicas y químicas mediante pruebas de metalografía, ensaye químico y prueba de durezas para las bolas utilizadas en moliendas a nivel laboratorio.
- Aplicar modelos matemáticos de teoría de volumen y superficie a partir de pruebas de molienda.
- Correlacionar las características microestructurales para determinar bajo que parámetros se obtiene un mejor rendimiento de bola.

Alcances del proyecto

El presente proyecto tiene como finalidad la determinación del consumo de bola a nivel laboratorio, utilizando la teoría del volumen propuesta por Davis y la teoría de superficie propuesta por Prentice, bajo condiciones de un molino de 12x12 de laboratorio sin levantadores y molienda en seco. Es importante mencionar que el desgaste corrosivo no es considerado en el consumo por lo cual la predicción puede ser menor a la esperada a nivel industria, sin embargo, se pretende generar una aproximación al comportamiento de cierta aleación como medio de molienda de una mineralogía, lo que podría aportar información a los procesos para tener una decisión fundamentada al momento de realizar cambios en la etapa de molienda.

1. ANTECEDENTES DEL DESGASTE DE BOLA DE ACERO EN MOLINOS ROTATORIOS

Esta la presente sección, se hace una revisión bibliográfica del procesamiento de minerales, enfocándose a la etapa de reducción de tamaño por medio de molienda en molinos de bolas; cuáles son las variables de interés que afectan la molienda, el tipo de medio de molienda y factores que influyen en su consumo; adicional se encuentra la descripción de las teorías de predicción de consumo utilizadas

En la sección de propiedades mecánicas de aleaciones Fe-C se describen las diferentes especies dependiendo de la composición de la bola, lo que puede afectar al desgaste, con ello realizar una correlación a su consumo según las especies minerales.

1.1 Plantas de beneficio

El procesamiento de minerales, algunas veces llamado tratamiento de menas se dedica a la extracción y concentración de minerales valiosos. Con ayuda de procesos de separación física, los granos de mineral valioso son separados de los minerales de ganga, para así producir una porción enriquecida o concentrado que contiene la mayor parte de los minerales valiosos y una descarga o colas compuesto predominantemente de los minerales de la ganga.

Esta concentración o proceso de enriquecimiento reduce considerablemente el volumen de material que debe manejar la metalurgia extractiva, reduciendo así a niveles económicos las cantidades de energía y reactivos que se necesitan para producir un metal puro.

En el procesamiento de minerales hay dos operaciones fundamentales principalmente: a) la liberación (desprendimiento de minerales valiosos de los minerales de desecho o ganga) y b) la separación de esos valores de la ganga (este último proceso se conoce como concentración).

La liberación de los minerales valiosos asociados con ganga se realiza por medio de la trituración y/o molienda hasta un tamaño de partícula tal que el producto sea una mezcla de partículas de mineral y de ganga relativamente liberadas. El grado correcto de liberación es la clave para el éxito en el procesamiento minerales. Para conocer los tamaños de liberación adecuados en la actualidad se hace uso de diferentes técnicas de estudios minerográficos, los cuales pueden incluir microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido e incluso granulometrías valoradas; este tipo de estudios nos dan una aproximación el tamaño de liberación.

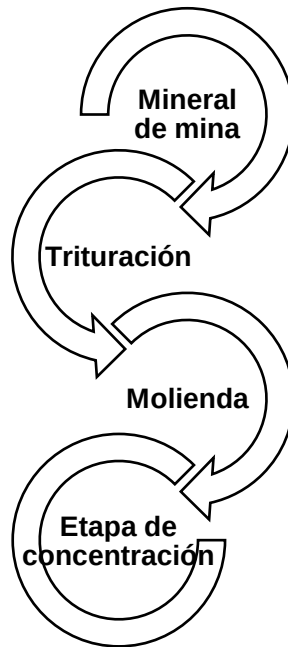


Ilustración 1. Diagrama del proceso de beneficio de minerales.

1.1.1 Trituración.

La trituración es la primera etapa mecánica del proceso de reducción de tamaño de partículas, en la cual el principal objetivo es reducir de tamaño las rocas grandes provenientes de la explotación minera en fragmentos pequeños que puedan ser alimentados a la siguiente etapa de molienda y lograr la liberación de los minerales valiosos de la ganga.

Los equipos donde se realiza la trituración se conocen como quebradoras y tienen como característica que durante la operación sus superficies de trabajo no hacen contacto entre sí. Las quebradoras se clasifican en 3 categorías:

- Primarias. Para partículas gruesas (quebradoras de quijadas, quebradora giratoria y quebradora de impacto).
- Quebradoras secundarias. Para partículas de tamaño intermedio (quebradoras de cono estándar, quebradoras de rodillos y quebradoras de martillos).
- Quebradoras terciarias. Para trituración fina (quebradora de cono cabeza corta).

Por lo general la trituración se realiza en seco, ya sea en 2 o 3 etapas: La trituración primaria donde se procesa el producto proveniente de la mina que puede medir hasta 1.5 m de diámetro y se reduce a 10 o 20 cm de diámetro.

La trituración secundaria y/o terciaria, incluye las operaciones de procesamiento del producto de la trituración primaria hasta el almacenamiento del producto final triturado, que puede estar entre 0.5 a 2 cm de diámetro.

1.1.2 Molienda

La molienda es la última etapa en el proceso de reducción de tamaño de las partículas de mineral. La reducción de tamaño se lleva a cabo por una combinación de mecanismos de impacto y abrasión, en seco o en húmedo y principalmente en unos recipientes cilíndricos rotatorios de acero llamados molinos. Dichos dispositivos tienen en su interior carga compuesta por mineral y medios de molienda y pulverizar así las partículas de mena. El medio de molienda puede ser bolas de acero, barras de acero, rocas duras y rocas del mismo mineral.

En el proceso de molienda las partículas de mineral son alimentadas entre 5 y 250 mm se reducen a tamaños entre 10 y 300 micrómetros. Los objetivos principales de la molienda es obtener un producto de tamaño controlado para la liberación óptima de los minerales de valor y tener una alta recuperación en la siguiente etapa de concentración o extracción del metal de interés. Asimismo, aumentar el área superficial de los minerales valiosos (aunque estos ya estén liberados de la ganga) y exponerlos a la acción de los reactivos de flotación o extracción del metal de interés.

Si se logra dicho propósito, entonces no solamente se ahorra energía por la reducción de la cantidad de finos que se produce, sino que cualquier etapa de separación subsecuente se facilita, resultado más económica la operación.



Ilustración 2. Molino de bolas industrial.

1.1.3 Concentración.

El principal objetivo del procesamiento de minerales es separar los minerales en dos o más productos con los valores en los concentrados, la ganga en las colas y las partículas asociadas en los medios (Wills, 1997).

Con el pasar de los años, las leyes tratadas en las plantas industriales son cada vez más bajas (Wills 2006)”; adicional al decremento de ley, las mineralogías se presentan con mayor complejidad, encontrando asociaciones complejas de minerales de interés, complicando la separación por medios físicos. Un problema recurrente de la minería en México en la actualidad se encuentra con asociaciones menores a los 60 micrómetros.

Es por ello por lo que la etapa de molienda toma un papel importante en la etapa de concentración, tener una buena liberación de partícula es fundamental para la recuperación de los minerales de interés.

1.2 Descripción de molinos rotatorios de bolas y variables que intervienen en el proceso.

1.2.1 Generalidades de molinos de bolas.

El objetivo principal de reducir de tamaño del mineral es para separar el contenido valioso en el cuerpo del mineral, asociado a la ganga. Por si sola la trituración no libera el mineral y reducciones posteriores de tamaño son requeridas. La molienda en el procesamiento de minerales es un proceso continuo donde el material se alimenta a una velocidad controlada desde las tolvas de almacenamiento hacia el extremo de alimentación del molino y se desborda por el otro extremo después de un tiempo de residencia o permanencia apropiado.

Durante este proceso, las bolas de acero dentro del molino golpean repetidamente rompiendo la roca y disminuyendo así su tamaño. Algunas reducciones de tamaño también se logran debido a las fuerzas abrasivas. Como resultado de la acción combinada de respectivos impactos y abrasión se genera la reducción de tamaño. Es necesario dar tiempo suficiente de molienda para que el mineral de interés sea liberado (Gupta, 2016).

Estructuralmente, cada tipo de molino consiste en un casco cilíndrico, con revestimientos renovables y una carga de medios de molienda. El tambor se soporta en muñones huecos fijos a las paredes laterales y puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena y, en general, mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor necesita ser el diámetro, se recomienda no alimentar partículas mayores a $\frac{1}{2}$ ".

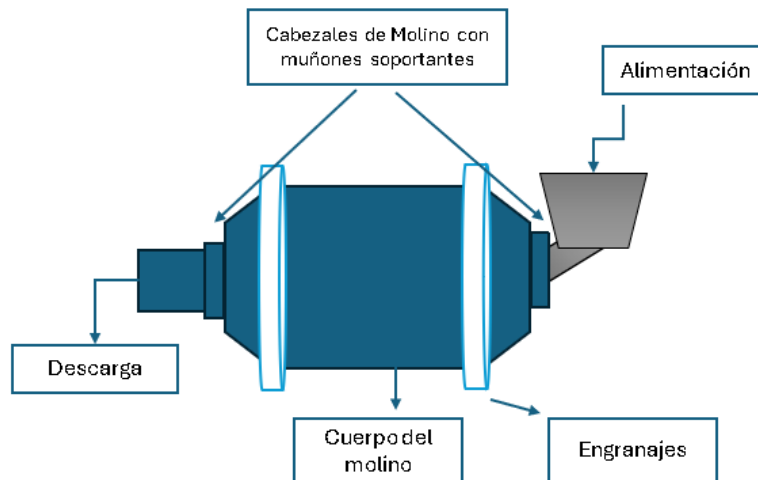


Ilustración 3. Esquema de las partes de un molino de bolas.

Las dimensiones más relevantes de un típico molino cilíndrico horizontal son la longitud del molino y el diámetro efectivo (descontando el volumen que ocupan las lanas), esto determina el volumen y por consiguiente la capacidad del molino.

La molienda en un molino está influenciada principalmente por:

- El tamaño y cantidad de los medios de molienda
- Velocidad rotacional del molino
- Demanda de energía de la molienda

A continuación, se describen de manera general algunas de las variables en el proceso de molienda.

1.2.2 Velocidad rotacional del molino.

En general, la velocidad rotacional del molino se refiere a las revoluciones por minuto que el cilindro gira. La velocidad de rotación generalmente se expresa como un porcentaje de la velocidad crítica (n_c). La velocidad crítica del molino es la velocidad a la cual la capa exterior de medios de molienda comienza a adherirse a la superficie interior del cilindro debido a la fuerza centrífuga.

A esta velocidad, la fuerza centrífuga es apenas balanceada por el peso de los medios de molienda. Normalmente el rango de trabajo en equipos de laboratorio e industriales se encuentra entre 70% y 80% de la velocidad crítica. La velocidad crítica se obtiene por la siguiente relación empírica.

$$n_c = \frac{42.3}{\sqrt{D-d}} \quad (1)$$

Donde:

n_c es la velocidad crítica del molino, rpm

D es el diámetro del molino, m

d es el diámetro de la bola de mayor dentro del molino, m.

La velocidad del molino es una constante importante, ya que permiten que actúen fuerzas de colisiones y que se transmita la energía cinética entre dos o más elementos de molienda. Estas últimas fuerzas son derivadas por el movimiento rotacional de las bolas dentro del molino y el contacto de las paredes con las bolas.

A velocidades relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva. Este movimiento se le denomina tipo cascada y produce molienda más fina, con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de aterrizar en el pie de carga. Este tipo de movimiento se le denomina catarata y reduce el tamaño de la partícula por impacto dando un producto más grueso con menos desgaste del revestimiento. Ilustración 4. Para un molino de bolas es importante conocer la velocidad a la cual alcanza la velocidad de trabajo, es decir, la velocidad a la cual las bolas caen en forma de cascada dentro del molino. Propiciando de esta manera la factura y rompimiento de las partículas.

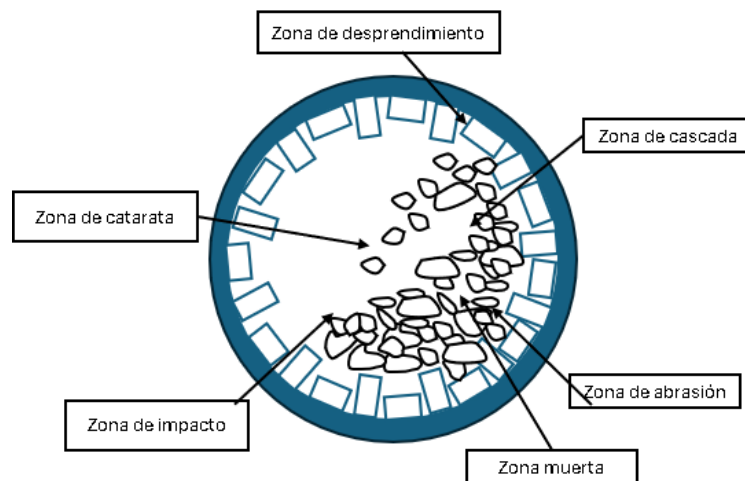


Ilustración 4. Esquema de movimiento de carga de un molino de bolas.

1.2.3 Medios de molienda.

Los medios de molienda pueden ser elementos de acero (barras o bolas) y rocas duras o del mismo mineral (dependiendo el tipo de molienda que se requiera, ya que algunas aleaciones pueden contaminar nuestro producto de molienda afectando posteriores etapas del beneficio de minerales). Su consumo es de 0.1 hasta 1 kg por tonelada de mineral alimentado al molino, dependiendo de la aplicación que se tenga. (Moema, 2009)

Las bolas deben ser tan pequeñas como sea posible y su carga se determina de manera que las bolas grandes sean lo bastante pesadas para moler las partículas grandes y de mayor dureza de la alimentación. Una carga inicial consiste en un mono tamaño de bola del desgaste se va generando el collar de bola y la reposición se hace del máximo tamaño calculado.



Ilustración 5. Collar de bolas de un molino industrial.

Las bolas finas que se forman por el desgaste inherente salen del molino junto con el producto molido y son retiradas al pasar la pulpa por una criba. En la molienda primaria se usan tamaños de bola desde 5 cm hasta 10 cm de diámetro, para moliendas secundarias se requieren tamaños de bola de 1 a 5 cm de diámetro. El volumen de carga de bola es alrededor de 30-40% del volumen interior del molino. La energía que consume el molino aumenta con la carga de bola (B.A Wills, 2006).

1.2.4 Demanda de energía en la molienda.

La molienda es un proceso de reducción de tamaño donde el consumo de energía es de los más altos en una producción minera y por ello se ha convertido en un indicador de la sostenibilidad de las explotaciones mineras (Bush, 2013). En la planta de beneficio todas las etapas de procesamiento de minerales, los molinos de bolas generan costos de operación estimados entre el 30 a 50% de los costos globales de la planta (Aldrich, 2013). La ilustración 6 muestra el costo de molienda en molinos primarios (Mular, et. al, 2002).

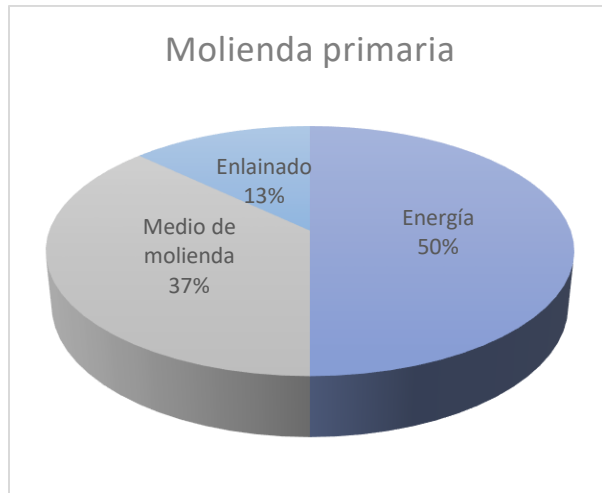


Ilustración 6. Costos de una molienda primaria.

En los procesos de molienda de minerales se ha observado mediante experimentación que el cambio en el tamaño de la partícula producido es proporcional a la energía requerida por unidad de peso de las partículas y que la energía requerida para brindar el mismo cambio en el tamaño es inversamente proporcional a alguna función del tamaño de partícula original. (Rittinger, 1867) establece que la energía es proporcional al área superficial generada en el material fragmentado, proponiendo la siguiente ecuación:

$$E = K \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (2)$$

(Kick, 1885) estableció que la energía consumida es proporcional al volumen generado en el material fragmentado:

$$E = K \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (3)$$

Una tercera relación es propuesta por Bond (1952):

$$E = 2K \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (4)$$

Donde

E es la energía consumida kWh/t

x_1 es el tamaño de partícula inicial

x_2 es el tamaño de partícula final

K es una constante de proporcionalidad

La aplicación de las teorías de Kick y Rittinger no son realistas para el diseño de circuitos de reducción de tamaño, sin embargo, la tercera ley de Bond puede ser aplicable en el rango en el que operan los molinos de bolas o rodillos. La fórmula general de la ecuación de Bond se encuentra como:

$$W = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (5)$$

Donde

W es la la energía inicial en kWh/t

W_i es el índice de trabajo en kWh/t el cual expresa la resistencia de un material a ser triturado o molido

F_{80} es el 80% del tamaño pasante en la alimentación en m

P_{80} es el 80% del tamaño pasante en el producto en m

1.2.5 Tipo y geometría de levantadores.

El revestimiento o blindaje es la cara de trabajo interna del molino y son intercambiables, deben resistir los impactos, el desgaste y promover el movimiento de la carga. Tienen una gran variedad de forma de elevadores siendo los más comunes el ondulado, Lorain, escalonado y el sobrepuesto.



Ilustración 7. Blindaje interno de un molino de bolas industrial.

Furestenau y Abouzeid (1985) determinaron que la molienda y el consumo de energía dentro del molino son afectados significativamente por el tipo de mecanismo de molienda predominante en el sistema. Además, el diseño de levitador constituye el parámetro más influyente para el mecanismo de molienda.

Cuando la carga está compuesta de bolas pequeñas, los levitadores producen el movimiento de catarata, pero la energía involucrada en los impactos podría ser de baja debido a la masa pequeña de la bola. Caso contrario cuando las bolas son de un tamaño mayor comparadas con la altura de los levitadores, estas solo rodaran sobre los levitadores restringiendo la proporción de material a movimiento tipo cascada y así el molino perderá potencia.

1.2.6 Nivel de carga.

El nivel de carga nos indica el volumen que ocupa la carga de las bolas al interior del molino considerando los huecos vacíos existentes entre las bolas y la carga del mineral, viene expresada por porcentaje respecto al volumen total interior. Los molinos trabajan con un nivel de llenado comprendido entre un 35%-45 %

El porcentaje de volumen ocupado del molino por mineral V_R puede ser:

$$V_R = \frac{\text{volumen de la carga interna}}{\text{volumen interno total del molino}} \times 100\% \quad (6)$$

Es importante que el molino tenga un nivel adecuado con la carga, un sobre llenado tiende a acumular finos en el pie del molino, lo que resulta en un efecto de amortiguador que absorber el impacto que causa el rompimiento.

Cuando la carga de la roca es baja, hay un exceso de contacto bola-bola lo que conduce nuevamente a un bajo rompimiento. El operador entonces tiene que eficientizar cada constituyente de la carga para obtener el tamaño de partícula requerido y maximizar la eficiencia de la energía.

La carga de bolas nuevas, contenida en un molino de bolas, puede ser estimada a partir de la siguiente expresión:

$$T_{b\Box} = V_p \left(\frac{L}{D}\right) D^3 \quad (7)$$

Donde:

T_b son las toneladas cortas de bola contenidas en la respectiva carga del molino

V_p es la fracción del volumen interno del molino cargado con bolas (volumen aparente)

D es el diámetro interno del molino medido entre revestimientos (m/ ft)

L es la longitud interna del molino (ft) se aconseja una razón L/D 1,3 y 1,6,

1.3 El medio de molienda y su desgaste en la reducción de tamaños.

El medio de molienda tiene un impacto significativo en el comportamiento de los molinos en términos de la distribución de tamaño del producto, consumo de energía y costos de molienda. Considerando la contribución de los costos del medio de molienda a los costos generales, vale la pena examinar la posibilidad de disminuirlo.

El medio ideal de molienda debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe tener la suficiente área superficial para proveer el contacto con el material que está siendo molido.
- Debe tener la suficiente masa para contener la suficiente energía requerida para romper las partículas de mineral.

Estos requisitos deben ser balanceados, ya que en cuanto más grande sean los medios de molienda individuales, menor será la superficie específica. La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. La molienda en los molinos de bola es afectada por el contacto partícula-bola.

1.3.1 El acero como principal material del medio de molienda.

Básicamente todos los aceros son en un principio, aleaciones de hierro y carbono. Los aceros llamados “al simple carbono” son aquellos que generalmente tienen (además del carbono) cantidades o porcentajes pequeños de Mn, Si, S y P. Los aceros aleados son aquellos que contienen cantidades o porcentajes específicos de otros elementos en una composición química, los elementos más comúnmente aleados con estos aceros son el níquel, cromo, molibdeno, vanadio y tungsteno. El Mn se encuentra también en esta categoría si se especifica dentro de un porcentaje mayor al 1%, uno o más de estos elementos de aleación pueden ser requeridos para proporcionar en los aceros características especiales o propiedades para aplicaciones de Ingeniería. Por otra parte, el carbono es el principal ingrediente en los aceros, la cantidad de carbono presente en los aceros de simple carbono tiene un efecto pronunciado sobre las propiedades de un acero y en la selección del tratamiento térmico aplicable para ciertas propiedades deseadas debido a la importancia del contenido de carbono, un método para clasificar el acero al simple carbono se encuentra en base al contenido de este.

Un acero al bajo carbono generalmente contiene cantidades menores a 0.30% de C en peso. Cuando un acero contiene 0.30 a 0.60% de C es clasificado en un acero al medio carbono. Los aceros que contienen arriba de 0.60% de carbono se

clasifican en aceros de alto carbono y aquellos que contienen arriba de 0.77% de carbono pueden ser llamados aceros de herramientas. Raramente el contenido de carbono se encuentra en el rango de 1.3 al 2%. El límite superior de carbono en los aceros es del 2%, cuando más de este contenido de carbono está presente la aleación Hierro-Carbono es considerada hierro colado. El contenido de carbono del hierro colado se encuentra en el rango de 2.3 al 4% de carbono.

Estructura del acero

La superficie de una pieza de un acero dado no indica que presenta su estructura interna, pero si la pieza del metal es rota, la fractura mostrará una apariencia granular, los granos son generalmente tan pequeños que es necesario la amplificación para mostrar su presencia. En principio para examinar un espécimen ó muestra de una pieza de metal bajo un microscopio adecuado, esta deberá ser primeramente preparada por desbaste en una superficie plana y después pulida con abrasivos finos obteniendo una superficie de acabado espejo (libre de ralladuras). La delgada película de metal será atacada, debido a la acción de pulido por el ataque de la superficie pulida con un agente químico revelador (por ejemplo, una solución al 5% de ácido nítrico en alcohol conocida como Nital, es comúnmente usado para atacar los aceros al carbono), revelando así su microestructura. Este proceso es definido como metalografía

Si tomamos una foto a la superficie del material preparada, obtenemos una fotomicrografía (fotografía tomada con la ayuda de un microscopio), en este caso un microscopio metalúrgico conocido como metalográfico.

Esta fotografía muestra la microestructura de cómo se revelo por preparación y ataque apropiado el espécimen. Las fronteras de grano generalmente se muestran como líneas. Las áreas oscuras en la fotomicrografía son causadas por la diferencia en la profundidad de ataque. Cada grano en la ilustración 8 es un cristal simple de metal. Una amplificación de 100x es generalmente suficiente para mostrar el grano en un metal puro. (Maldonado Flores, 1996)

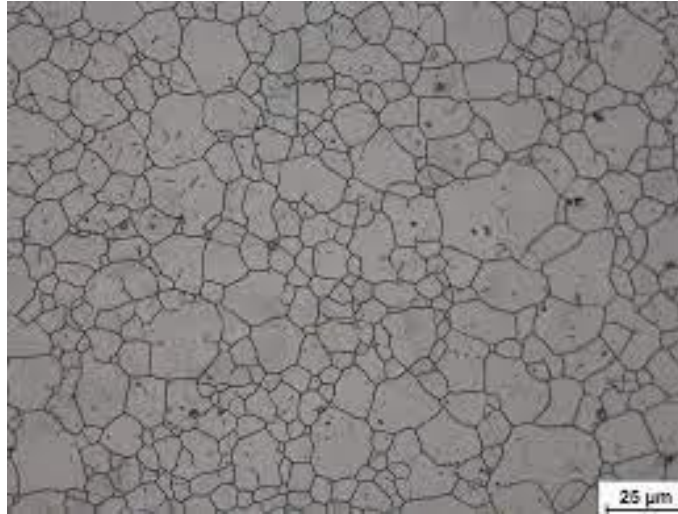


Ilustración 8. Ejemplo de una micrografía. <https://www.struers.com/en/Knowledge/Materials/Stainless-Steel>

Todos los metales sólidos son cristalinos por su naturaleza; durante la solidificación del acero se genera la formación de pequeños cristales.

En principio para poder ver el arreglo de las redes cristalinas de los átomos en hierro ó acero son necesarias amplificaciones, un pulido y un atacado de metal de además de un aumento cercano a 35,000,000 millones de veces más de lo que se pudiese ver a simple vista. La estructura interna de un grano está basada en la estructura atómica, también llamada red espacial de algunos materiales cristalinos.

A una temperatura fija los átomos en un grano son espaciados a distancias definidas uno de otro y no pueden cambiar este espaciamiento. No es verdad que los átomos estén unidos juntos de esta manera, pero es usual dibujar los cristales como una red de trabajo tridimensional de átomos conectados por líneas imaginarias. Hay catorce tipos de redes posibles, en la metalurgia ferrosa necesitamos conocer solamente dos, ilustración 9.

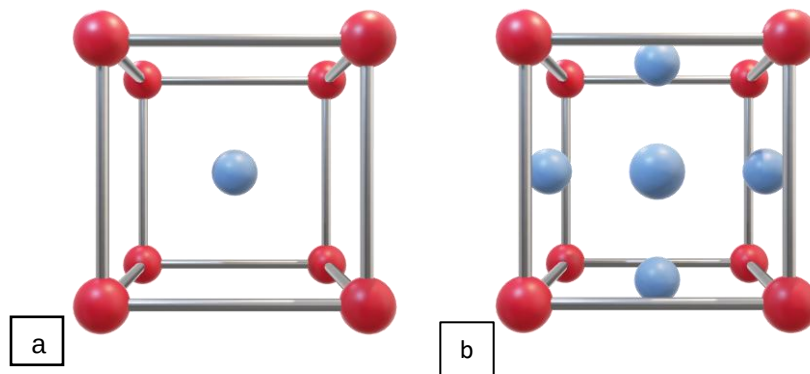


Ilustración 9. (a) estructura BCC: cúbica centrada en el cuerpo, (b) FCC: cúbica centrada en las caras.

La estructura BCC tiene un átomo en cada esquina del cubo imaginario y uno en el centro del cubo. La estructura FCC tiene un átomo en cada esquina del cubo y uno en el centro de cada una de las seis caras. El hierro puro, así como el acero al carbón cuentan con la estructura cristalina BCC, a temperaturas ambiente en un rango de temperaturas elevadas cuenta con la estructura FCC. Este movimiento de átomos es referido por un cambio alotrópico.

La temperatura a la cual ocurre este cambio es conocida como temperatura de transformación. La ciencia de los tratamientos térmicos depende de la alotropía del hierro y de las variaciones de solubilidad del carbono en cada forma cristalina del hierro.

Debido a que el hierro es el elemento predominante en por ciento en peso en las aleaciones hierro – carbono. Cuando el hierro puro experimenta la transformación a 915°C (1675°F) el hierro es FCC y abajo de 915°C (1675°F) es BCC. Cuando cuatro átomos de carbono están presentes, dos cambios tienen lugar. La temperatura de esta transformación tiene lugar sobre un rango de temperatura en lugar de una sola temperatura. Esta información ha sido condensada en el diagrama de fase hierro-carburo en la Ilustración 10. Una fase es una porción de una aleación física, química o cristalográficamente homogénea en todo, la cual está separada del resto de la aleación por superficies de distinta orientación.

Las siguientes fases ocurren en aleaciones hierro-carbono: aleación fundida, austenita, ferrita, cementita y grafito. Puede notarse que cualquiera de estas fases llamada constituyentes como la perlita o la bainita, debido a que algunas son mezclas y no son homogéneas en todo. Un diagrama de fase es una representación gráfica de la temperatura de equilibrio y los límites de composición de campos de fase y reacciones de fase en un sistema de aleaciones.

En el sistema hierro-carburo de hierro, la temperatura es graficada verticalmente y en forma horizontal es graficada la composición. En sistemas metálicos la presión generalmente es considerada constante. Cualquier punto en el diagrama, por lo tanto, representa una temperatura y composición definida. La práctica de tratamientos térmicos raramente involucra temperaturas arriba de 1035°C (1895°F).

Puede ser relativamente fácil aceptar el hecho de que el carbono es uniformemente disuelto en hierro fundido. Es más difícil visualizar carbono sólido, o carburo de hierro, disuelto en hierro sólido. Sin embargo, es esta habilidad del hierro y el carbono de formar soluciones sólidas lo que hace posible el éxito del tratamiento térmico del acero. Refiriéndonos a la ilustración 10 el área denominada como austenítica es el área en la cual el hierro puede retener mucho carbono disuelto. En efecto, algunas operaciones de tratamientos térmicos como son: recocido, normalizado y temple, son llevados al calentamiento del acero dentro de la región austenítica, para disolver el carbono en el hierro.

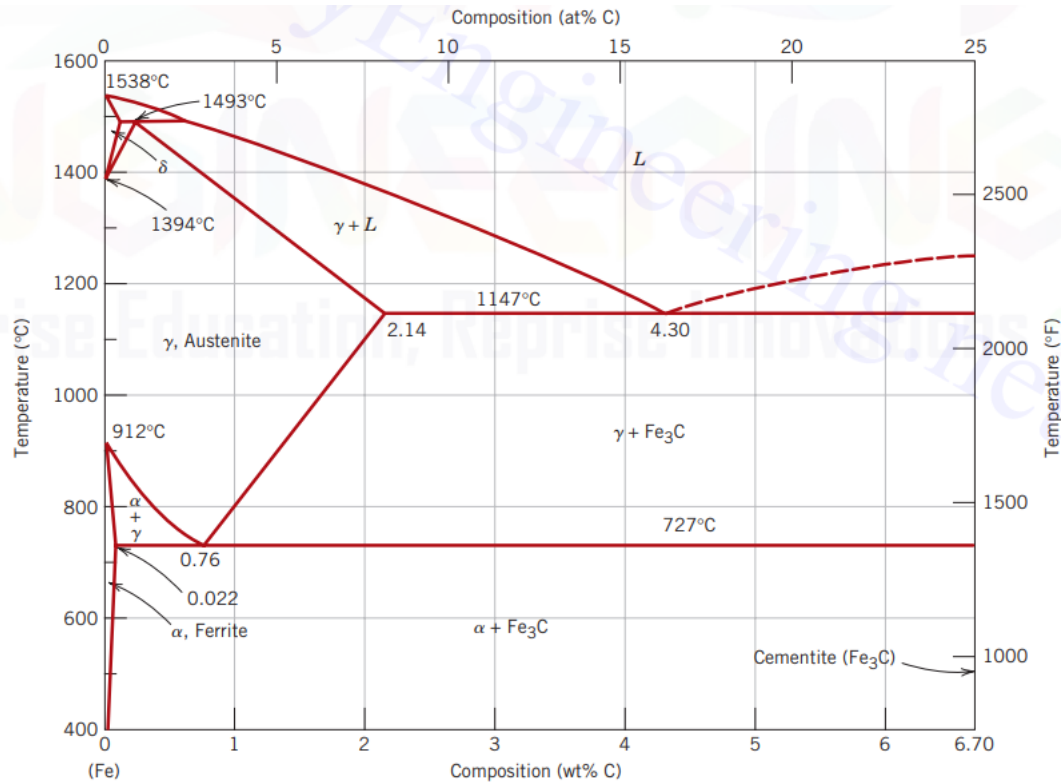


Ilustración 10. Diagrama Hierro-Carbono, tomada de: *Materials Science and engineering and introduction*, Callister, pag, 319.

El tratamiento térmico de aceros requiere una comprensión tanto de las fases de equilibrio como de las fases metaestables que ocurren durante el calentamiento y/o enfriamiento. Para los aceros, las fases de equilibrio estable incluyen:

Ferrita: La ferrita o α -ferrita es una fase de estructura cúbica de hierro centrada en el cuerpo que existe por debajo de temperaturas de 912°C para bajas concentraciones de carbono en el hierro. La α -ferrita solo puede disolver hasta un 0.02 % de carbono a 727°C. Esto se debe a la configuración de la red de hierro que forma una estructura cristalina BCC. La fase principal del acero con bajo contenido de carbono o acero dulce y la mayoría de los hierros fundidos a temperatura ambiente es el α -Fe ferromagnético.

La ilustración 11 muestra una micrografía típica de un acero previo a tratamiento térmico donde las regiones blancas son conocidas como ferrita y las negras como martensita.

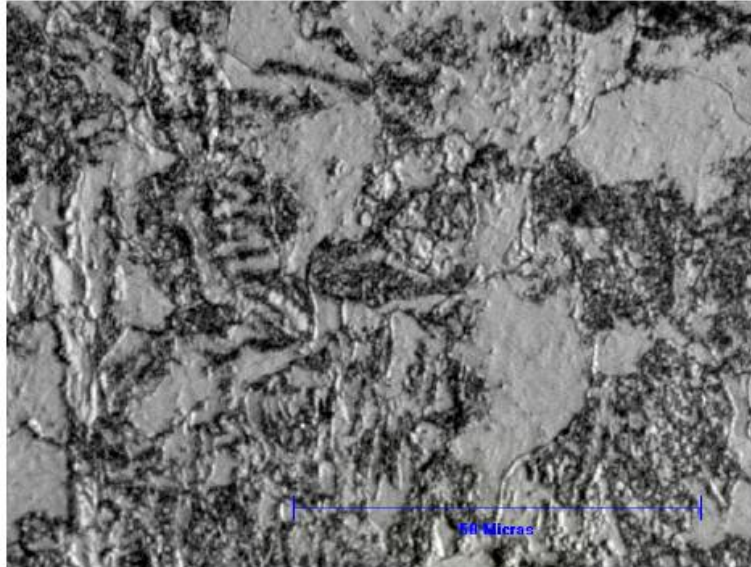


Ilustración 11. Micrografía convencional de un acero antes de tratamiento térmico. Por: Castillo y col, 2018.

Austenita: La austenita, también conocida como hierro en fase gamma (γ -Fe), es una fase de estructura cúbica de hierro no magnética centrada en la cara. La austenita en las aleaciones de hierro y carbono generalmente solo está presente por encima de la temperatura eutectoide crítica (723°C) y por debajo de 1500°C , dependiendo del contenido de carbono. Sin embargo, puede conservarse a temperatura ambiente mediante la adición de aleaciones como níquel o manganeso. El carbono juega un papel importante en el tratamiento térmico, ya que amplía el rango de temperatura de estabilidad de la austenita. Un mayor contenido de carbono reduce la temperatura necesaria para austenitizar el acero, de modo que los átomos de hierro se reorganizan para formar una estructura de celosía FCC.

La austenita está presente en el tipo de acero inoxidable más utilizado, que es muy conocido por su resistencia a la corrosión.

Grafito: Baja densidad al acero, provoca fragilidad al acero pero aumenta su dureza.

Cementita: La cementita (Fe_3C) es un compuesto metaestable y, en algunas circunstancias, puede disociarse o descomponerse para formar α -ferrita y grafito, según la reacción: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} (\alpha) + \text{C}$ (grafito). El cementita en su forma pura es una cerámica y es dura y quebradiza, por lo cual cuando este combinado formando carburos de hierro o carburos aleados puede mejorar la resistencia del acero.

Las fases metaestables son:

Perlita: En metalurgia, la perlita es una estructura metálica en capas de dos fases, que se componen de capas alternas de ferrita (87,5% en peso) y cementita (12,5% en peso) que se encuentra en algunos aceros y fundiciones. Se llama así por su parecido con el nácar.

Martensita: La martensita es una estructura metaestable muy dura con una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). La martensita se forma en los aceros cuando la velocidad de enfriamiento de la austenita es tan alta que los átomos de carbono no tienen tiempo para difundirse fuera de la estructura cristalina en cantidades suficientemente grandes para formar cementita (Fe_3C). La ilustración 12 muestra una micrografía de un acero que ha recibido tratamiento térmico para crear la fase martensita en él y mejorar sus propiedades mecánicas. La forma de la martensita se caracteriza por presentar estructuras de grano acicular, esto sucede dentro del grano de austenita y forma listones o placas en función del % de C, ilustración 12.

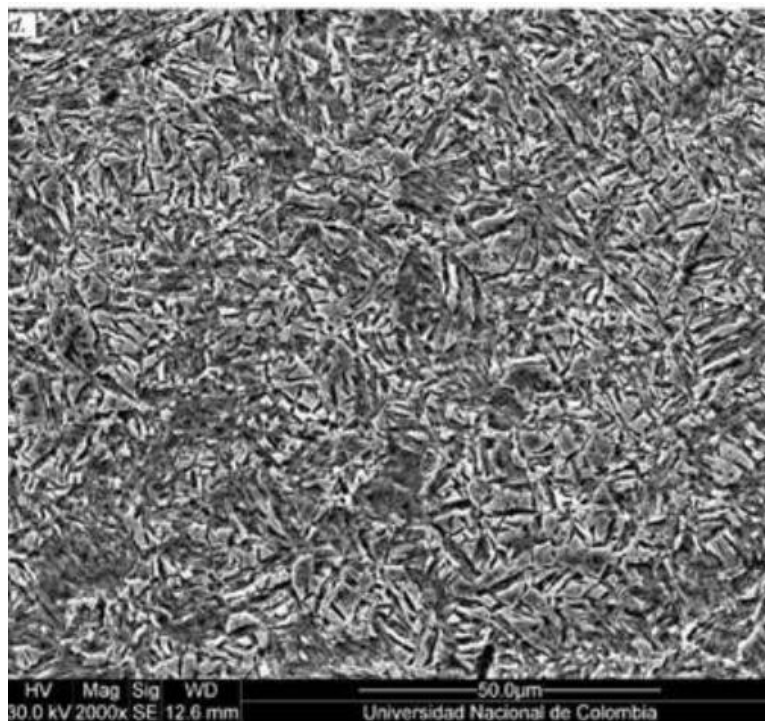


Ilustración 12. Micrografía de una estructura martensítica típica. Por: Castillo Gutierrez, 2017.

De acuerdo con David Eduardo Castillo Gutiérrez, Irma Inírida Angarita Moncaleano y Rodolfo Rodríguez Baracaldo, 2008, el efecto de un tratamiento térmico que promueva la generación de una fase tal como la martensita, puede generar un aumento de resistencia de 412.49 MPa a 523.68MPa, de aquí la importancia de analizar las fases presentes en un material para entender mejor su comportamiento bajo diferentes aplicaciones.

Bainita: La bainita es una microestructura en forma de placa que se forma en los aceros a partir de la austenita cuando las velocidades de enfriamiento no son suficientemente rápidas para producir martensita, pero aún lo son lo suficiente para que el carbono no tenga tiempo suficiente para difundirse y formar perlita. Los aceros bainíticos son generalmente más fuertes y duros que los aceros perlíticos; sin embargo, exhiben una combinación deseable de resistencia y ductilidad.

1.3.2 Propiedades físicas del medio de molienda.

Una gran variedad de materiales es usada para resistir el desgaste en los procesos de conminución. La agresividad de los materiales procesados es el factor importante en la determinación de la velocidad de desgaste absoluta. Combinando características de alta dureza, una máxima resistencia al desgaste y una ductilidad adecuada es posible evitar la fractura, balanceando el costo-beneficio. (Durman, 1998; Moema et al 2009).

Algunas de las aleaciones que se pueden encontrar son los aceros resistentes, no metálicos y aleaciones de hierro. Además de aceros al manganeso con contenido adicional de elementos tales como Cr, Ni y Mo los cuales mejoran la calidad de la aleación. Las bolas tienen una dureza típica entre 60-65 Rockwell C. Las aleaciones de bajo carbono son las menos costosas para la molienda dura, donde los contaminantes metálicos no importan. Aceros austeníticos (aceros con altos niveles de Cr y Ni y bajos niveles de C) son usados típicamente para medios ácidos donde requieren bolas no magnéticas. (Aldrich, 2013)

La norma ISO-9001:2001, ha sido especialmente diseñada para maximizar la durabilidad del producto en su aplicación final, la que en gran medida es determinada por la microestructura de la aleación resultante.

Variables de control importantes, aunque no determinantes por sí solas de la calidad del producto son la dureza superficial y volumétrica de las bolas, para las cuales se han definido los siguientes rangos de aceptación (Sepúlveda J, 2006):

Tabla 1. Ficha técnica de bolas en el mercado, por Mol-Cop.

Diámetro de la bola (pulgadas)													
Dureza superficial Rockwell C													
Diámetro	1	1.25	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.25	5.5	6
Min	60	60	60	60	60	60	60	55	53	53	53	53	53
Max	65	65	65	65	65	65	65	63	63	63	63	63	63
Dureza Volumétrica Rockwell C													
Min	60	60	60	60	60	60	60	55	53	53	53	53	53
Max	65	65	65	65	65	65	65	63	63	63	63	63	63

Como su nombre bien lo indica, la dureza superficial normalmente medida en escala Rockwell C corresponde a mediciones estándar de dureza sobre la superficie misma de la bola. Por su parte, la dureza volumétrica corresponde al promedio ponderado de las durezas de las infinitas capas interiores que constituyen el cuerpo esférico total. Esta se estima a partir de múltiples mediciones de dureza realizadas a lo largo de uno o más radios sobre un corte seccional a través del centro de la esfera.

Por lo tanto, demanda un esfuerzo de preparación de muestras, ejecución de mediciones y procesamiento de tales datos considerablemente mayor que una simple determinación de dureza superficial.

1.3.3 Pruebas generales para caracterización de las bolas de acero.

Metalografía

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y aleaciones. La forma más sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista. Los estudios microscópicos producen resultados que son útiles para determinar si es un metal puro o una aleación además de las especificaciones en relación con su proceso de fabricación. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas mecánicas y para controlar los procesos industriales y de manufactura. Las técnicas metalográficas se han desarrollado precisamente para identificar las fases presentes en los metales y sus aleaciones, y para explicar el mecanismo de su formación. Estas fases que constituyen el agregado metálico son, generalmente, de tamaño microscópico y para su observación y estudio es preciso preparar debidamente la probeta.

Una superficie metálica sometida a estudio metalográfico debe ser plana y estar pulida perfectamente debido a que la pequeña profundidad del foco de los sistemas ópticos de observación (a grandes aumentos) no permitiría enfocar la imagen simultáneamente en planos sustituidos a distintos niveles. También debe estar suficientemente pulida para que solo pueda aparecer en ella detalles propios de su estructura ni circunstancias ajenas a ella que puedan ser observados.

Una vez obtenida una muestra (con su superficie metálica pulida perfectamente) se somete a un ataque químico cuyo propósito es hacer visibles las características del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química. Los reactivos utilizados consisten en: a) ácidos orgánicos o inorgánicos y b) álcalis disueltos en alcohol, agua y otros solventes.

Si el tiempo de ataque químico es inadecuado la microestructura no será revelada. El ataque se detiene al colocar la muestra bajo una corriente de agua, se prosigue limpiando la muestra con alcohol y se utiliza una secadora de cabello para terminar de secarla. Tras realizar estos pasos, se dejará de manipular la zona revelada, ya que se puede alterar la condición superficial de la muestra.

Uno de los reactivos más utilizados para el ataque de hierros y aceros es el nital, que consiste en un 2% de ácido nítrico concentrado en alcohol etílico. Para su aplicación se vierte en un vidrio de reloj y la muestra preparada y pulida con anterioridad se frota con un algodón impregnado de nital. Por lo común el ataque debe durar de 3 a 5 segundos. Inmediatamente después la muestra se lava en la corriente de agua para después limpiar con alcohol y secar. Por último, la muestra atacada se observa en un microscopio óptico de luz reflejada para analizar las fases reveladas (Guzman, C., 2013).

La metalografía nos permite entender la historia de formación del material la cual influye directamente en sus propiedades mecánicas, así mismo, puede indicarnos posibles fallas y por ende predecir su comportamiento al ser utilizado el material bajo condiciones específicas, como, por ejemplo, en la molienda de minerales; donde el medio de molienda es sometido a cargas de alto impacto y un ambiente con abrasión y corrosión.



Ilustración 13. Diagrama de proceso de un ensayo metalográfico.

Prueba de dureza en escala Rockwell

La dureza Rockwell es determinada usando un aparato llamado. En indentador también conocido como penetrador, en la prueba de dureza, es utilizando una maquina verificada para forzar a un indentador con forma esfero-conica de diamante o un balin de carburo de tungsteno bajo condiciones específicas es hundido en la superficie del material a prueba, la diferencia entre la profundidad de penetración como la fuerza del indentador incrementa conforme la prueba avanza. Una muestra de tamaño adecuado y un espeso mínimo de por lo menos 10 veces la profundidad de huella.

La muestra a prueba debe estar perpendicular al indentador y con una superficie plana y paralela. Además, debe estar libre de marcas superficiales, hundimientos, o prominencias o irregularidades superficiales que alteren el resultado.

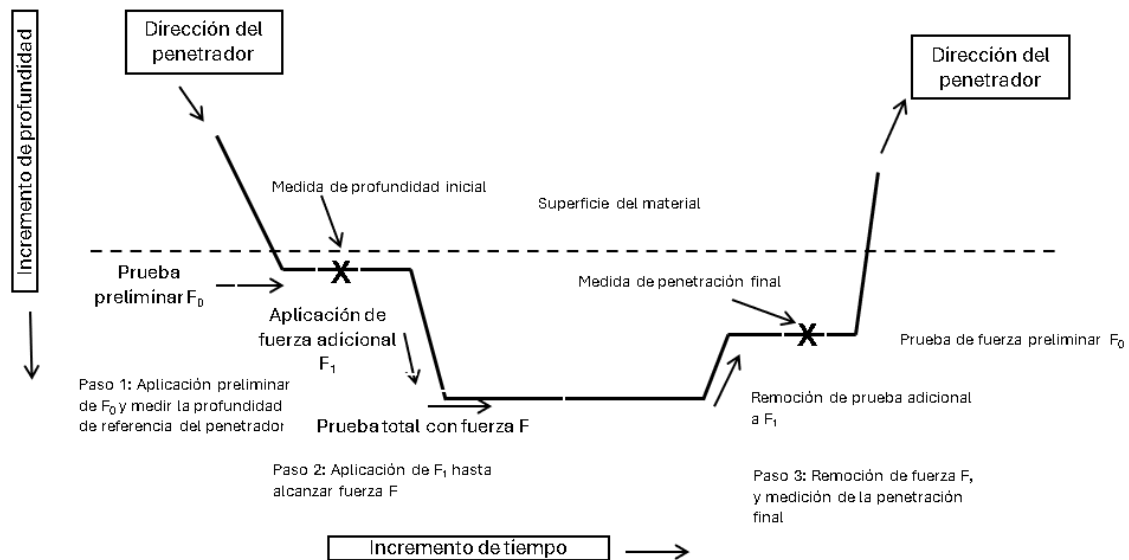


Ilustración 14. Esquema de proceso para una prueba de dureza Rockwell

La dureza que mide la escala Rockwell se refiere a la resistencia a la penetración de un material, generalmente metálico. Los métodos de dureza de este método actualmente se especifican en la norma ASTM E-18, cuyo conocimiento es indispensable a la hora de realizar cualquier ensayo de dureza Rockwell.

El ensayo de dureza Rockwell consiste en presionar un indentador (ilustración 14) en el material de ensayo. Cada vez que se realiza un ensayo, se aplican dos cargas a la muestra a examinar. El penetrador puede ser una bola de carburo de tungsteno de un diámetro determinado 1/16, 1/8 ó 1/2 in, También pueden utilizarse un penetrador de diamante con un ángulo de 120° y un radio de punta de 0.2 mm (también conocido como Brale). El tipo de penetrador y la carga de ensayo determinan la escala de dureza que se expresa en letras como A, B, C, etc.

La escala de dureza Rockwell, que combina múltiples cargas de prueba y tipos de penetradores, permite medir la dureza del material utilizando las lecturas de la deformación permanente. Cada una de las escalas de dureza Rockwell utiliza una combinación diferente de fuerzas de ensayo y tipos de indentadores. Al elegir una escala adecuada para una muestra de metal, los evaluadores tienen en cuenta el tamaño y la forma del material de ensayo, su homogeneidad y las limitaciones de cada escala. Cada escala requiere diferentes cargas o penetradores, por lo que hay que tener muy en cuenta con qué escala se trabaja al evaluar los resultados.

Difracción de Rayos X

La difracción de rayos x se produce al bombardear un metal con electrones de alta energía. Cuando los electrones penetran en el metal se desaceleran y emiten radiación en un intervalo de longitudes de onda, denominándose esta radiación continua *Bremstrahlung* (*Bremssse* significa freno en alemán y *Strahlug* rayo). Sobre esta aparecen supuestos picos agudos de alta intensidad. Estos picos tienen origen en la interacción de electrones incidentes con los electrones de las capas internas de los átomos. Una colisión expulsa un electrón y un electrón de mayor energía desciende a la vacante, emitiendo el exceso de energía como un fotón de rayos X.

Esta técnica nos proporciona intensidades de las figuras de difracción, siendo posible construir un esquema detallado de los entornos de los átomos. Los métodos de difracción de rayos X constituyen un instrumento muy útil del que se dispone para el estudio de la estructura interna de arreglos cristalinos.

Cuando hacemos incidir un haz de rayos X sobre un cristal, este choca con los átomos haciendo que los electrones se encuentren en su trayectoria y vibren con una frecuencia idéntica a la de la radiación incidente. Estos electrones actúan como fuentes secundarias de nuevos frentes de onda de rayos X con la misma longitud de onda y frecuencia.

Cuando un cristal difracta rayos X, las ondas dispersadas electromagnéticas reemitidas interfieren entre si constructivamente sólo en algunas direcciones estando con ángulo θ , es decir, se refuerzan acumulándose el resto. Los rayos 1 y 2 (ilustración 15) estarán en fase y por tanto se producirá difracción cuando la distancia AB represente un número entero de longitud de onda, esto es cuando $AB=n$, siendo n un número entero (0, 1, 2,3...n). (Perles J. 2015).

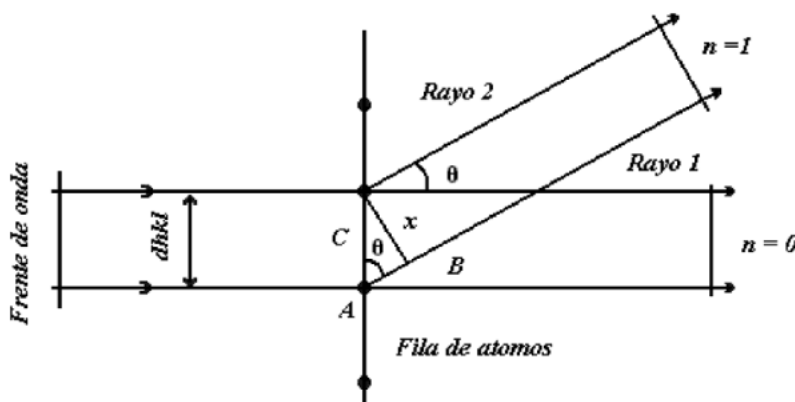


Ilustración 15 Mecanismo de difracción.

1.3.4 Mecanismos del desgaste del medio de molienda

Desgaste abrasivo

La abrasión se refiere al removimiento directo del metal de la superficie del medio de molienda. En operaciones de molienda a bajas velocidades de cascada, el desgaste abrasivo es considerado el mecanismo de desgaste predominante. En minerales altamente abrasivos, aproximadamente 1-2 kg del medio de molienda son consumidos por tonelada molida (Moema, y col. 2009). En molienda húmeda, se asume que la pulpa cubre la superficie de la bola en una capa no muy gruesa para amortiguar el impacto entre las bolas y no muy diluida para resultar en insuficiente cobertura de las superficies de las bolas y excesivo desgaste de bola. (Iwasaki 2015) concluye que el desgaste abrasivo es fuertemente dependiente de la reología de pulpa, la cual es a su vez gobernada por la carga de sólidos y viscosidad modifica.

La abrasión juega un gran papel en la molienda fina y ha sido estudiada. Sin embargo, es asociada al desgaste abrasivo, el cual ocurre por la penetración y barrido de los materiales del medio por partículas de mineral duro. La velocidad del desgaste de bola durante el proceso abrasivo es proporcional al área superficial de la bola o al cuadrado del diámetro de la bola. (Vermeulen, 1986).

Desgaste por impacto.

El movimiento de carga típico exhibe la combinación de 3 zonas

las cuales pueden ser caracterizadas por (i) la zona donde hay deslizamiento entre las bolas y el material molido entre ellas; la zona (ii) por el rodamiento de las bolas unas sobre otras rompiendo el mineral en impactos de baja energía y la zona mejor conocida como la cascada (iii) donde las bolas que vuelan son reincorporadas a la carga de bola triturando el material en eventos de alta energía (zona de trituración)

Los mecanismos de impacto asociados con la energía disipada en el impacto en la zona de cascada y trituración aportan desgaste al medio de molienda.

En la práctica, las velocidades del medio de molienda en los molinos van del orden de 10 m/s y generalmente el rompimiento por impacto del medio es más pronunciado en molinos largos. (Gates y col, 2007).

Desgaste corrosivo.

El desgaste corrosivo ha sido descrito como la pérdida de metal debido a reacciones químicas y electroquímicas con el ambiente (Natarajan, 1996). El desgaste corrosivo del acero (como medio de molienda) está fuertemente asociado con ambientes de molienda húmeda. Dos modelos han sido postulados, uno se basa en celdas abrasivas diferenciales y otro en celdas galvánicas.

En celdas abrasivas diferenciales sus superficies expuestas de los minerales actúan como cátodo, donde el oxígeno es reducido, mientras que en superficies abrasivas frescas actúan como ánodos (donde el hierro es oxidado).

En el sistema de celdas galvánicas, las partículas de mineral son el cátodo y las bolas de acero el ánodo, de nuevo conduce a un acelerado desgaste a través de la oxidación del hierro en el medio.

Un factor que representa una complicación en el conteo de los efectos de estas celdas galvánicas es el efecto de interacciones galvánicas entre minerales sulfurosos y los medios de molienda, las cuales necesitan ser considerados en conjunto con las interacciones galvánicas que pueden ocurrir entre minerales sulfurosos. Interacciones electroquímicas entre áreas desgastadas y no desgastadas en la superficie de la bola, así como entre los medios de molienda y los minerales, ocurren especialmente en la molienda en húmedo resultado en un medio de corrosión.

En un contexto similar metal-mineral/bolas-ambiente, la velocidad de corrosión por superficie del medio puede ser la misma, independientemente el tamaño del molino (Iwasaki, Riemer y Orlich 1985).

1.3.5 Modelos matemáticos de la teoría del desgaste de los medios de molienda

El desgaste por sí mismo es complejo y no hay una teoría de desgaste generalizada que describa adecuadamente el fenómeno del desgaste. Muchos autores han hecho una importante contribución para entender el proceso de desgaste y cuyas teorías se describen a continuación.

Presentaron la prueba de bola marcada a nivel industrial para verificar las teorías de volumen y superficie. Ellos encontraron que ambas tienen una buena correlación con los datos que se tienen en la actualidad para varios grados de tamaño de bola. Entonces es posible que cualquiera de ellas puede ser usada en una discusión teórica de la prueba de bola marcada.

Posteriormente Vermeulen y Howat (1986) postularon la teoría de desgaste combinado, donde las constantes de desgaste pueden variar durante la molienda, dependiendo de la prevalencia de la abrasión o el fenómeno de impacto y cambios en el ambiente de molienda. Por ejemplo, conforme el diámetro del molino y el diámetro de bola de la carga incrementan, la intensidad de las fuerzas de impacto puede ser mayores que las fuerzas abrasivas. La corrosión también juega parte en la variación del exponente.

Teoría de desgaste de Bond.

En general, la ley de la velocidad de desgaste asume que el desgaste de una pieza en medio esférico puede ser generalizada por:

$$\frac{dm}{dt} = k(\rho\pi D^2)D^\Delta \quad (7)$$

Donde k es la constante de desgaste lineal. Si $\Delta=0$ la ley del desgaste se reduce al modelo línea, la masa perdida es proporcional al área superficial expuesta de la esfera y la velocidad del decrecimiento del diámetro de la bola (dD/dt) es constante. Esto es lo que se conoce como la ley de Bond. Si $\Delta=1$, la velocidad de la pérdida de masa es proporcional al desgaste del volumen de la esfera que es conocida como la ley de desgaste de Davis. En la mayoría de las pruebas, la ley de Bond es observada. Una alternativa de la ley del desgaste de las bolas de acero está dada por la ley básica como:

$$\frac{dm}{dt} = k_1 d_1^n \quad (8)$$

Donde:

m es la masa perdida de la bola en g

t es el tiempo en h

d_1 es el diámetro de la bola

k_1 es la constante de proporcionalidad

n es un exponente constante, que quiere decir que la velocidad de desgaste de la bola es proporcional al diámetro de la bola.

Diferentes constantes exponenciales se han propuesto en rangos de 2 a 3, dependiendo la importancia relativa de la dependencia de la superficie dependiendo la abrasión y corrosión ($n=2$) cuando la velocidad critica es cercana al 60% y dependiente a las fuerzas de impacto ($n=3$) cuando la velocidad critica es desde un 85% a más. (Aldrich 2013)

En base a numerosos datos de pruebas experimentales y de plantas industriales Bond (1964) desarrolla las siguientes ecuaciones para el desgaste de la bola en molienda seca y húmeda.

Para molienda en húmedo:

$$\text{Desgaste de bola} \left(\frac{kg}{kWh} \right) = 0.16(A_i - 0.015)^{2/3} \quad (9)$$

Para molienda en seco

$$\text{Desgaste de bola} \left(\frac{kg}{kWh} \right) = (0.023A_i)^{0.5} \quad (10)$$

Donde:

A_i es el índice de abrasión del material determinado de pruebas de abrasión.

El rango de los índices de abrasión para varios materiales se obtiene por pruebas específicas usando métodos descritos por Bond (1963).

Teoría de volumen

De acuerdo con la teoría de volumen, la velocidad a la cual el peso de cualquier bola decrece es proporcional a la masa (volumen) de la bola. Se origina de la idea de que la mayoría de los eventos de conminución ocurren a pie de carga donde los impactos predominan.

Se ha establecido que, durante el impacto de la bola, se crea un esfuerzo en la partícula el cual es proporcional a la energía cinética de la bola cuando se tiene el movimiento tipo cascada (a su vez la energía cinética es proporcional a la masa o volumen de la bola). Esto puede ser representado matemáticamente como:

$$-\frac{dm}{dT} = \frac{m}{\tau} \quad (11)$$

Donde:

T es la cantidad de mineral molido en toneladas o kg

τ es la constante de tonelaje de bola, medida en las unidades de T

m es la masa de la bola en kg

De la ecuación 11

$$m(T) = m_o \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \quad (12)$$

Donde:

m_o es la masa original de la bola en g

De la ecuación 11, se puede decir que después de que τ toneladas de mineral han sido molidas, la masa de la bola puede ser reducida por un factor de e^{-1} (e viene de la base de logaritmo natural) por lo tanto $m(\tau)=m_o e^{-1}$ aproximadamente 37% de m_o
Si m_1 y m_2 son respectivamente la masa de la bola antes y después de que T_o toneladas de mineral han sido molidas, entonces, τ , la constante de tonelaje está dada por:

$$\tau = \frac{T_o}{\ln\left(\frac{m_1}{m_2}\right)} \quad (13)$$

Pero esta teoría se ha aplicado a nivel industrial con éxito, no se encuentra a nivel laboratorio una adecuación experimental para ella, por lo que no se ha podido aplicarla a este nivel. (Vermulen y col. Al 1983)

Teoría de superficie.

Se ha estudiado que el medio total de desgaste en el proceso de molienda resulta de 3 mecanismos: abrasión, impacto y corrosión. El desgaste corrosivo es el más significativo en molienda en húmedo y es menos para molienda en seco, mientras que el desgaste por abrasión e impacto dominan en molienda en seco.

Sin embargo, es difícil aislar sus contribuciones relativas hacia todo el desgaste bajo las condiciones en el molino; la contribución al medio total de desgaste para cada uno de estos mecanismos de desgaste no ha sido correctamente establecido.

Conforme la velocidad del molino se aproxima a la velocidad crítica; la carga de la bola cae continuamente desde una altura cercana o mayor que la mitad del diámetro del molino y el contacto se hace con partículas de mineral, otras bolas o laines causando desgaste por impacto de los medios de molienda y laines.

Durante este proceso, la velocidad de desgaste de la bola, la cual es la velocidad a la que pierde masa la bola, es proporcional a la masa de la bola; el cubo del diámetro de la bola. Esto es una gran prueba de que las bolas son proyectadas hacia al aire y colisionan con la carga de masa, y algunas veces con el enlainado.

Incrementando el tamaño del molino se incrementa la energía disipada en la molienda, la caída y la trituración. Estas últimas pueden incrementar la perdida de metal a través de desgaste abrasivo y por impacto.

Prentice (1943) y Norman 1949 produjeron evidencia que soporta la teoría. Para bolas de masa m , el área superficial es proporcional a la masa elevada a $2/3$; de modo que la velocidad de pérdida de masa perdida es:

$$-\frac{dm}{dT} = bm^{2/3} \quad (14)$$

Donde la variación de la masa de la bola (m) respecto al tonelaje molido (T) es igual a una constante de desgaste superficial (b), multiplicada por la masa de la bola elevada a la $2/3$.

Integrando la ecuación 13, obtenemos:

$$m(T) = \left(m_o^{1/3} - \frac{1}{3}bT\right)^3 \quad (15)$$

Donde:

m_o es la masa original de la bola en g y

T son las toneladas molidas de mineral.

Las ecuaciones 12 y 13 son sólo válidas para bolas que permanecen constantemente esféricas, y solo válida si:

$$T < \frac{3m_o^{1/3}}{b} \quad (16)$$

Es decir que las toneladas molidas T sean menores que la relación de 3 veces la masa inicial de la bola elevada a la 1/3 entre la constante de desgaste superficial b.

Para el presente estudio, se utiliza tanto la teoría del volumen como la teoría lineal para el cálculo del desgaste de bola a nivel laboratorio.

2. METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR EL DESGASTE DE BOLA.

Para la preparación de los materiales de experimentación se parte de 2 muestras de mineral, una de ellas se constituye de sulfuros y otra arena sílice. Sin embargo, las especies específicas eran desconocidas, por ello cada muestra se preparó a un tamaño menor a $2000\mu\text{m}$, se homogeneizó y se tomó una muestra representativa de 10 g de cada una. Dichas muestras fueron pulverizadas por separado en un mortero de ágata hasta un tamaño menor a las $20\mu\text{m}$ para ser sometidas a un estudio por difracción de rayos X.

Adicional se hicieron ensayos granulométricos de cada muestra encontrando que para la muestra de sulfuros el P_{80} se encuentra en $1582.47\mu\text{m}$ y para la muestra de sílice en $778.93\mu\text{m}$. Este es el tamaño de alimentación para las pruebas de molienda indicadas en la Ilustración 16, pruebas realizadas para evaluar el consumo de bola.

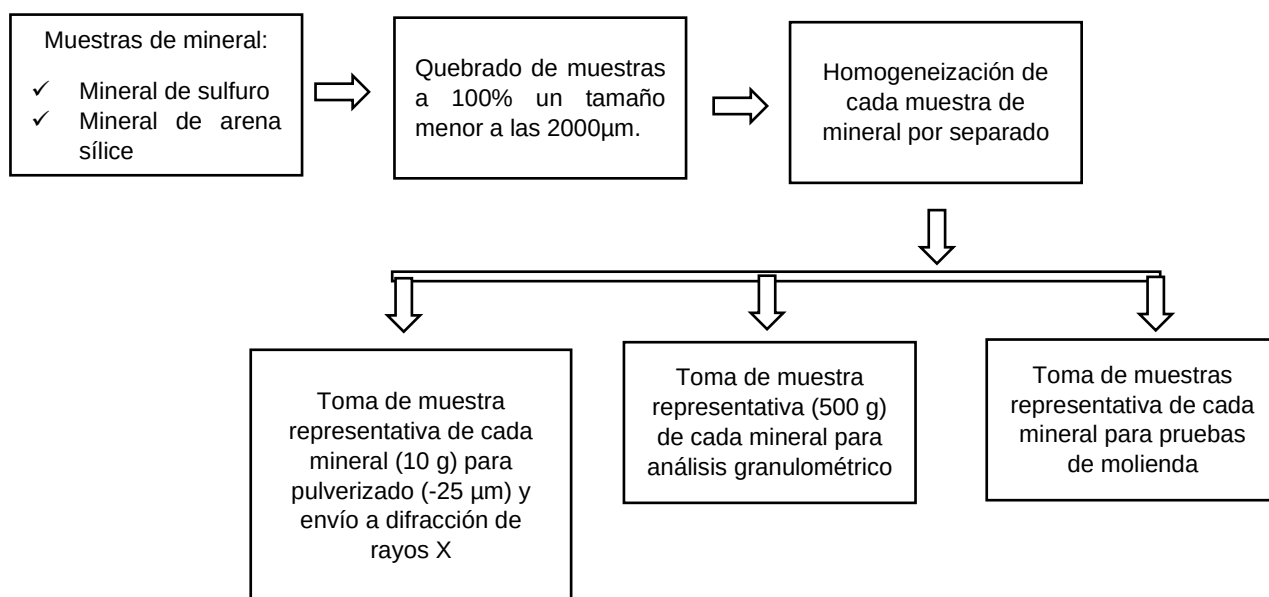


Ilustración 16 Diagrama de pruebas de caracterización de los minerales del presente estudio.

Conocer las propiedades físicas de las muestras de bola utilizadas como medio de molienda nos permite correlacionar su dureza y la resistencia al desgaste, de acuerdo con las fases presentes y su respuesta ante la dureza de dos muestras de mineral diferentes.

La ilustración 17, muestra el diagrama del esquema de pruebas realizadas para la caracterización la bola, se sometieron dos tipos de bolas (una obtenida por un proceso de forjado, mientras que la otra obtenida por fundición).

Se comenzó con una toma de limadura de las bolas para enviar a ensaye químico por espectroscopia de emisión óptica, el ensaye nos permitió identificar el tipo de aleación e identificar las fases presentes de acuerdo con la bibliografía reportada en aleaciones de Fe-C.

Se realizaron estudios metalográficos de las muestras, cortando en sección transversal, puliendo y atacando de acuerdo con la teoría para revelar las fases presentes en la aleación. Posteriormente se hicieron estudios por microscopia electrónica de barrido para encontrar las fases presentes del material y pruebas de dureza Rockwell C para obtener el valor para cada tipo de bola en estudio.

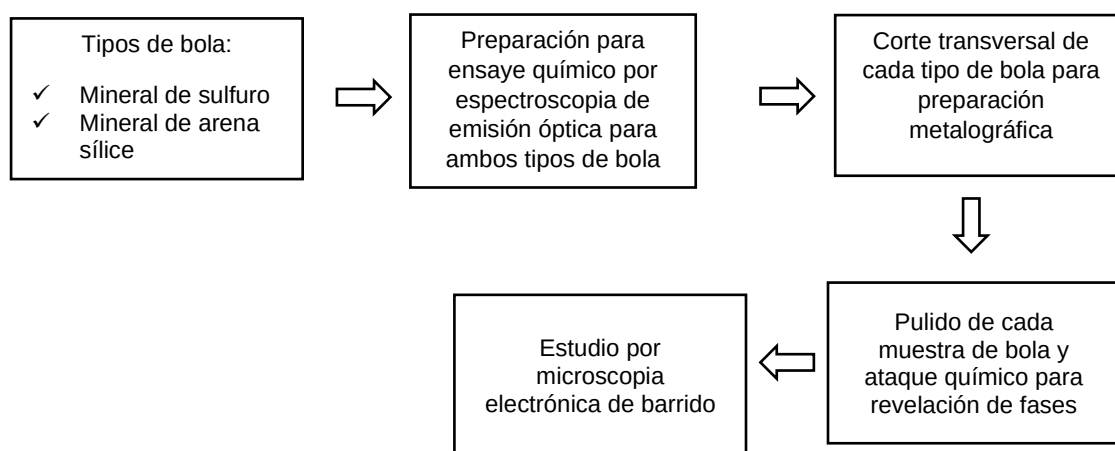


Ilustración 17. Diagrama de pruebas para caracterización de las bolas.

Se realizaron 4 pruebas para estudiar el desgaste de las bolas en función de las características del mineral. Las propuestas se definen en la tabla 2 y en la ilustración 18 se muestra el esquema de pruebas de molienda utilizadas para la determinación de desgaste de bola.

Tabla 2. Prueba de desgaste de bola.

Numero de Prueba	Tipo de mineral	Tipo de bola
Prueba 1	Sulfuro	Forjada
Prueba 2	Arena sílice	Forjada
Prueba 3	Arena sílice	Fundida
Prueba 4	Sulfuro	Fundida

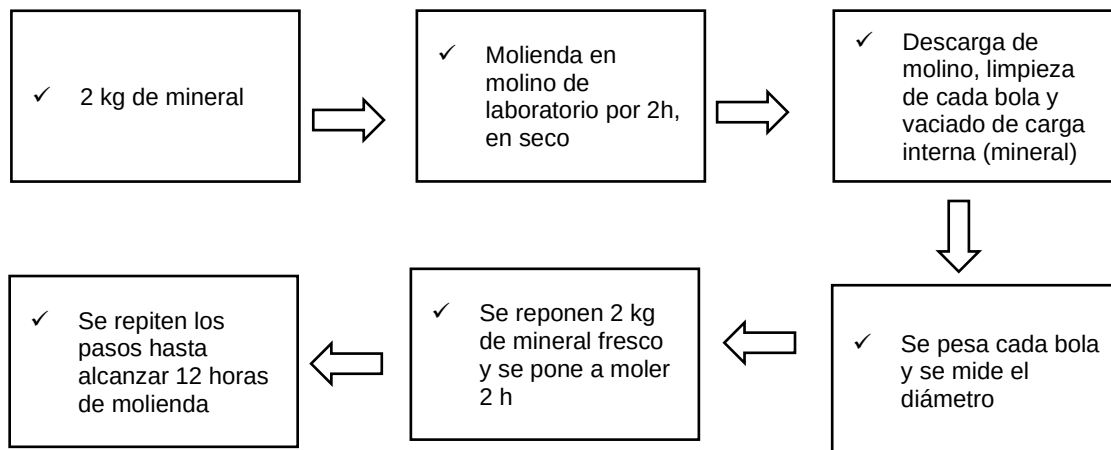


Ilustración 18. Esquema general de experimentación.

2.1 Caracterización de material

Se contó con 2 tipos de minerales de diferentes, un mineral sulfuroso y otro mineral de arena sílica. Inicialmente, al tener poco conocimiento del origen de la muestra, se realiza una caracterización por difracción de rayos X con la finalidad de obtener las especies minerales presentes. Estos minerales son elegidos debido a sus diferencias en cuanto a la característica de dureza y abrasión, para así analizar el efecto de la mineralogía en el desgaste de las aleaciones en estudio.

2.1.1. Estudio de difracción de rayos x.

La ilustración 19 muestra el espectro de difracción de rayos x. De acuerdo con el software utilizado para la identificación de especies de mineral para la muestra de mineral de sulfuros los picos obtenidos corresponden a especies de sulfuro de hierro como pirita, además de cuarzo, calcita, dolomita, yeso, muscovita y ortoclasea.

(J, Solans Huguet, 1978), encontraron que la dureza promedio de esta muestra se encuentra en 4.43, considerada baja en la escala de dureza de Mohs, recordando que comienza en 1 en el talco y termina en el de mayor dureza en 10 con el diamante. La tabla 3 muestra las durezas de los minerales reportados en la difracción de rayos x de la muestra de sulfuros.

Tabla 3. Dureza en minerales encontrados para muestra de sulfuros.

Mineral	Dureza en escala de Mohs
Pirita	6.75
Cuarzo	7
Calcita	3
Dolomita	3.75
Yeso	2
Muscovita	2.5
Ortoclase	6
Promedio	4.43

El espectro de difracción de la muestra de “arena silica” se muestra en la ilustración 19, mostrando picos característicos para cuarzo, microclina y albita.

Según la literatura y utilizando la dureza individual (tabla 4), la muestra reporta una dureza media de 6,5, considerada dureza media según la escala de Mohs. Por ello se espera que esta muestra tenga un efecto diferente respecto al desgaste y consumo del medio de molienda, respecto a la muestra de sulfuros que reporta una dureza menor.

Tabla 4. Dureza individual en minerales encontrados en muestra de arena sílice

Mineral	Dureza en escala de Mohs
Cuarzo	7
Microclina	6.5
Albita	6.5
Promedio	6.67

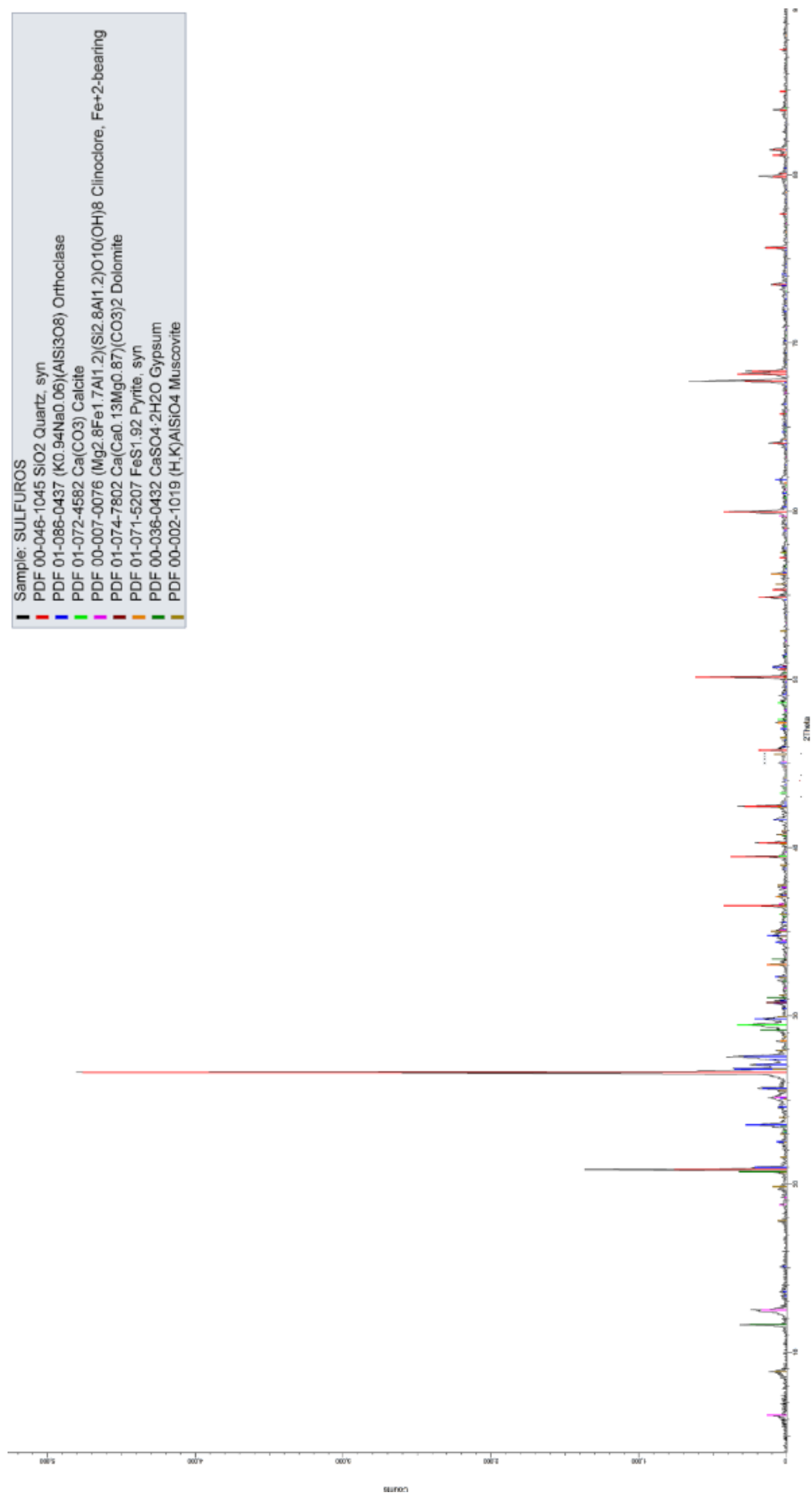


Ilustración 19. Espectro de difracción de muestra de sulfuros.

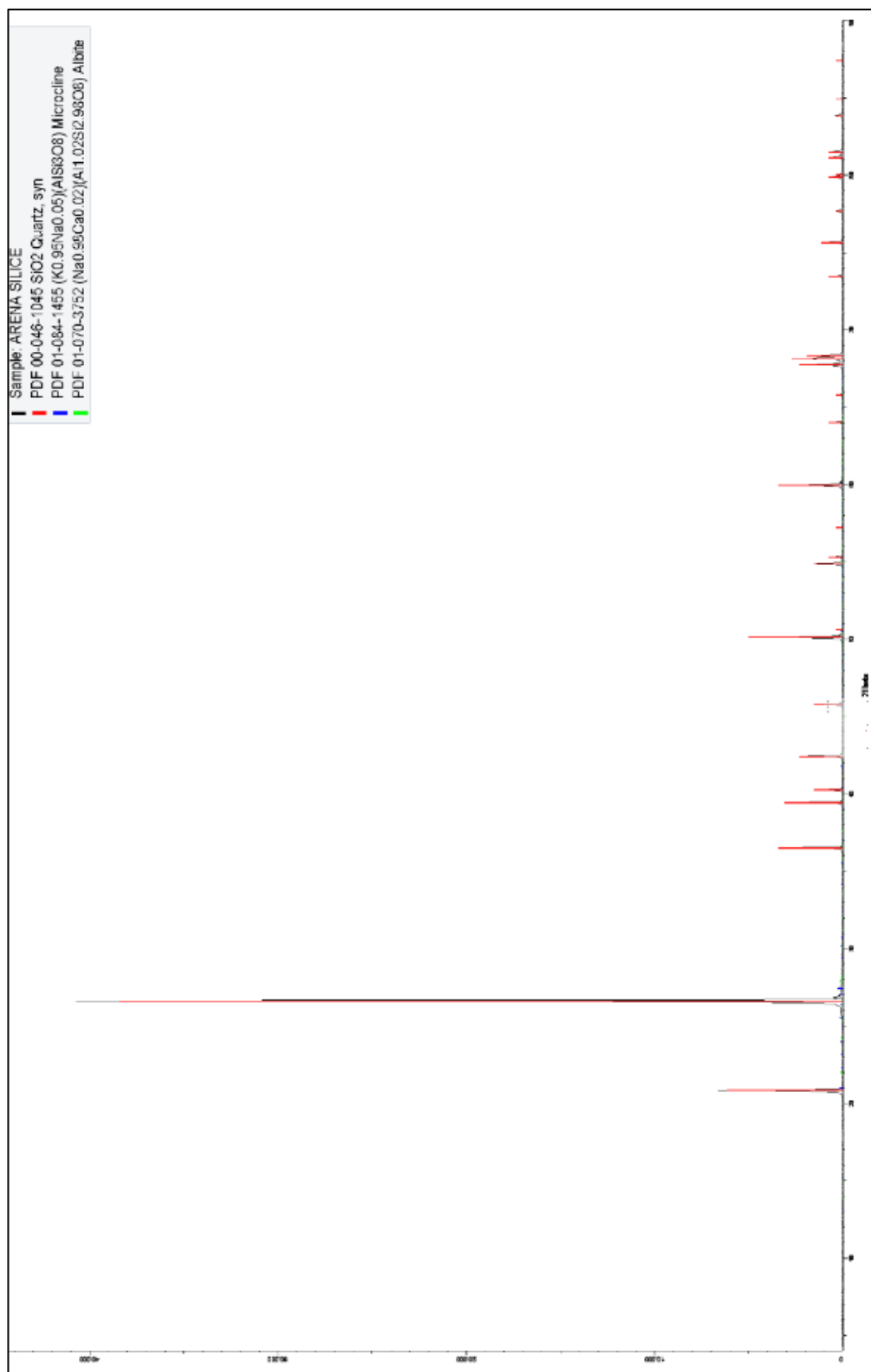


Ilustración 20. Espectro de difracción de muestra de arena silica

2.1.2 Análisis granulométrico.

Para las pruebas de molienda, ambas muestras se redujeron a un tamaño menor a las 10 mallas, debido a la diferencia en su composición mineralógica, se espera diferencia en el F_{80} , en la ilustración 21. muestra el gráfico de la distribución granulométrica para cada muestra de mineral, encontrando para el mineral sulfuro 1582.47 micras y para la muestra de arena sílice es de 778.93 micras. Los análisis granulométricos se muestran en el anexo 1.

Conocer la granulometría es importante debido a que granulometrías muy finas tienen impacto en la abrasión del mineral; la presencia de ultrafinos en las moliendas también tiene un impacto en el consumo, lo que podría generar datos erróneos.

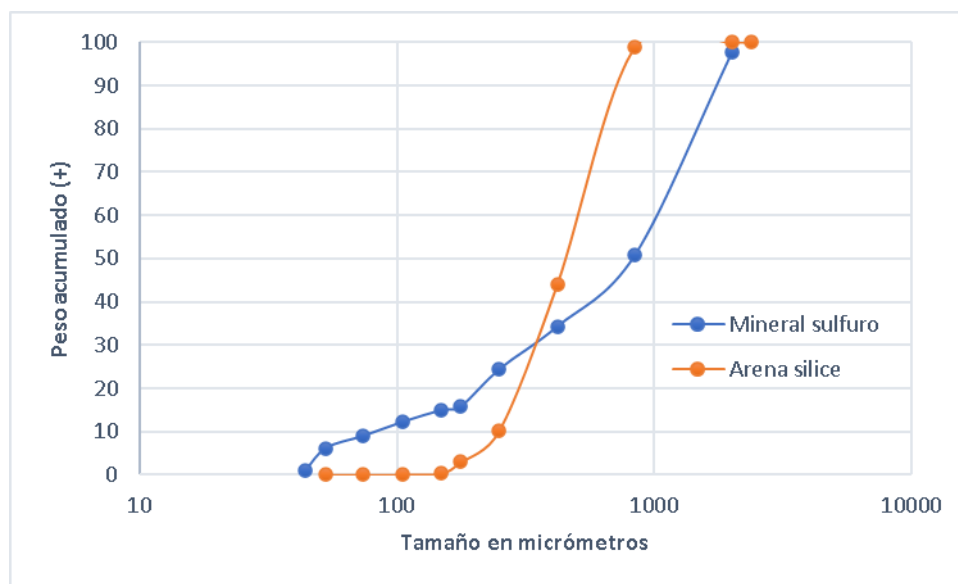


Ilustración 21. Análisis granulométrico de muestras de experimentación.

2.2 Caracterización de las bolas.

2.2.1 Composición química de bolas.

La composición química de los dos tipos de bolas (forjada y fundida) se muestra en la tabla 5. Para su determinación se tomó una muestra de rebaba que fue atacada y analizada vía húmeda y leída en un equipo de absorción atómica.

Recordemos que un hierro se diferencia de un acero por su composición química. Si bien, tanto el acero como el hierro son aleaciones Fe-C, el contenido de carbono y silicio definen la diferencia. Una fundición típica de hierro contiene de 2-4% C y altas concentraciones de Si, así como muchas otras impurezas. Gracias al análisis químico, podemos confirmar que la muestra fundida, corresponde a un acero aleado que se obtiene de colada ya que contiene 1.76% de C. Teniendo para la muestra de forjada una composición con menor porcentaje de carbono, siendo de 0.805%.

Tabla 5. Composición química de las bolas utilizadas

Bola	Elementos (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Fundida	1.76	1.6	0.55	0.015	0.0067	12.25	0.0971	0.0147
Forjada	0.805	0.292	0.745	0.0126	0.0046	0.366	0.0134	0.0024

2.2.2 Pruebas de dureza Rockwell C.

Las pruebas de dureza fueron realizadas en un durómetro VHT-260, para determinar la dureza en escala Rockwell C, la tabla 6 muestra los resultados en ambas muestras. Es necesario recalcar que la referencia de dureza mostrada por los autores mencionados no considera otros elementos de aleación lo que puede afectar los valores de dureza. La muestra de bola fundida tiene un 1.76% de C, la dureza se debería encontrar entre 48.9 a 43 de dureza en escala rockwell C, de acuerdo con la experimentación, se encuentra en 61.3, ligeramente con mayor dureza respecto a la forjada, típica de este tipo de aleaciones.

Tabla 6. Dureza de un acero en función de su porcentaje de carbono,

%C	0.09	0.19	0.3	0.56	0.76	0.96	1.13	1.35	1.6	1.17	1.79	1.84	1.91
Dureza Rockwell C	33.8	42.7	56.6	61.6	64.5	65.6	64	58.7	51.4	48.9	43.2	35	30.8

El dato de la dureza es de relevancia en la investigación, para analizar si se puede generar una correlación del valor respecto al consumo de la bola; debido a que las durezas reportadas son tan parecidas, el efecto del consumo de bola podría entonces enfocarse al efecto de otros elementos de aleación presentes en cada tipo de bola, y su relación a las fases presentes de acuerdo con el tratamiento térmico de formación que influyan en su resistencia al desgaste; adicional el efecto de la mineralogía es de importancia en función de la aleación; es decir, si se tiene una dureza parecida, que efecto tiene la mayor abrasión de un tipo de mineral respecto al otro.

Tabla 7. Dureza Rockwell C de muestras

Fundida	61.3
Forjada	60.6

2.2.3 Análisis metalográfico de medios de molienda.

Bola fundida

En la ilustración 22 se muestra la micrografía de la bola fundida a un aumento de 200x. Se observa un patrón de colada típico, que recibió un tratamiento térmico lo que generó algunas contracciones normales debido al proceso de fabricación. Este tipo de grietas podría generar rompimiento del material bajo ciertas condiciones.

Si bien, el material fue clasificado como bola fundida en un inicio, un término correcto es una bola colada, recordando que su porcentaje de cromo no supera el 2% para ser clasificado como fundición. Este material tiene un alto contenido de cromo con la finalidad de mejorar su resistencia.

Este tipo de material esta aleado al cromo para minimizar la formación de grafito y obtener carburos y así incrementar la dureza. Adiciones de níquel permiten retrasar la reacción perlitica para asegurar la existencia de martensita. Generalmente sólo se requieren pequeñas cantidades de otros elementos de aleación para mejorar la dureza y la resistencia mecánica (Mendiguri, 2017).

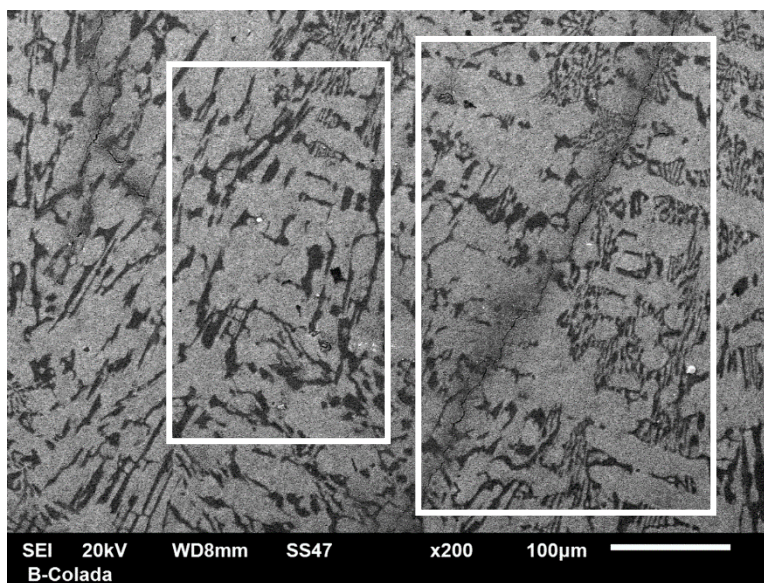


Ilustración 22. Micrografía a 200x de bola fundida, obtenida por microscopía electrónica de barrido, UASLP.

Bola forjada

La bola forjada es un acero aleado, sin embargo, la micrografía presente en la ilustración 23 muestra una matriz de martensita revenida, además se observan algunos precipitados negros, las cuales son inclusiones provocadas por S y P, sin embargo, al no tener un porcentaje mayor al 0.04% no genera un efecto en su desempeño mecánico.

En esta muestra no se aprecian defectos como grietas que podrían afectar el desempeño de la bola en la molienda, por lo que se podría esperar un mejor comportamiento en cuanto a la respuesta al desgaste.

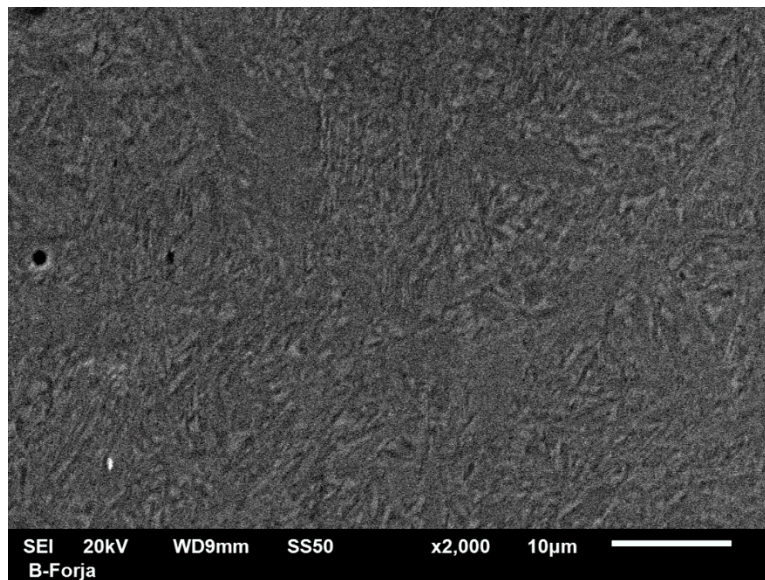


Ilustración 23. Micrografía de bola forjada a 2000x, por microscopía electrónica de barrido, UASLP.

2.3 Pruebas de molienda.

Se realizaron moliendas en seco en un molino de laboratorio de 20 cm x 26 cm (revestimiento interno liso sin levantadores) ubicado dentro del laboratorio de procesamiento de minerales, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (Ilustración 24).



Ilustración 24. Molino de bolas utilizado en experimentación.

El volumen de llenado de bola se ajustó al 35% del volumen total del llenado utilizando un mono tamaño de 1 pulgada de diámetro (en total se utilizaron 180 bolas de acero). En esta etapa fue necesario tomar el peso y el diámetro inicial de cada una las bolas alimentadas en el molino (los datos se encuentran en el anexo 2). Dicha información fue utilizada para tomar el punto inicial de las pruebas como promedio de medición del diámetro y el total del peso de la carga de bola (Tabla 8).

Tabla 8. Información inicial de carga de bola.

Tipo de bola	Peso carga inicial (g)	Promedio del diámetro (in)
Forjada	13093.1	1.03
Fundida	12430.3	1.022

Para llevar a cabo la medición del desgaste se hicieron pruebas de 12 horas totales, entre las cuales cada 2 horas se muestreaba la carga de bola y de mineral; las bolas se retiran del molino y se limpian para después ser pesadas y medidas por individual registrando los datos en cada intervalo.

En cuanto a la carga de mineral es cribada por la malla 200 elegida referencia y la cantidad de carga que se retira es repuesta por mineral fresco para evitar la generación de exceso de finos que pueden afectar el comportamiento del consumo de bola.

En cuestiones de carga alimentada, la literatura reporta (Natarjan, 1996) pruebas con una sola carga de mineral, es decir, el mismo mineral que se alimenta al molino será el que terminará la prueba sin importar la granulometría final después de la molienda, lo que representa un problema debido a que la generación de finos después de un periodo de tiempo influyendo en el desgaste de medio de molienda.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE PRUEBAS DE DESGASTE DE BOLA.

En esta sección se hace una descripción de los resultados alcanzados al interpretar la teoría del volumen y la teoría lineal a partir de los datos experimentales obtenidos en el capítulo anterior. Así mismo, se hace una comparación de las teorías y los consumos reales obtenidos en el laboratorio y se correlacionan las diferencias de los comportamientos analizados en función de las combinaciones de mineral-bola.

3.1. Prueba 1: mineral sulfuro con bola forjada.

Los datos recolectados de la prueba de desgaste para la primera variable, (combinando la bola forjada con el mineral de sulfuros) se muestra en la Tabla 9 que incluye los tiempos de muestreo en horas, peso de la bola a cada tiempo de muestreo, la cantidad de mineral molido en g y la masa perdida del total de la carga de bola en cada muestreo (g). Es notorio como en las primeras 6 horas el desgaste es relativamente considerable perdiendo 4 g del acero por cada dos horas; después de este tiempo el desgaste disminuye a volviendo a tener un pico de consumo a las 6 y 10 horas.

Tabla 9. Datos experimentales de prueba 1, mineral sulfuro con bola forjada.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)
0	13093.10	0.00	0
2	13064.60	2000.00	4.80
4	13060.80	2000.00	3.80
6	13051.90	2000.00	8.90
8	13047.80	2000.00	4.10
10	13039.90	2000.00	7.90
12	13034.90	2000.00	5.00

Utilizando como base para el cálculo de la predicción del consumo de bola la ecuación 10 (correspondiente a la teoría del volumen descrito en la sección 2.4.4), es posible calcular el constante τ la cual nos permitirá predecir el consumo de bola forjada al moler mineral de sulfuro. Dicha constante se obtiene linealizando la ecuación y adecuándola a la forma de ecuación de pendiente. Para ello se utilizan los datos experimentales y se grafica la cantidad de mineral molido contra el ln de la masa de la bola a T cantidad de mineral molido.

En la ilustración 25 se muestra el valor de la pendiente siendo de -3×10^{-7} y un valor de $R^2 = 0.8874$ (siendo aceptable). Sustituyendo los datos, el valor de τ es de -3086143.5 g. este valor será de utilidad para utilizar la ecuación de la teoría del volumen en la predicción del consumo de bola.

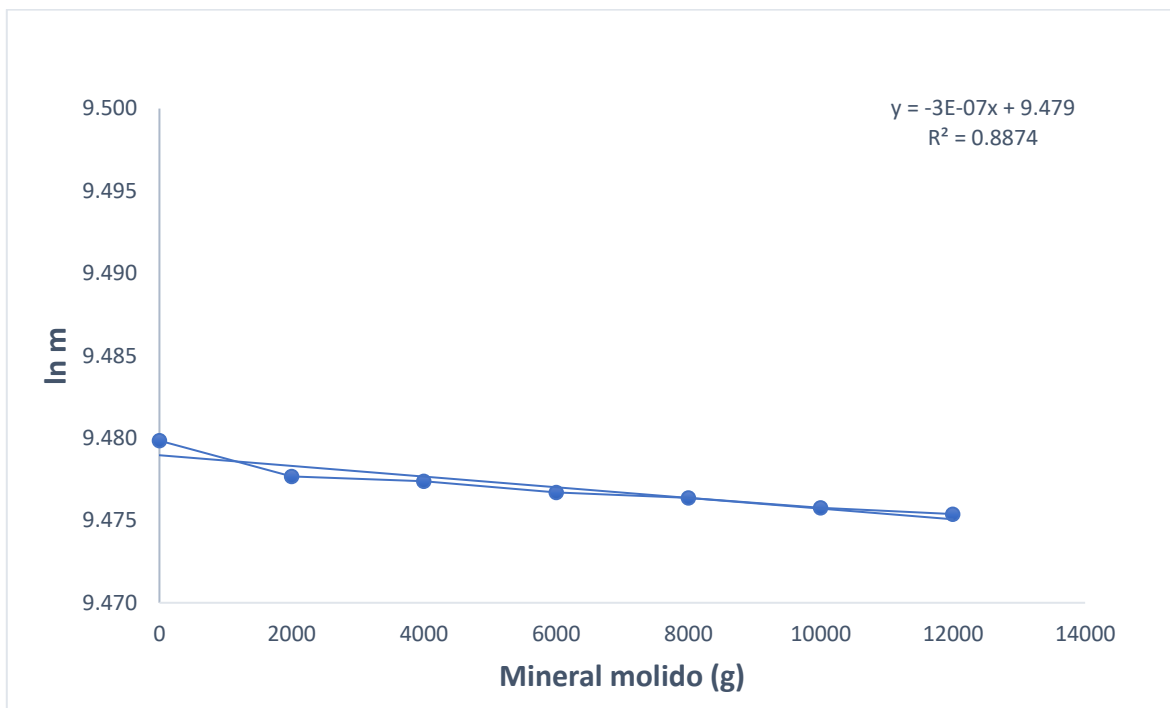


Ilustración 25. Gráfico para teoría de volumen, mineral sulfuro con bola forjada.

Utilizando el valor obtenido de τ la masa inicial de la bola se calcula en 13093.1 g contra el real de 13093.10 g, siendo una excelente predicción.

Para la predicción del desgaste respecto a la teoría lineal se utiliza la ecuación (13). En esta teoría se busca el valor de la constante "b" para predecir el consumo de bola, siendo necesario los valores del mineral molido acumulado y la raíz cubica de la bola a T cantidad de mineral molido.

De acuerdo con el gráfico de la ilustración 26, los datos de pendiente para la teoría lineal se encuentran en -3×10^{-6} , y una R^2 de 0.8872. Utilizando el valor de la pendiente en la ecuación 14, podemos obtener el valor de la constante b, siendo de 7.63×10^{-6} . Sustituyendo el valor de b, nos da un valor para el peso inicial de 13084.6g variando ahora con una disminución de 8.5 g respecto al peso real.

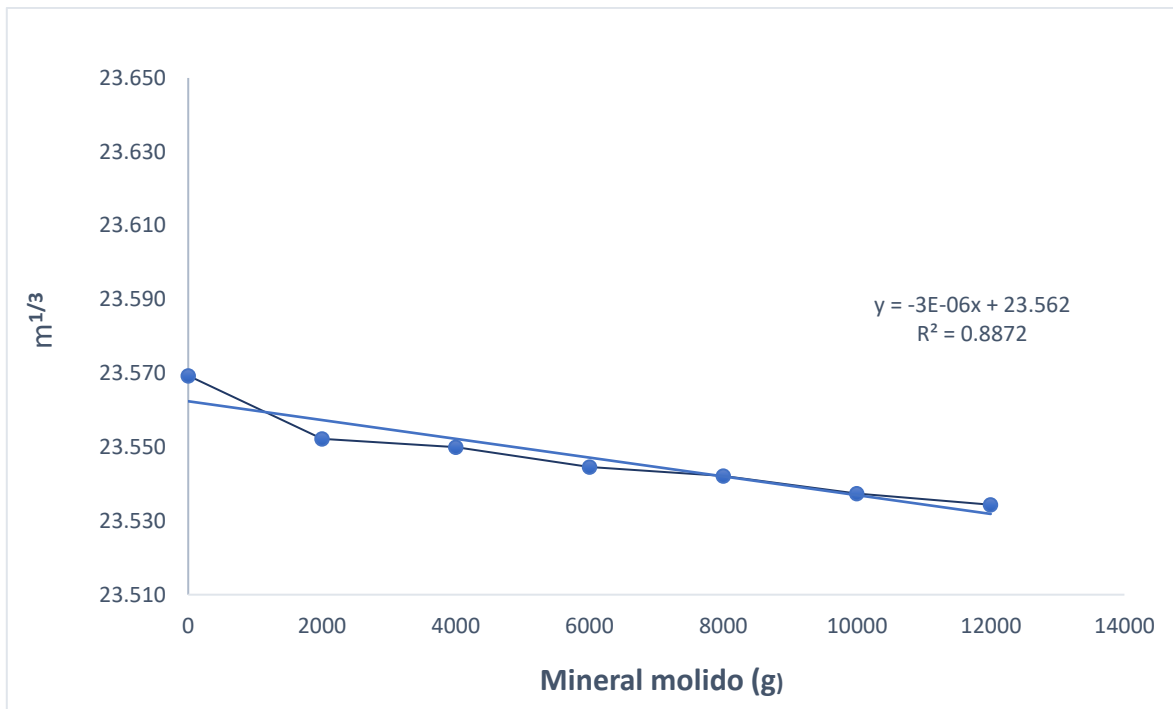


Ilustración 26. Gráfico para teoría de superficie, mineral sulfuro con bola fundida.

Utilizando los constantes τ para la teoría del volumen y b para la teoría lineal, se calcula la predicción del peso de las bolas a T cantidad de mineral molido para compararlas con los valores reales. En la ilustración 27, se muestra el comparativo para la prueba de sulfuros-bola fundida. Se puede observar que, tanto la teoría lineal como la del volumen tienen una tendencia similar al experimental, indicando buen ajuste de ambas (existe poca variación de la predicción del peso de bola experimental).

A excepción de los datos experimentales a las 2 y 4 horas, que con anterioridad se habían notado con los mayores consumos, los rangos de error se observan aceptables. Gráficamente se observa como caen dentro de la tolerancia de error de la predicción respecto a la experimental.

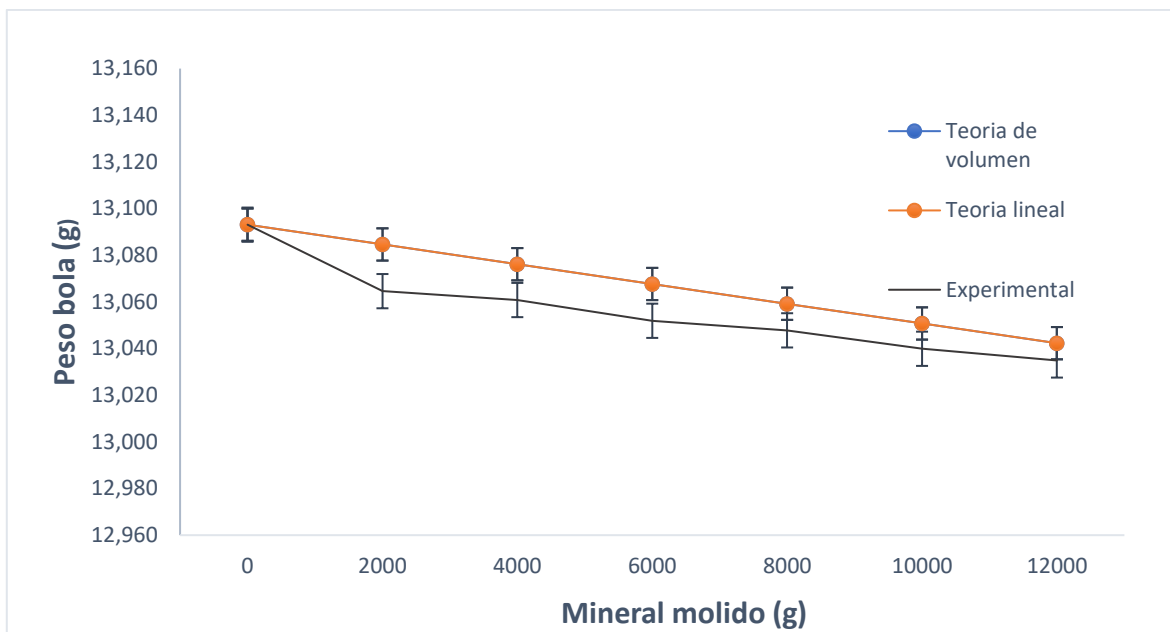


Ilustración 27. Gráfico de mineral molido vs. predicción de peso de bola. Teoría lineal y de volumen para prueba con mineral sulfuro y bola fundida.

Utilizando los datos experimentales, se calcula el consumo en kilogramo de bola consumido para moler una tonelada de mineral. En la ilustración 28 se observa que la teoría lineal y de volumen coinciden en la predicción y tienen una tendencia lineal. Mientras el consumo real es alto al iniciar la prueba, alcanzando estabilidad después de las 6 horas cuando un valor de 0.008 toneladas de mineral se ha molido. Esto último implicaría que a las 8 horas de prueba se comienza a tener un mejor ajuste en las predicciones respecto al consumo real. Este comportamiento también es observado a nivel industrial, donde son necesarios varios meses de monitoreo para poder alcanzar la estabilización del consumo de bola. (Vermeulen, Howat y Mough, 1983).

Ambas teorías tienen una diferencia mayor respecto al consumo real, sin embargo, la tendencia se encuentra cercana, lo que brinda una mayor correlación al utilizar las teorías de predicción.

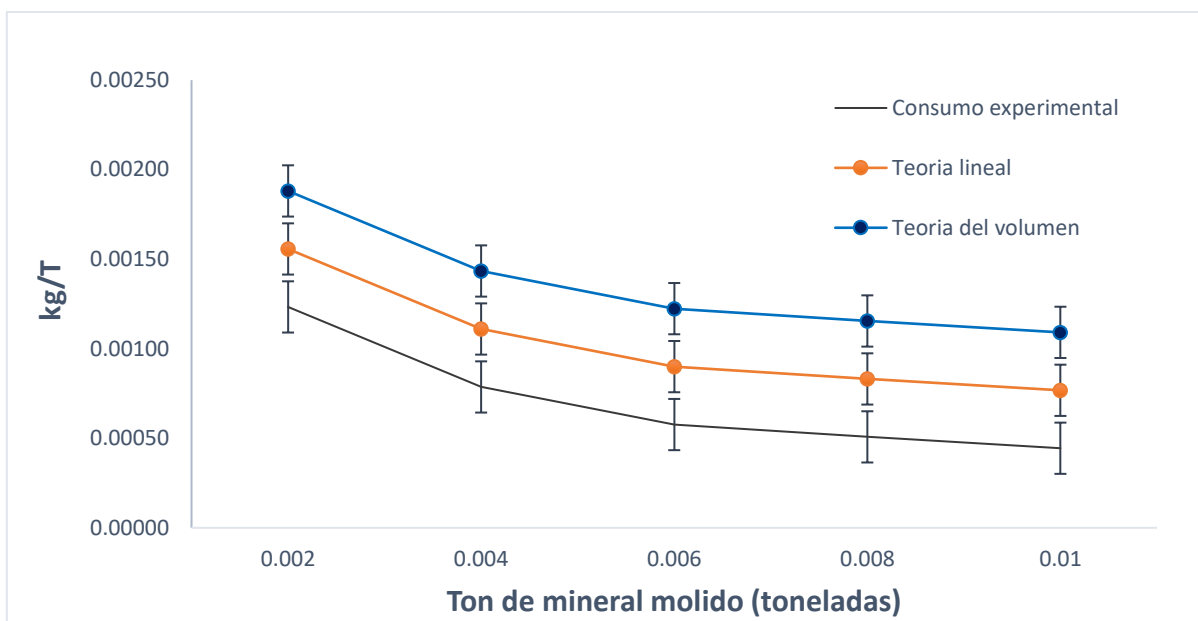


Ilustración 19. Consumo de bola en kg por tonelada molida para prueba sulfuro con bola fundida.

3.2. Prueba 2: mineral de arena sílice con bola forjada.

Los datos recolectados para la prueba de desgaste de bola forjada moliendo mineral de arena sílice se muestra en la tabla 10. Se puede observar que, a diferencia del mineral de sulfuros, el consumo de bola es menor teniendo un mínimo a las 12 horas después de 12 kg de mineral molido.

Tabla 10. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)
0	13034.90	0.00	0
2	13029.80	2000.00	5.10
4	13023.90	2000.00	5.90
6	13017.20	2000.00	6.70
8	13011.90	2000.00	5.30
10	13004.00	2000.00	7.90
12	13001.10	2000.00	2.90

Aplicando los datos experimentales obtenidos en las ecuaciones para la teoría del volumen (ilustración 29) se obtiene una pendiente de -2.7×10^{-07} y un coeficiente R^2 de 0.9945 (sugiriendo buena correlación). Con el dato de la pendiente, la constante K_m es calculada en un valor de -4.42 y contrastando un peso inicial de la bola de

12,982.86 g contra el real de 13,034.9 g (variando 52.03 g menos), teniendo mayor variación respecto a los valores reales en comparación al experimento 1 al moler un mineral sulfuro. Si bien la aleación es la misma de la bola, esto podría ser un efecto de la mayor dureza de la arena sílice contra el mineral sulfuro.

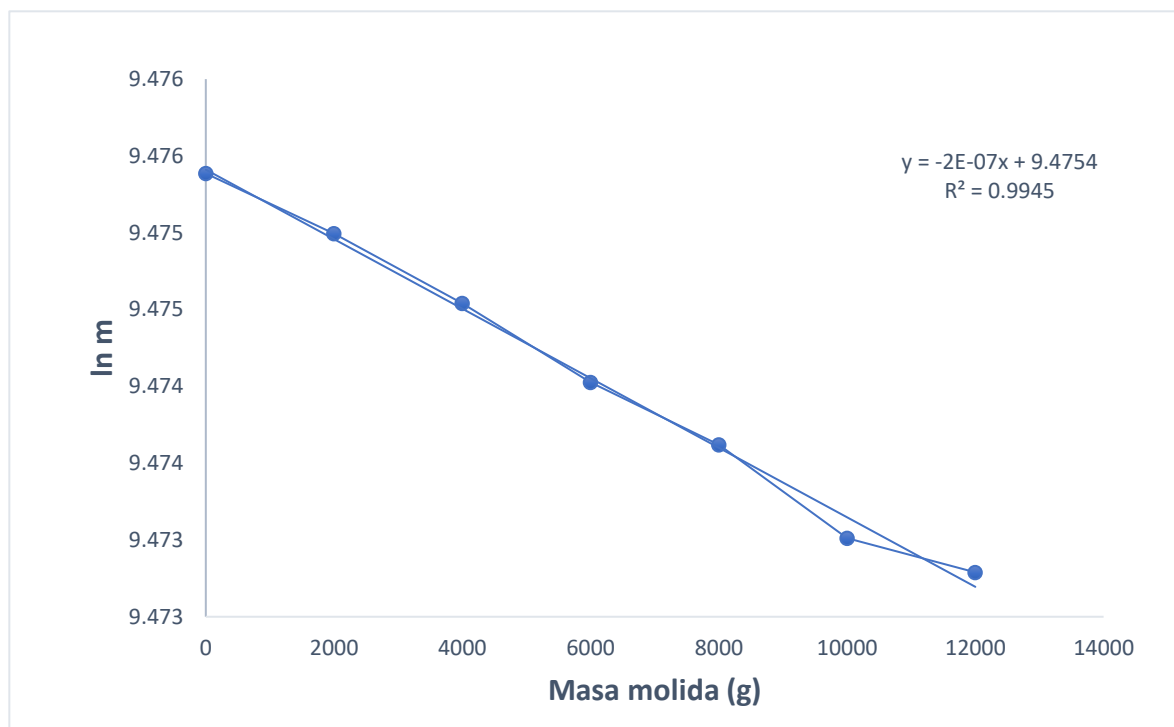


Ilustración 2920. Gráfico de teoría de volumen para mineral arena sílice con bola forjada

Con los datos experimentales y utilizando las ecuaciones de la teoría lineal se obtiene la ilustración 30, donde la constante b tiene un valor de 9.0010^{-7} y la pendiente se encuentra en -2.0×10^{-6} con un valor de R^2 de 0.9945 (siendo un mejor coeficiente de correlación respecto a los datos obtenidos al moler mineral de sulfuro).

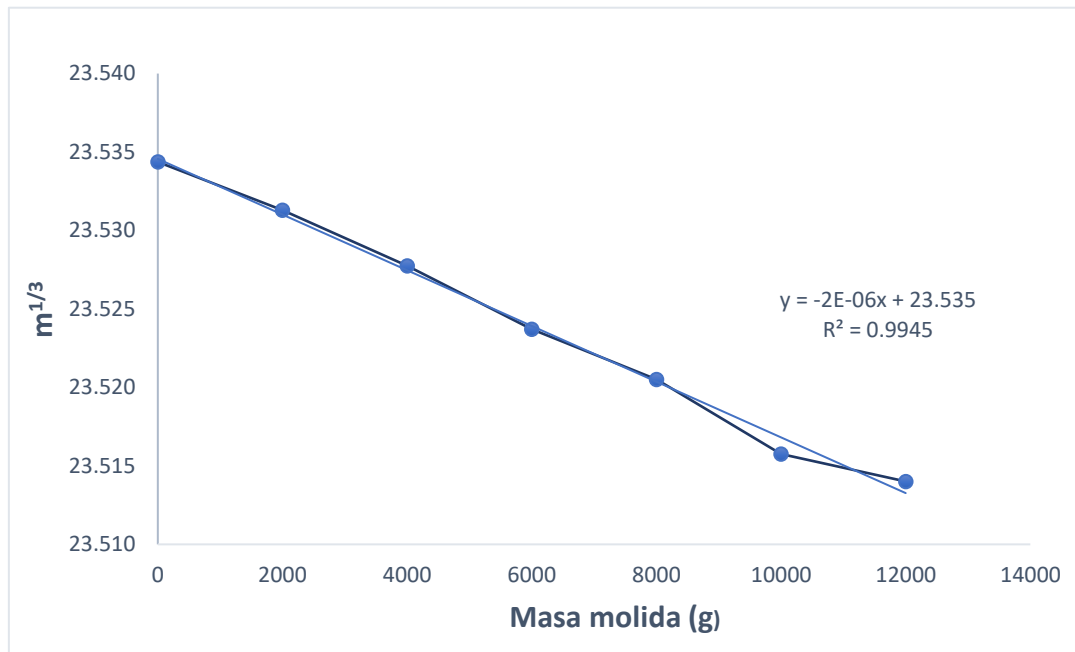


Ilustración 21. Gráfico para teoría de volumen, mineral sulfuro con bola forjada

Con los datos obtenidos y aplicando las constantes para la teoría del volumen y lineal, se obtienen los pesos del medio de molienda a T cantidad de mineral molido. La ilustración 31 muestra la comparación y, es posible observar que, para la prueba con mineral de sílice y bola forjada ambas teorías generan una buena correlación.

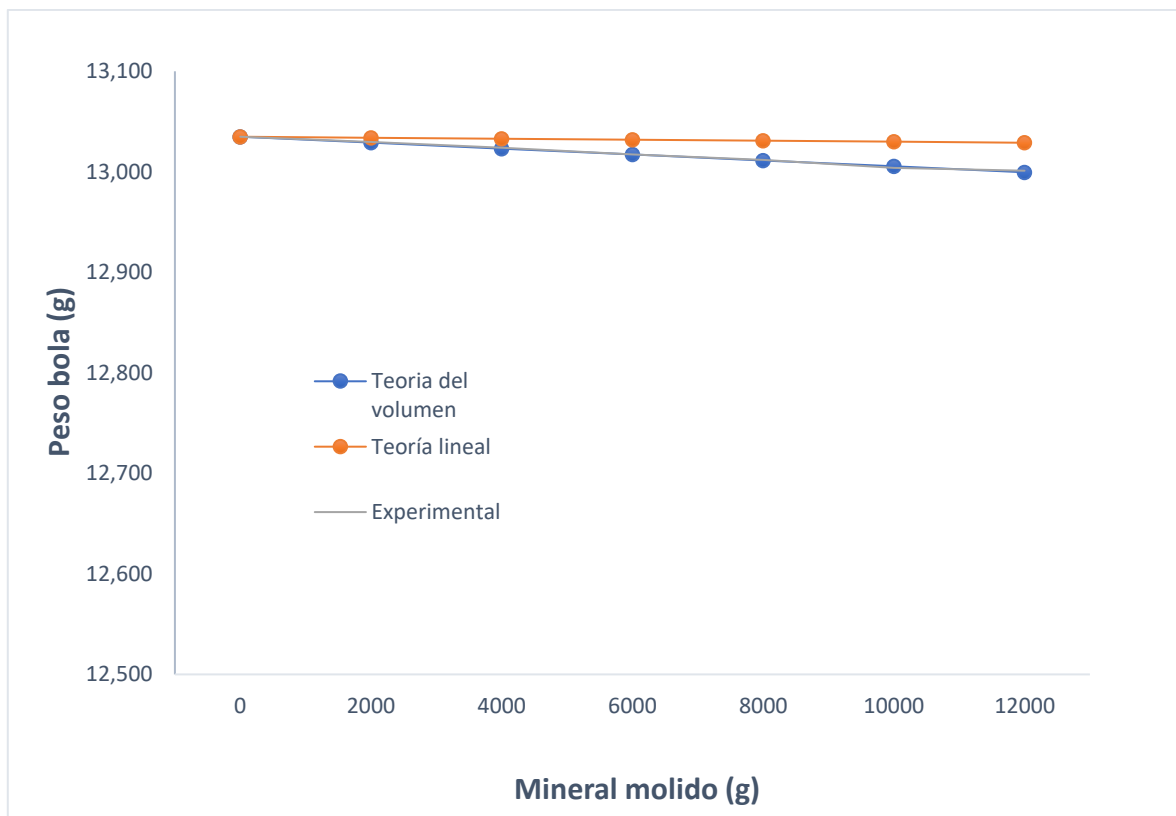


Ilustración 31. Gráfico de mineral molido vs predicción de peso de bola por teoría lineal y de volumen para prueba de arena sílice con bola forjada.

La ilustración 32 muestra el consumo de bola en kilogramo de bola por tonelada de mineral molido para la prueba con bola forjada y arena sílice. Para este caso, la teoría lineal tiene un excelente ajuste al consumo real mientras que la predicción de la teoría del volumen está muy alejada. Recordando que la teoría lineal se basa en que considera un cambio igual en todas las etapas, es decir, considera el mismo tamaño de bola a cualquier tiempo y a cualquier cantidad de toneladas molidas (T).

Este efecto podría deberse a la dureza del mineral (de acuerdo con la escala de Mohs). La variación en la predicción del peso en la teoría lineal no supera una diferencia de 30 g, mientras que para la teoría del volumen la variación puede ser de hasta 200 g, reflejando esta diferencia en la predicción del consumo.

Otra razón de la variación del consumo puede ser afectado por el tamaño de alimentación del mineral, recordando que se encuentra en un P_{80} de 778.93 micras. De acuerdo con Chandrasekaran y Kishore (1993), el tamaño de alimentación puede afectar el desgaste, siendo mayor en moliendas con alimentaciones finas, lo que promueve el desgaste abrasivo.

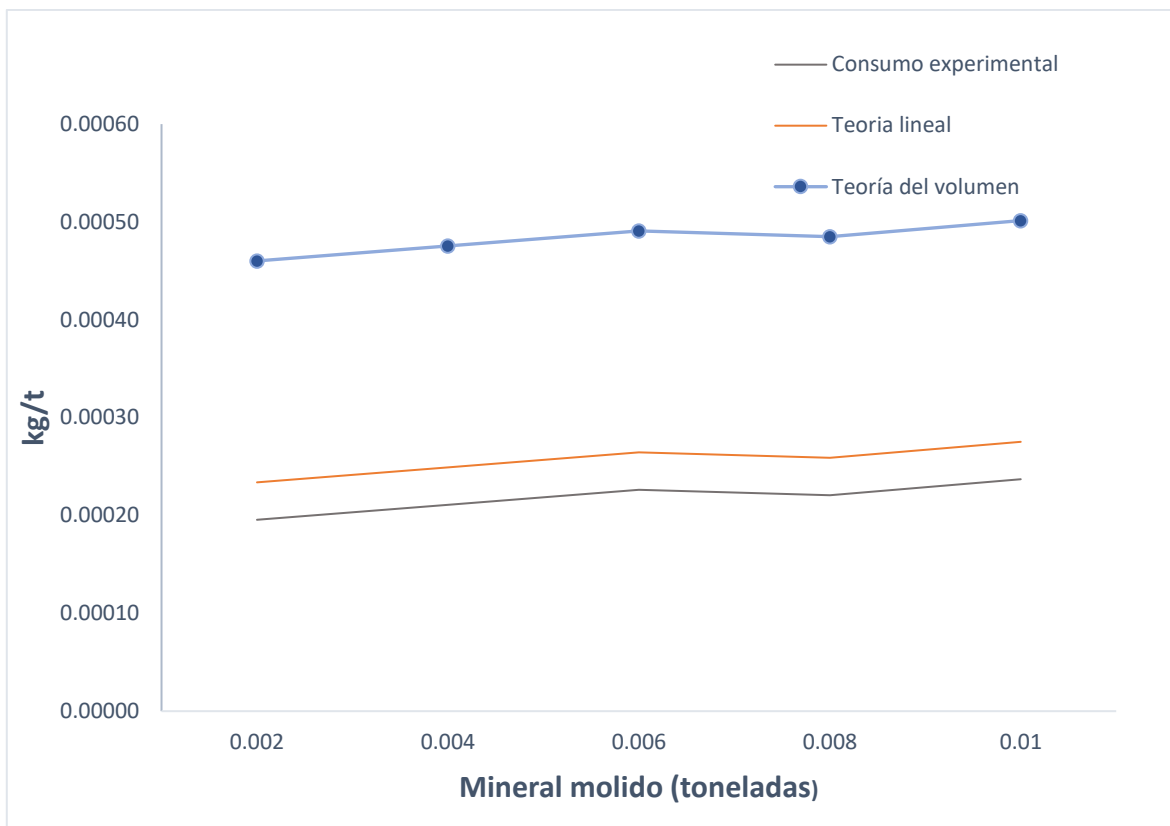


Ilustración 222. Consumo de bola en kg por tonelada molida para prueba de mineral de arena sílice con bola forjada

3.3. Prueba 3: mineral de arena sílice con bola fundida.

Los datos recolectados para la prueba de desgaste de bola fundida y moliendo mineral de arena sílice se muestra en la Tabla 11. Los datos muestran una disminución de 16.3 g a las 6 horas de molienda. El valor inicial experimental del peso de las bolas se encuentra en 12430.3 g.

Tabla 11. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílica y bola fundida.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)
0	12430.30	0.00	0
2	12424.60	2000.00	5.70
4	12419.20	2000.00	5.40
6	12414.00	2000.00	5.20
8	12408.60	2000.00	5.40
10	12404.20	2000.00	4.40
12	12399.00	2000.00	5.20

Aplicando la teoría del volumen, con los datos obtenidos por el gráfico de la ilustración 33 el valor de la pendiente se encuentra en -2×10^{-7} y un valor de $R^2 = 0.999$ (muy cercano a 1). El valor de k_m es de -4784673.9 y la predicción del peso inicial se encuentra de 12430 g contra 12430.3 g (variando 0.3 g y muy buena correlación)

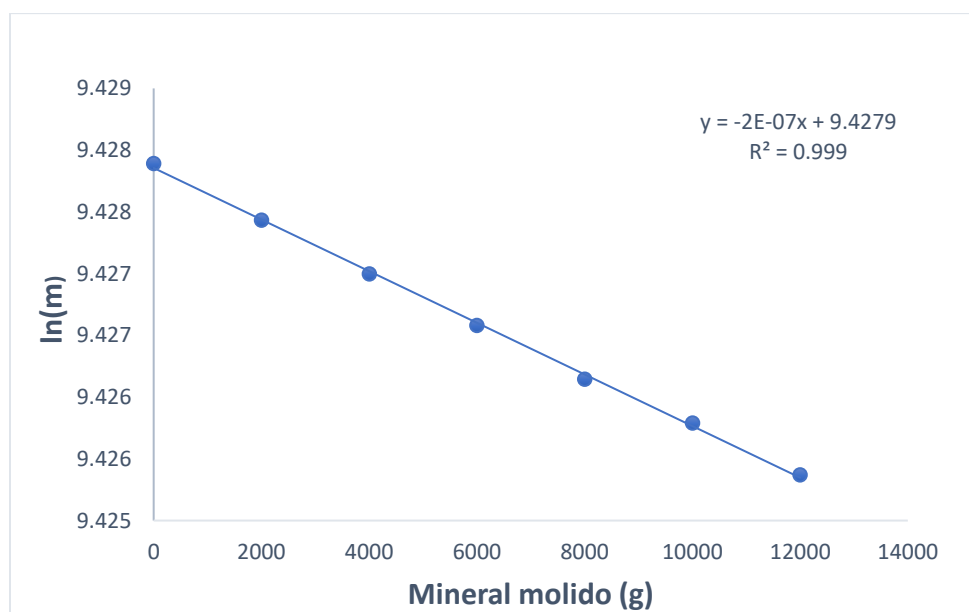


Ilustración 233. Gráfico de teoría de volumen para prueba con arena sílice y bola fundida

De acuerdo con el gráfico de la ilustración 34, los datos de la pendiente obtenida para la teoría del lineal se encuentran en -2×10^{-6} , y una R^2 de 0.999. Para este caso, la constante b tiene un valor de 4.83×10^{-6} , calculando un peso inicial de 12425.1g variando 5.19 g respecto al peso real de 12430.3 (contando con buen ajuste también para esta teoría).

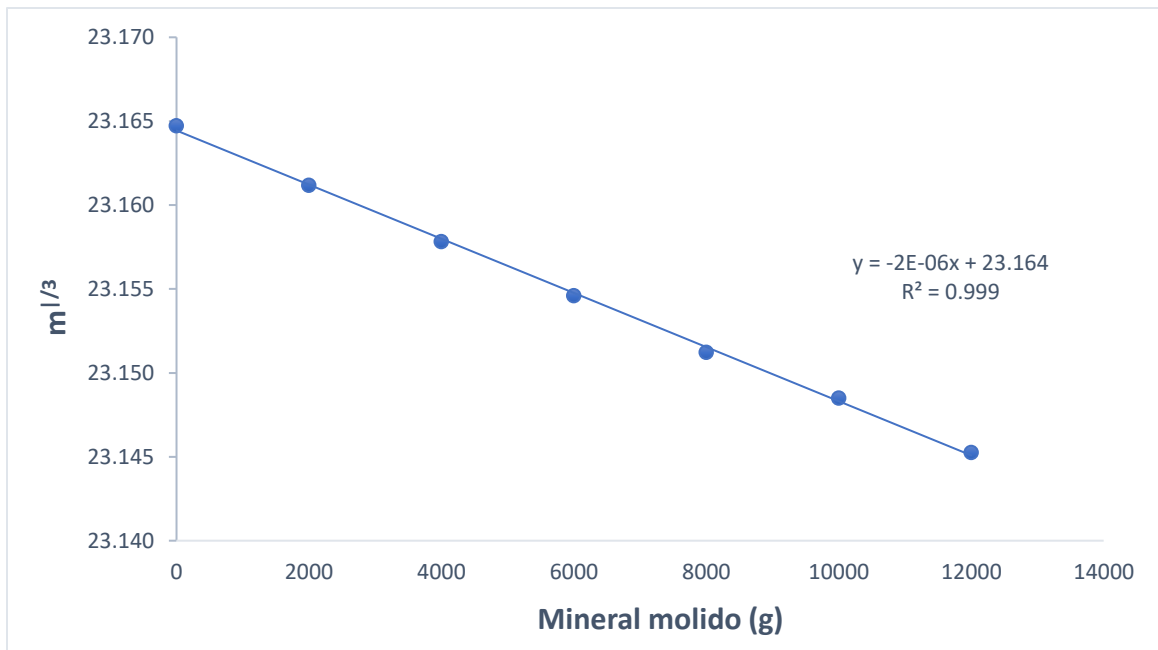


Ilustración 34. Gráfico de teoría lineal para mineral de arena sílice con bola fundida.

Para esta prueba se puede observar que ambas teorías tienen buen ajuste a la predicción del consumo de bola; siendo su predicción igual y mostrándose traslapada la línea de la teoría del volumen. Su cálculo se observa como un consumo menor al experimental, obteniendo valores en los pesos de bola menores respecto al real (Ilustración 35).

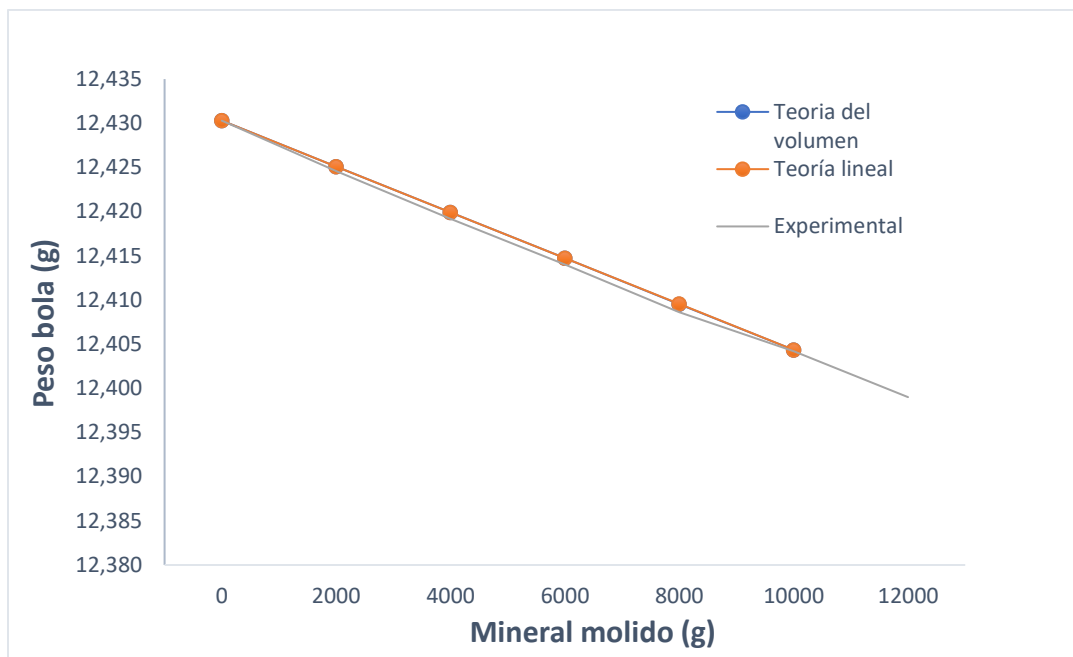


Ilustración 35. Gráfico de mineral molido vs pérdida de peso de bola por teoría lineal y de volumen para prueba con arena sílice y bola fundida

El gráfico mostrado en la ilustración 36, tiene el comparativo del consumo real en kg/ton respecto al calculado por la teoría lineal y de volumen, ambas teorías coinciden en la predicción, teniendo una tendencia lineal. La poca variación puede atribuirse a la estabilidad de la prueba, mostrando sólo un pico de consumo al 0.008 kg/ton, coincidiendo los consumos al finalizar la prueba.

Se considera más cercana la teoría del volumen, sin embargo, su consumo se muestra menor a los datos experimentales; comparando con la prueba de bola forjada.

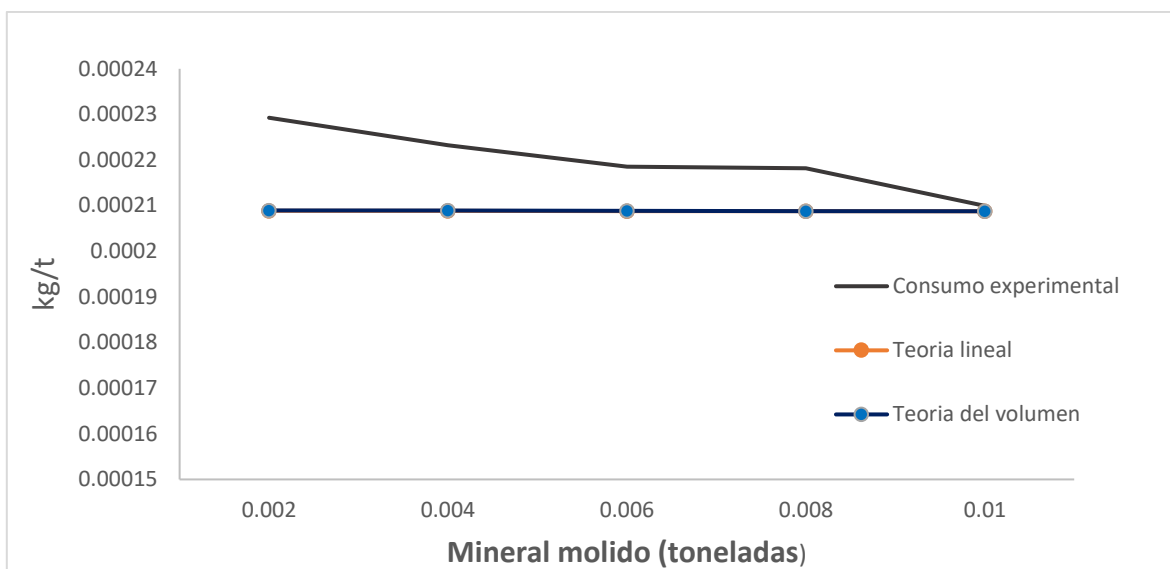


Ilustración 36. Consumo de bola en kg de bola por tonelada molida. Prueba de mineral arena sílice con bola fundida.

3.4. Prueba 4: mineral sulfuro con bola fundida.

Para la prueba de desgaste de bola de alto cromo moliendo mineral de sulfuro, se muestra en la Tabla 12. Los datos muestran una disminución de 6 g a las 6 horas de molienda, lo cual son 10 gramos abajo respecto a la prueba con arena sílice indicando un menor desgaste, confirmando la teoría de que materiales con mayor finura pueden tener un mayor efecto en el desgaste. El valor inicial real del peso de las bolas se encuentra en 12399 g.

Tabla 12. Datos experimentales de prueba con mineral de sulfuro y fundida.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)
0	12,399.00	0.00	0
2	12397.10	2,000.00	1.90
4	12394.40	2000.00	2.70
6	12392.60	2000.00	1.80
8	12390.30	2000.00	2.30
10	12387.30	2000.00	3.00
12	12385.60	2000.00	1.70

A partir del uso de la teoría del volumen se grafica el valor del logaritmo natural de la masa de la bola, contra el peso molido. La pendiente se encuentra en -2×10^{-7} y un valor de $R^2 = 0.9967$. Sustituyendo los datos obtenidos el valor de k_m es de $-10,860,206.7$ g. La predicción del peso inicial se encuentra en 12,399 g ajustando perfectamente respecto al valor experimental.

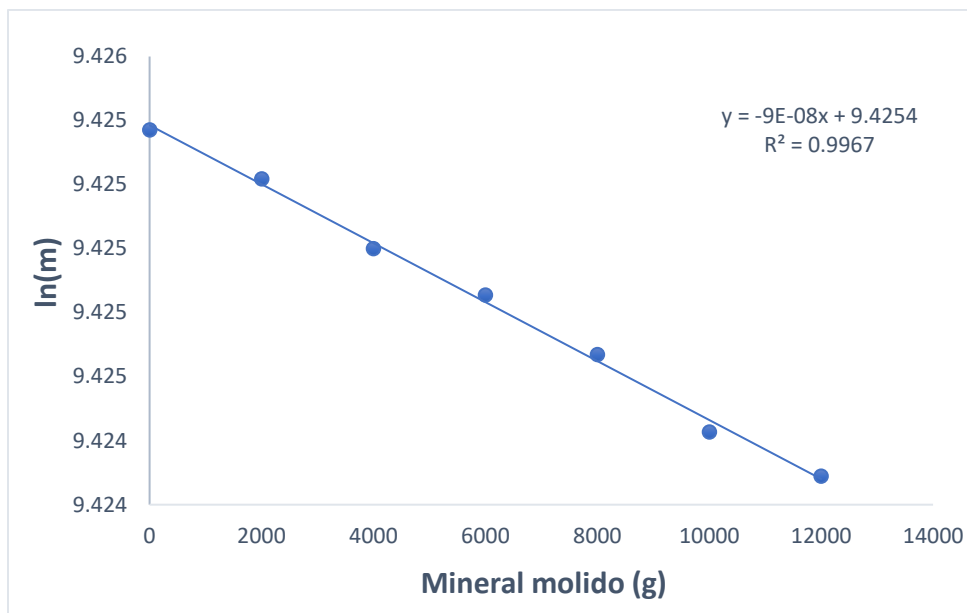


Ilustración 247. Gráfico de teoría de volumen prueba con mineral sulfuro y bola fundida

Aplicando la teoría lineal con los datos en la ilustración 38 se grafica el valor de la raíz cubica de la masa contra el peso molido acumulado. La pendiente corresponde a un valor de -7×10^{-7} y la constante b igual a 2.13×10^{-13} . El valor de R^2 para la correlación es de 0.9967. La predicción del peso inicial es de 12,396.72 g, variando 2.6 g respecto al peso experimental de 12,399 g. La diferencia del cálculo inicial del peso indica que podría ser la predicción, para esto es una buena correlación.

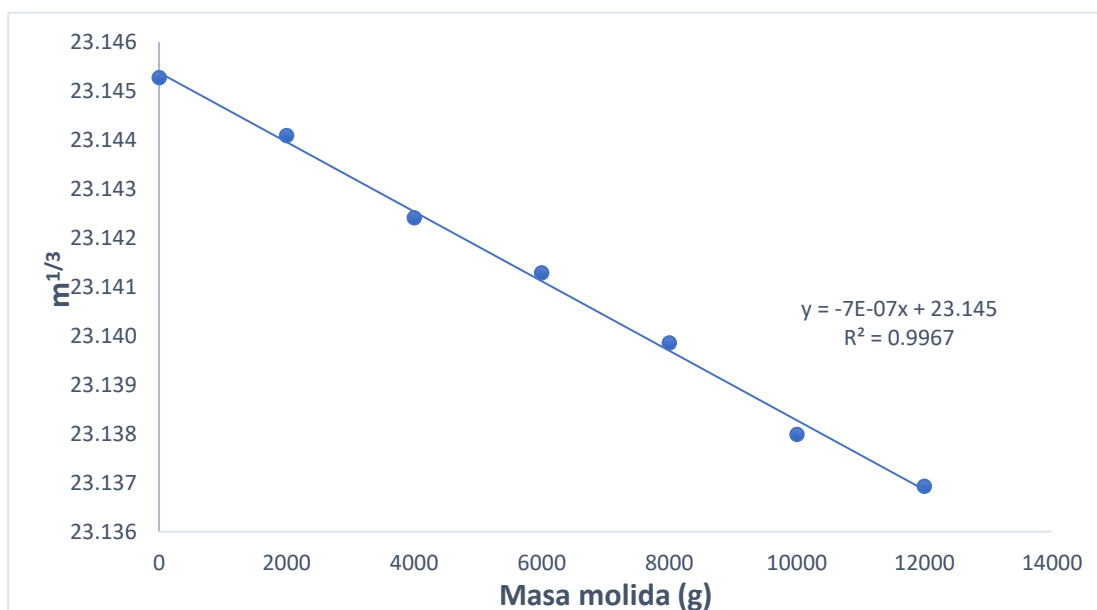


Ilustración 3825. Gráfico de teoría lineal para prueba con mineral sulfuro y bola fundida

La predicción realizada para la teoría del volumen y la teoría línea para la prueba 4 se muestra en la ilustración 39. Ambas teorías muestran una excelente predicción, sin embargo, se observa un mejor ajuste con la teoría de volumen. Este mismo comportamiento se observa aún con un mineral de mayor dureza y abrasión como la arena sílice, por lo que podría deberse al tipo de material, la bola fundida tiene una dureza similar a la de la bola forjada. Considerando la matriz encontramos la microestructura típica de una aleación de vaciado se encuentra algunas zonas con martensita lo que ayuda a incrementar su dureza; adicional se sabe que es una aleación de alto cromo lo que la hace resistente al desgaste aún bajo condiciones agresivas de molienda.

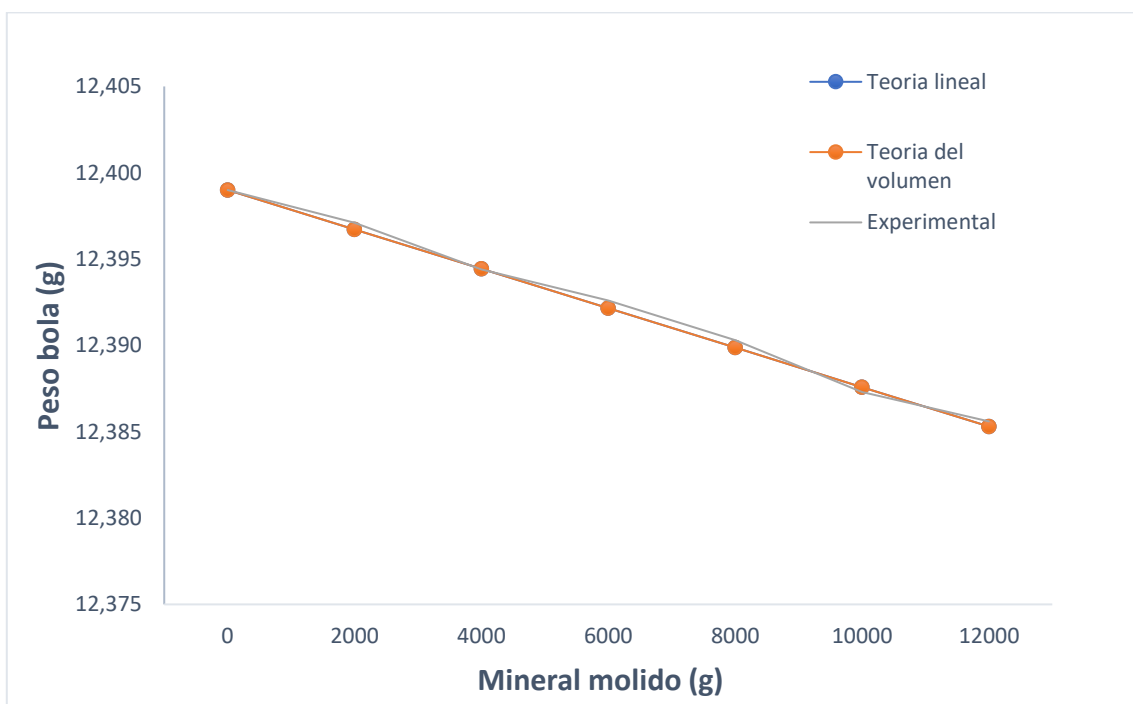


Ilustración 3926. Gráfico de mineral molido vs predicción de peso de la bola por teoría lineal y de volumen para prueba de mineral sulfuro con bola fundida.

En el gráfico mostrado en la ilustración 40 se muestra el consumo de bola en kg/ton, el consumo predicho por las teorías tiene una tendencia lineal de aproximadamente 2.6×10^{-6} kg/ton, teniendo sólo ajustes a la predicción al inicio y final de la prueba.

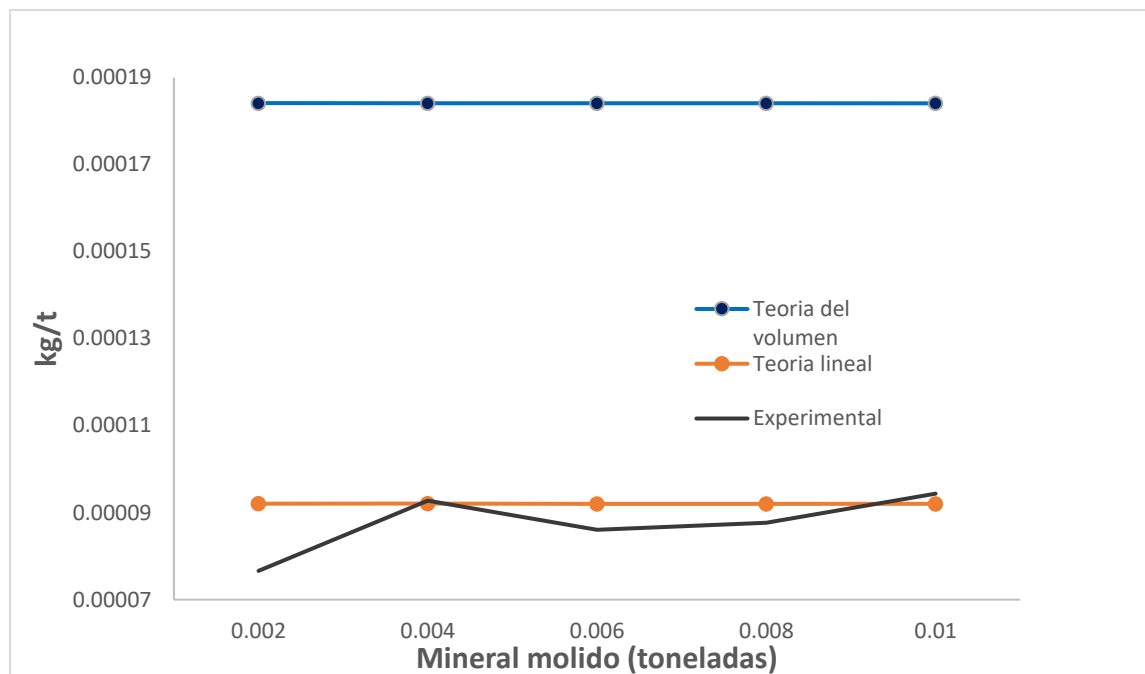


Ilustración 4027. Consumo de bola en kg de bola por tonelada molida para prueba de mineral sulfuro con bola sulfuro con bola fundida

3.5 Discusión general de resultados comparativos obtenidos de las pruebas de molienda desarrolladas

Para entender mejor el efecto de la aleación y el mineral, se hace un análisis individual de la pérdida de masa bajo las condiciones experimentales por lo que en esta sección se realiza un análisis comparando los diferentes casos.

La tabla 13 muestra la comparativa de la pérdida de peso acumulada en cada experimento, es evidente que la pérdida con bola forjada es muy similar bajo cualquier tipo de mineralogía.

Tabla 13. Comparativa de perdida de pesos reales en cada experimento.

Tiempo (h)	Mineral sulfuro con bola forjada	Mineral de arena sílice con bola forjada	Mineral de arena sílice con bola fundida	Mineral sulfuro con bola fundida
2	4.8	5.1	5.7	1.9
4	8.6	11	11.1	4.6
6	17.5	17.7	16.3	6.4
8	21.6	23	21.7	8.7
10	29.5	30.9	26.1	11.7
12	34.5	33.8	31.3	13.4

La ilustración 41 muestra gráficamente los datos de la tabla 12, se observa un consumo de bola similar para la molienda de arena sílica con ambos tipos de bola (bola forjada y fundida). Físicamente el material de arena sílica se observabó sin segregación de tamaños lo que podría estar generando efectos de abrasión más que de impacto, recordando que tiene u P_{80} de 1536 micras, pudo haberse generado un efecto mayor de abrasión. Correlacionando con las microestructuras encontradas para la bola forjada con martensita fase característica por alta dureza, y la bola fundida obtenida de una colada de una aleación de alto cromo que contiene carburos y parte de martensita por el tratamiento térmico que recibió; puede decirse que tienen un comportamiento similar, teniendo una pérdida de masa con variaciones no mayores a los 2 g.

La importancia de tener como referencia que estos tipos de material pueden tener el mismo consumo de masa, es debido a que no en todos los procesos se pueden utilizar materiales con ciertas características en cuanto a composición química.

Se sabe por ejemplo que las minas productoras de arena no pueden utilizar materiales que puedan aportar Cr aún en cantidades pequeñas en la molienda,

debido a que afecta la calidad de su producto, por lo cual, se suele utilizar bola forjada.

La fase de martensita y cabruros en la bola de colada tiene una mayor resistencia a la abrasión, sin embargo, gracias a la metalografía se observaron grietas que podrían afectar el rendimiento del material como medio de molienda. Para la experimentación a nivel laboratorio no hubo un efecto por estos defectos, sin embargo, a nivel industrial deben ser considerados.

Cabe mencionar que específicamente la prueba de bola fundida con mineral sulfuro muestra una tendencia a la estabilización, es decir que no se espera un consumo mayor al mostrado.

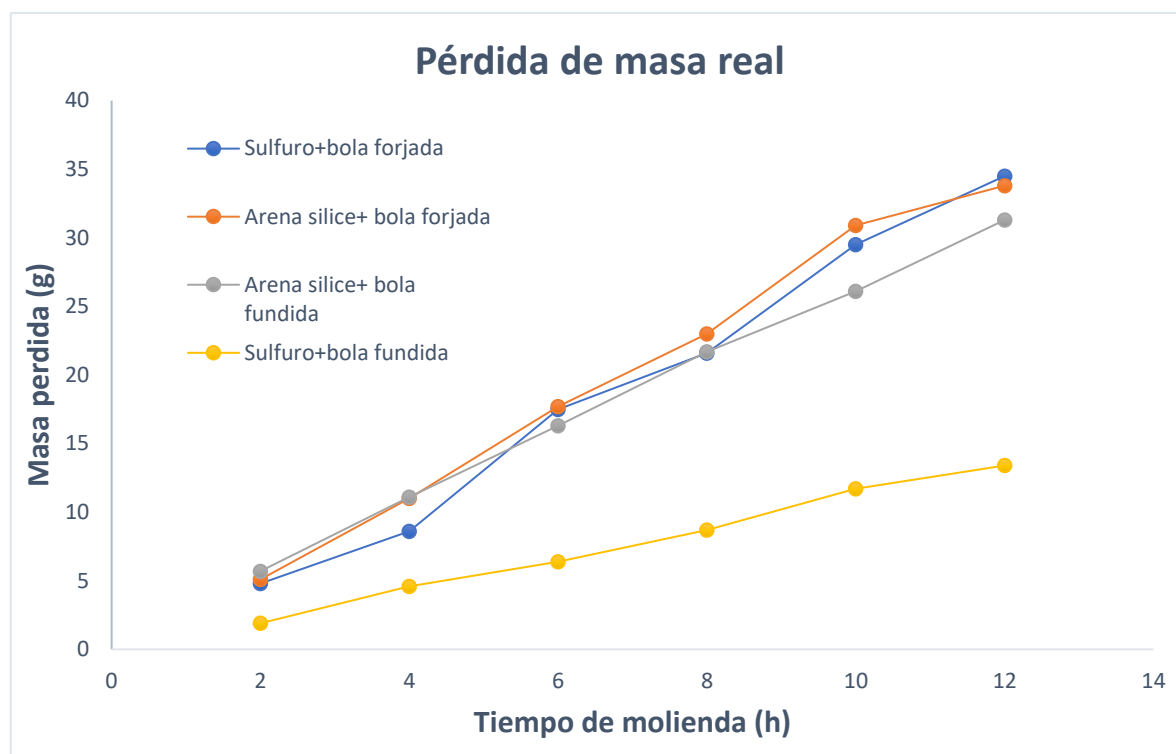


Ilustración 41. Comparativo de pérdida de masa experimental

En la ilustración 41 se muestra el cálculo en kg/t confirmando el comportamiento observado en el grafico anterior. Existe una tendencia a la estabilidad para la prueba de molienda de mineral sulfuro con bola fundida, el resto de las combinaciones, mineral sulfuro con bola forjada; mineral de arena con bola fundida; mineral de arena con bola forjada tienen comportamientos muy similares entre ellas y se observa que el consumo aumenta exponencialmente. Los datos se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Consumo de bola en kg/ton para cada experimento.

Consumo de bola (kg/ton)			
Mineral sulfuro con bola forjada	Mineral de arena sílice con bola forjada	Mineral de arena sílice con bola fundida	Mineral sulfuro con bola fundida
1.23E-03	1.96E-04	2.29E-04	7.66E-05
7.87E-04	2.11E-04	2.23E-04	9.27E-05
5.77E-04	2.26E-04	2.19E-04	8.60E-05
5.08E-04	2.21E-04	2.18E-04	8.77E-05
4.45E-04	2.37E-04	2.10E-04	9.44E-05

Para el mineral de arena sílice el consumo de bola es muy similar sin importar el tipo de aleación, promediando a nivel laboratorio 0.0002 kg/ton. A nivel planta el consumo registrado para una aleación de bola forjada se encuentra en 4.5 kg/ton de acuerdo con datos recopilados directamente de la planta donadora del mineral. La diferencia del consumo nos habla de que será necesario hacer un escalamiento del consumo encontrado a nivel laboratorio.

La diferencia de nivel laboratorio esta influenciada por diferentes factores. De acuerdo con algunos autores (Rabinowicz, 1996); características tales como el desgaste corrosivo que tienen diferentes metales, temperatura, este desgaste puede influir entre un 25-75% del consumo de bola, sin embargo, en este trabajo no fue considerado.

Un comportamiento relevante para la bola forjada al moler mineral sulfuro es que en el inicio de la molienda su consumo es mayor, logrando la estabilidad pasando las 4 horas de molienda y siendo la que tiene el más alto, rondando en 1×10^{-3} Kg/ton molido.

Con el análisis metalográfico y los resultados observados de consumo de masa, se puede entender que si bien, los materiales utilizados como medio de molienda son obtenidos de procesos diferentes, al tener en ambos matrices con martensita los hace a ambas excelentes alternativas para resistir el desgaste al que son sometidos en el proceso de molienda. La diferencia más notoria se encuentra en los defectos generados en la bola fundida obtenida por un proceso de colada, la cual a nivel industrial podría presentar problemas debido a las altas cargas de trabajo generadas dentro del molino.

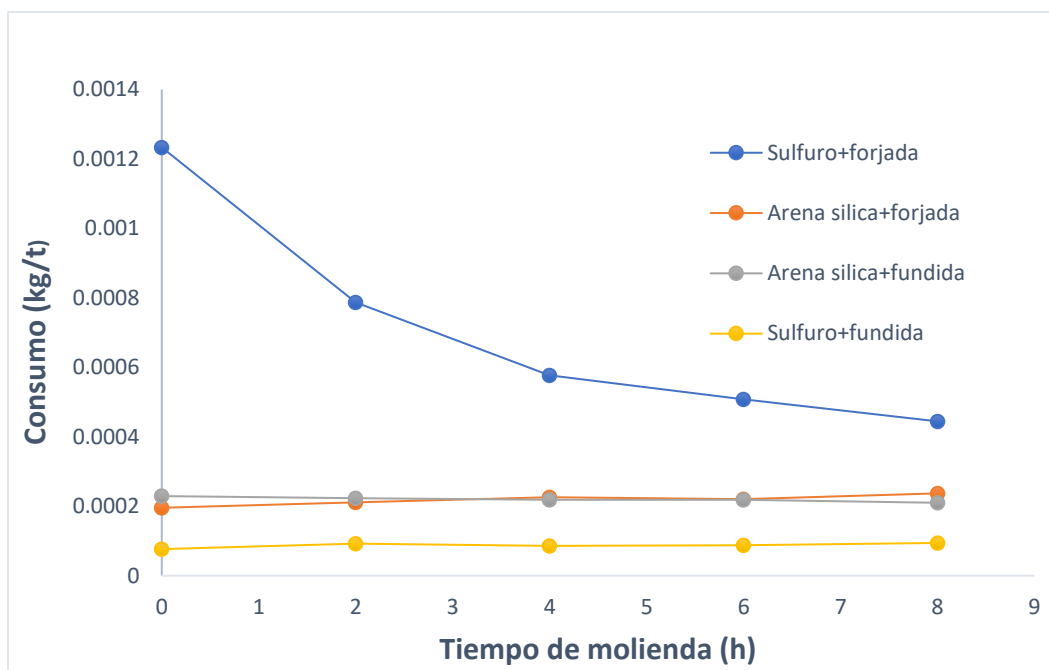


Ilustración 42. Consumo de bola en kg/t

De acuerdo con información recolectada por la autora de este trabajo, minerales con contenidos similares en cuanto a especies de pirita y cuarzo en mineras de la región del municipio de Charcas, S. L.P, cuentan con consumos de bola forjada de 3.5 kg/ton, el cuestionamiento entonces puede ser por qué al comparar el consumo de bola forjada al moler un sulfuro se tiene un consumo mayor respecto al de arena sílica a nivel laboratorio; la respuesta reincide en la composición mineralógica.

El mineral industrial de sulfuros que se menciona tiene otros minerales que aportan menor dureza como la presencia de especies tales como galena y calcopirita, que tienen una dureza en escala de Mohs de Mohs de 2.5 y 3 respectivamente, mientras que la muestra del presente trabajo tiene en su mayoría cuarzo y minerales de hierro promediando durezas cercanas a 4.5.

Es evidente que a nivel laboratorio el consumo es distinto al reportado por operaciones mineras ya que, factores como los levantadores y humedad no son considerados, sin embargo, es posible predecir el comportamiento de cierto tipo de aleación bajo una condición mineralógica específica como en el presente estudio.

CONCLUSIONES

- Se probaron teorías preestablecidas conocidas como teoría del volumen y teoría lineal para la predicción del consumo, encontrando que, ambas teorías tienen buen ajuste al consumo experimental a nivel laboratorio.
- El presente estudio puede generar la información necesaria para entender el posible comportamiento de una aleación en el proceso de molienda, y con ello elegir la aleación que pueda generar un menor consumo, lo que se traduce a un ahorro de costos operativos, recordando que probar una bola a nivel planta puede llevar de 3 a 6 meses.
- Los materiales utilizados como medio de molienda revelaron en la metalografía matrices con martensita lo que genera en ambas una alta resistencia al desgaste aún con mineralogías de diferente dureza y tamaño de alimentación.
- La bola fundida obtenida de un proceso de colada revela en su metalografía grietas en su matriz, lo que podría afectar su desempeño a nivel industrial.
- La importancia de conocer las propiedades mecánicas de 2 aleaciones obtenidas por procesos diferentes y de composiciones diferentes recae en el aspecto que algunos procesos minero-metalúrgicos debido a especificaciones de sus productos no pueden utilizar cierto tipo de material. Encontrar alternativas viables para ellos es de relevancia.

BIBLIOGRAFIA

A. Mular, D. Halbe, D. Barrat, Mineral processing plan design, practice and control proceedings. Volume 2, 2002, pag 710.

Abdelhaffez G.S. (2018), "Estimation of the wear rate associated whit ball mil of mahd ad dahab gold mine Saudi Arabia, University of Assiut, Assiut Egypt, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia. Páginas (4-9)

Aldrich C. (2013), "Consumption of steel grinding media in mills – A review", Department of Metallurgical and Minerals Engineering, Western Australian School of Mines, Curtin University, Perth, WA, Australia. Paginas (3-15).

Aldrich, Chris. (2013). Consumption of steel grinding media in mills – A review. Minerals Engineering, (49), 77-91.

Bush, Victor. (2013). Integrated sustainable energy management in mining operations. Mining engineering, Sustainable En

Chenje T. W. Simb D. J, Navara E. (2003), "Wear performance and costo effectiveness a criterion for the selection of griding media for wet milling in mineral processing operations". McGill University, Montreal, Canada, Departamento fmetallurgical engineering, University of Zimbabwe. Paginas (1-4)

Chenje T.W., Simbi D. J., Navara E. (2003), "The role of corrosive wear during laboratory milling," McGill University, Montreal Canada, Departamento f metallurgy, University of Zimbabwe. Paginas (3-6).

Chenje T.W., Simni D.J., Navara E,(2003), "The role of corrosive wear during laboratory milling", Departamen of mechanial Engineering, McGill University, Montreal Canada. Departamento f Metallurgy, University of Zimbabwe, Zimbabwe, Rubin-Material Teknik, Lulea, Sweden.

Crushing & grinding calculations, Fred C. Bond, British Chemical Engineering, 1963

D.W. Fuerstenau, A.-Z.M Abouzeid scale up of lifters in ball mil. International Journal of Mineral Processing, Volumen 15, Issue 3, October 1985, pages 183-192

Gates, J.D., Dargusch, M.S., Walsh, J.J., Field, S.L., Hermand, M.J.-P., Delaup, B.G., Saad, J.R., 2008. Effect of abrasive mineral on alloy performance in the ball mill abrasion test. Wear 265 (5–6), 865–870.meulen,

Guzman, C. (2013). Análisis de aceros por microscopia óptica. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México. páginas (10-30)

Iwasaki I., Riemer S. C., Orlich J. N., Natarajan K.A. (1985), "Corrosive and abrasive wear in ore griding", University of Minnesota, Minneapolis and Institute of scince, Departamento f metallurgy, Balgalore india. Paginas (5-15).

J, Solans Huguet y M.V Domenech Casellas Naturaleza y significado de la dureza de los minerales. Trabajos de geología, Universidad de Oviedo, 1978.

Kumar, K.U. Gundapa, P., Bai, B.N.P Natarajanm K.A., Biwas, S.K 1989, Laboratory studies on the wear of grinding media, Tribology International 22 (3), 219-225.

Moema, J.S, Papo, M,J., Slabbert, G.A, Zimba, J,. 2009. Grinding media quality assurance for the comminution of gold ores, In: World Gold conference, The southern Africa Institute of Mining and Metallurgy.

Natarajan K. A., (1995) "Laboratory studies on ball wear in the grinding of a calcopyrite ore"; Departamento of metallurgy, Indian institute of science, Bangalore India, Páginas 1-6.

Natarajan K.A, (1996), "Laboratory studies on ball wear in the grinding of chalcopyrite ore", Departamento of metallurgy, Indian Institute of Science, Bangalore india. Páginas (1-9)

Prentice, T. K, Ball wear in cylindrical mills, J.Chem, Min, Metall. Sec. S. Afr., 1943. Pp, 99-116

R. Blickensderfer and J. H. Tylczak, (1985), "Laboratory Tests of Spalling. Breaking. and Abrasion of Wear-Resistant Alloys Used in Mining and Mineral Processing", Bureau of Mines Report of Investigations. Páginas (10-20).

Radziszewski P, (1997) "Predictive model for ball mill wear", Canadian institute of mining and metallurgy. Quebec, Canada, Páginas 1-3

Radziszewski P, (2000), "Developing an experimental procedure for charge media wear prediction", Canadian institute of mining and metallurgy, Quebec, Canada, Page 1.

V.K. Gupta. Effect of size distribution of the particulate material on the specific breakage rate of particles in dry ball milling, Department of Fuel and Mineral Engineering, Indian School of Mines, Dhanbad 826 004, India.

Vermeulen L.A., and Howat, D.D. Analysis of results of marked-ball test in relation to theories of ball wear in rotary mill, Randburg. Council for mineral technology, report M77, Apr. 1983, 34 pp.

Zumaran D. (2017), "Evaluación de la influencia de las variables en la distribución granulométrica del producto de molienda por bolas de minerales mediante diseños experimentales", Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de ingeniería de procesos, Arequipa, Perú, Páginas (17-23).

ANEXOS

Análisis granulométrico de muestras.

Tabla 15. Análisis granulométrico de muestra de cabeza de mineral de arena sílica.

Análisis granulométrico de muestra de arena sílica.					
Malla	micras	Peso retenido	% Peso retenido	% Peso cum (+)	%Peso acum (-)
8	2382.00	0	-	-	-
10	2000.00	24.1	2.42	2.42	97.58
20	841.00	465.7	46.76	49.18	50.82
40	420.00	165	16.57	65.74	34.26
60	250.00	98.1	9.85	75.59	24.41
80	177.00	85.9	8.62	84.22	15.78
100	149.00	8.8	0.88	85.10	14.90
140	105.00	27.1	2.72	87.82	12.18
200	74.00	32.2	3.23	91.05	8.95
270	53.00	27.7	2.78	93.84	6.16
325	44.00	52.2	5.24	99.08	0.92
-325		9.2	0.92	100.00	0.00
		996	100.00		

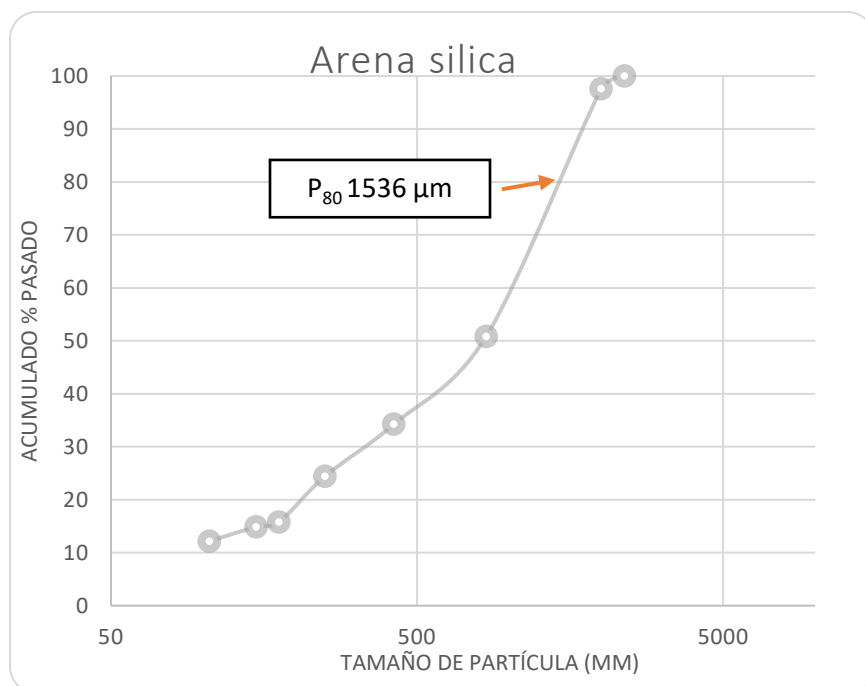


Ilustración 283, %Pasado acumulado vs tamaño de partícula para mineral de arena sílice.

Tabla 16 Análisis granulométrico de muestra de cabeza de mineral sulfuro.

Análisis granulométrico de sulfuro					
Malla	micras	Peso retenido	% Peso retenido	% Peso cum (+)	%Peso acum (-)
8	2382.00	0	-	-	-
10	2000.00	0	0.00	0.00	100.00
20	841.00	0	0.00	0.00	100.00
40	420.00	12.1	1.21	1.21	98.79
60	250.00	547.7	54.78	55.99	44.01
80	177.00	338.3	33.83	89.82	10.18
100	149.00	72.4	7.24	97.06	2.94
140	105.00	25.4	2.54	99.60	0.40
200	74.00	3.3	0.33	99.93	0.07
270	53.00	0.4	0.04	99.97	0.03
325	44.00	0	0.00	99.97	0.03
-325	44.00	0.3	0.03	100.00	0.00
		999.9	100.00		

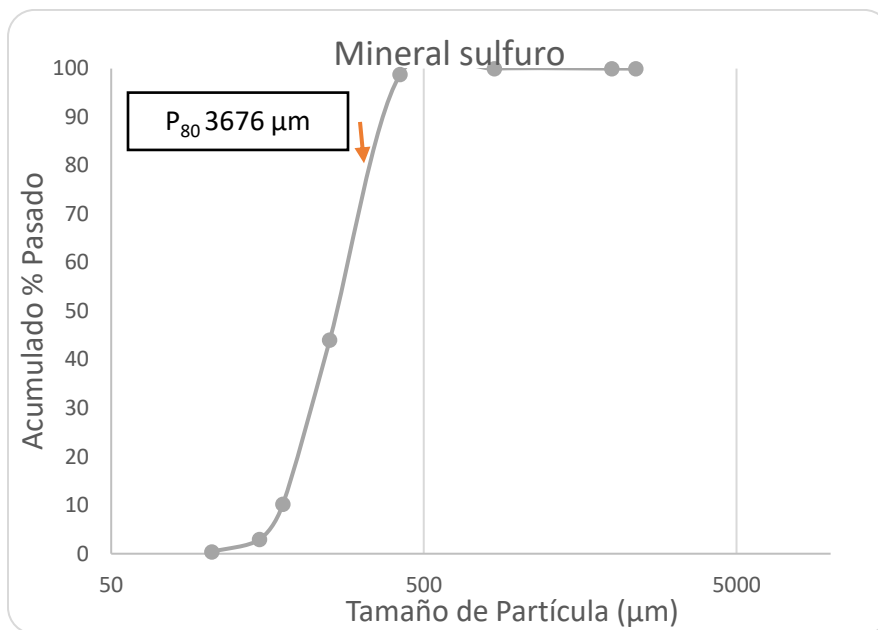


Ilustración 44. %Pasado acumulado vs tamaño de partícula para mineral de sulfuro

Cálculos de teoría del volumen.

Prueba 1, mineral sulfuro con bola forjada.

Tomando la ecuación 1 de la teoría del volumen;

$$m(T) = m_o \exp \left(-\frac{T}{\tau} \right)$$

Linealizamos, aplicando logaritmos y obtenemos:

$$\ln m = \ln m_o - \frac{T}{\tau}$$

Donde:

m es la masa de la bola, después de moler T toneladas molidas (g)

m_o es la masa inicial de la bola (g)

T son las toneladas molidas de mineral (t)

τ es una constante (g)

Para poder calcular el constante k_m se utilizan los datos obtenidos de la experimentación. Es necesario calcular la pérdida de la masa de la bola, la cantidad de mineral molido y el logaritmo natural de la masa de la bola. Tabla 17.

Tabla 17. Datos experimentales de prueba con mineral sulfuro y bola forjada.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	Masa perdida Acum	Mol acum	ln m
0	13093.10	0.00	0		0	9.4798
2	13064.60	2000.00	4.80	4.80	2000.00	9.4777
4	13060.80	2000.00	3.80	8.60	4000.00	9.4774
6	13051.90	2000.00	8.90	17.50	6000.00	9.4767
8	13047.80	2000.00	4.10	21.60	8000.00	9.4764
10	13039.90	2000.00	7.90	29.50	10000.00	9.4758
12	13034.90	2000.00	5.00	34.50	12000.00	9.4754

Utilizando los datos, del ln de la bola como “y” con la masa acumulada como “x”, podemos aplicar una forma de ecuación de la recta y calcular la pendiente, obteniéndola en un valor de -3×10^{-7} Ilustración 46.

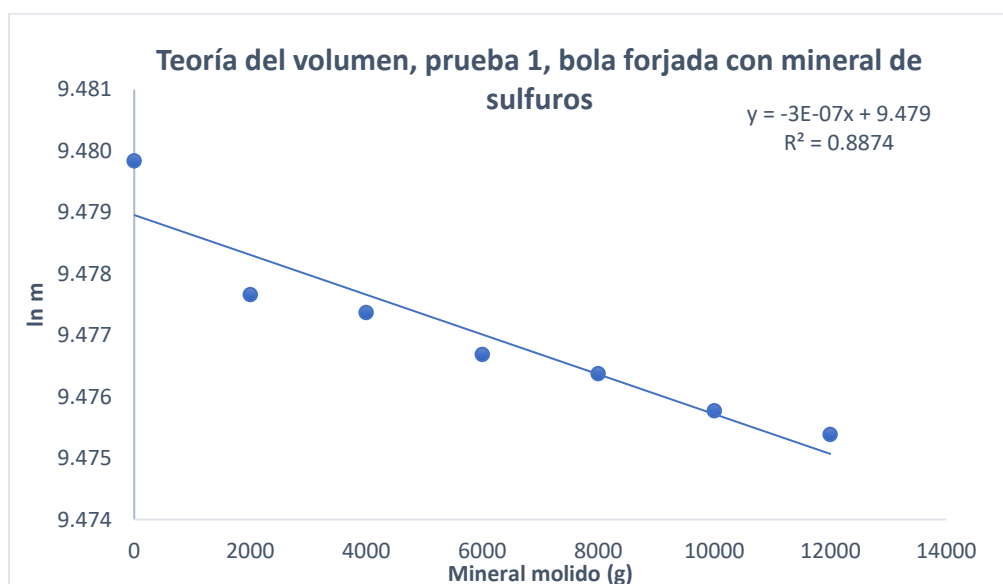


Ilustración 295. Mineral molido vs ln de masa para prueba de bola forjada con mineral sulfuro.

Despejando la ecuación 1 para obtener la constante obtenemos:

$$\tau = \frac{\ln m - \ln m_o}{T}$$

A 0 toneladas molidas τ se obtiene como la inversa de la pendiente, calculando para este caso un valor de τ de -3086143.5, obteniendo este valor es posible aplicar la teoría para predecir a T toneladas molidas la masa de la bola. Tabla 18.

Tabla 18. Predicción de la masa con teoría del volumen.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Peso calculado teoría volumen (g)	%error teoría volumen
0	13093.10	13093.10	0.00%
2	13064.60	13084.62	-0.15%
4	13060.80	13076.14	-0.12%
6	13051.90	13067.67	-0.12%
8	13047.80	13059.20	-0.09%
10	13039.90	13050.74	-0.08%
12	13034.90	13042.30	-0.06%

Prueba 2 mineral arena sílice con bola forjada.

Los cálculos para la teoría del volumen se repiten con los datos obtenidos de la prueba 2. Los datos experimentales completos se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	acum per	Mol acum	ln m
0	13034.90	0.00	0		0	9
2	13029.80	2000.00	5.10	5.10	2000.00	9.4750
4	13023.90	2000.00	5.90	11.00	4000.00	9.4745
6	13017.20	2000.00	6.70	17.70	6000.00	9.4740
8	13011.90	2000.00	5.30	23.00	8000.00	9.4736
10	13004.00	2000.00	7.90	30.90	10000.00	9.4730
12	13001.10	2000.00	2.90	33.80	12000.00	9.4728

Para este caso el valor de la pendiente se encuentra en un valor de -2×10^{-7} . En un valor de 0 toneladas molidas k_m se obtiene en un valor de τ de -4.42×10^6

Prueba 3, mineral arena sílice con bola alto cromo

Los datos experimentales completos para la prueba 3, se muestran en la tabla 20,

Tabla 20. Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	acum per	Mol acum	ln m
0	12430.30	0.00	0		0	9.4279
2	12424.60	2000.00	5.70	5.70	2000.00	9.4274
4	12419.20	2000.00	5.40	11.10	4000.00	9.4270
6	12414.00	2000.00	5.20	16.30	6000.00	9.4266
8	12408.60	2000.00	5.40	21.70	8000.00	9.4261
10	12404.20	2000.00	4.40	26.10	10000.00	9.4258
12	12399.00	2000.00	5.20	31.30	12000.00	9.4254

Utilizado los datos, del ln de la bola como “y” con la más acumulada como “x”, podemos aplicar una forma de ecuación de la recta y calcular la pendiente, obteniéndola en un valor de -2×10^{-7} . En un valor de toneladas molidas τ se obtiene como la inversa de la pendiente, calculando para este caso un valor de τ de -4784673.9

Prueba 4, mineral de sulfuro con bola alto cromo

Los datos experimentales completos utilizados en los cálculos se muestran en la tabla 21.

Tabla 21 Datos experimentales de prueba con mineral de arena sílice y bola forjada.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	acum per	Mol acum	ln m
0	12399.00	0.00	0		0	9.43
2	12397.10	2000.00	1.90	1.90	2000.00	9.425
4	12394.40	2000.00	2.70	4.60	4000.00	9.425
6	12392.60	2000.00	1.80	6.40	6000.00	9.425
8	12390.30	2000.00	2.30	8.70	8000.00	9.425
10	12387.30	2000.00	3.00	11.70	10000.00	9.424
12	12385.60	2000.00	1.70	13.40	12000.00	9.424

Utilizando los datos, del ln de la bola como “y” con la más acumulada como “x”, podemos aplicar una forma de ecuación de la recta y calcular la pendiente, obteniéndola en un valor de -9×10^{-8} . A 0 toneladas molidas k_m se obtiene como la inversa de la pendiente, calculando para este caso un valor de k_m de - 10860206.7

Cálculos para la teoría lineal.

Prueba 1, bola forjada con mineral de sulfuro.

El cálculo de la teoría lineal utiliza los datos experimentales de las pruebas, se utiliza como base la ecuación 2:

$$m(T) = \left(m_0^{1/3} - \frac{1}{3} bT \right)^3 \quad (2)$$

Donde:

m es la basa de la bola (g)

T son las toneladas molidas a tiempo t

m_0 es la masa inicial de la bola

b es una constante

Para eliminar los paréntesis es necesario aplicar una raíz cubica, obteniendo:

$$m^{1/3} = m_0^{1/3} - \frac{1}{3} bT$$

Utilizando la ecuación dos como una ecuación de la recta, tenemos la masa inicial, las T toneladas molidas a tiempo t de la experimentación, tabla 22.

Tabla 22. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral sulfuro.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	Masa perdida Acum	Mol acum	$\sqrt[3]{m}$
0	13093.10	0.00	0		0	23.5693
2	13064.60	2000.00	4.80	4.80	2000.00	23.5522
4	13060.80	2000.00	3.80	8.60	4000.00	23.5499
6	13051.90	2000.00	8.90	17.50	6000.00	23.5446
8	13047.80	2000.00	4.10	21.60	8000.00	23.5421
10	13039.90	2000.00	7.90	29.50	10000.00	23.5374
12	13034.90	2000.00	5.00	34.50	12000.00	23.5344

Si graficamos la cantidad de mineral molido contra la raíz cubica de la masa, podemos obtener la pendiente de la ecuación 2, siendo de -3.06×10^{-6} , de acuerdo con la ecuación, la constante b sería el valor de la pendiente elevada al cubo, obteniendo el valor de b en 7.63×10^{-0}

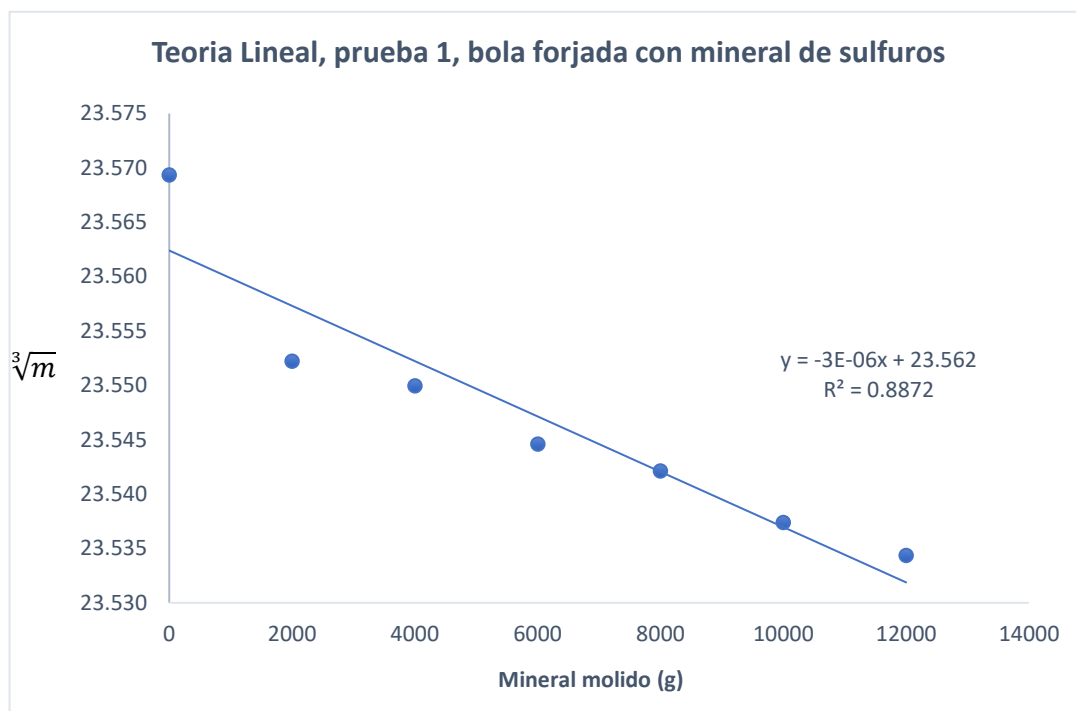


Ilustración 46. Gráfico de teoría lineal para prueba de bola forjada con mineral sulfuro.

Obteniendo el valor de b, con la ecuación 2, es posible hacer la predicción del peso de la bola a T toneladas molidas, tabla 23.

Tabla 23. Cálculo de predicción de masa con teoría lineal.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Peso calculado teoría lineal (g)	%error teoría lineal
0	13093.10	13093.10	0.00%
2	13064.60	13084.62	-0.15%
4	13060.80	13076.15	-0.12%
6	13051.90	13067.68	-0.12%
8	13047.80	13059.22	-0.09%
10	13039.90	13050.75	-0.08%
12	13034.90	13042.30	-0.06%

Una vez obtenido los valores de la predicción de la masa, podemos calcular el consumo de bola considerando el kg de bola por tonelada molida, convirtiendo en toneladas los gramos molidos en laboratorio y la masa de la bola en kilogramos, tabla 24.

Tabla 24. Consumo en g/t real, por teoría de volumen y teoría lineal..

kg/t molida		
Real	volumen	Lineal
1.23E-03	3.24E-04	3.24E-04
7.87E-04	3.24E-04	3.24E-04
5.77E-04	3.24E-04	3.24E-04
5.08E-04	3.24E-04	3.23E-04
4.45E-04	3.24E-04	3.23E-04

Prueba 2, bola forjada y mineral de arena sílice.

Utilizando la ecuación de la teoría lineal, obtenemos la masa inicial, las T toneladas molidas a tiempo t de la experimentación, tabla 25.

Tabla 25. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral de arena sílice..

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	acum	Mol acum	$\sqrt[3]{m}$
0	13034.90	0.00	0		0	24
2	13029.80	2000.00	5.10	5.10	2000.00	23.5313
4	13023.90	2000.00	5.90	11.00	4000.00	23.5277
6	13017.20	2000.00	6.70	17.70	6000.00	23.5237
8	13011.90	2000.00	5.30	23.00	8000.00	23.5205
10	13004.00	2000.00	7.90	30.90	10000.00	23.5158
12	13001.10	2000.00	2.90	33.80	12000.00	23.5140

Con la ecuación de la recta, siendo de -2.26×10^{-7} , obteniendo la constante b en un valor de 9×10^{-07} .

Prueba 3, bola fundida y mineral de arena sílice.

Los datos experimentales para la prueba 3 se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral de arena sílice.

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	acum per	Mol acum	$\sqrt[3]{m}$
0	12430.30	0.00	0		0	23.1647
2	12424.60	2000.00	5.70	5.70	2000.00	23.1612
4	12419.20	2000.00	5.40	11.10	4000.00	23.1578
6	12414.00	2000.00	5.20	16.30	6000.00	23.1546
8	12408.60	2000.00	5.40	21.70	8000.00	23.1512
10	12404.20	2000.00	4.40	26.10	10000.00	23.1485
12	12399.00	2000.00	5.20	31.30	12000.00	23.1453

La pendiente de la ecuación para este experimento se encuentra en -1.6×10^{-6} , y la constante b en 4.8×10^{-6} .

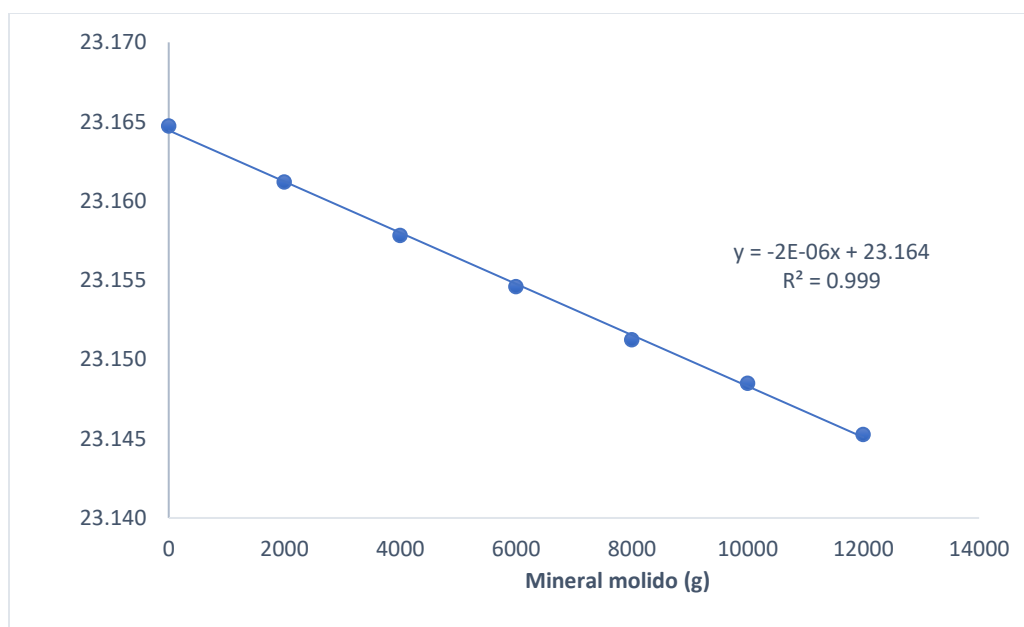


Ilustración 306. Gráfico de teoría lineal para prueba de bola fundida con mineral de arena sílice.

Obteniendo el valor de b, con la ecuación 2, es posible hacer la predicción del peso de la bola a T toneladas molidas,

Prueba 4, bola fundida con mineral de sulfuro.

La tabla 27 muestra los datos experimentales de la prueba

Tabla 27. Datos experimentales para prueba con bola forjada y mineral de sulfuros

Tiempo (h)	Peso Bola (g)	Masa molida (g)	Masa Perdida (g)	acum per	Mol acum	$\sqrt[3]{m}$
0	12399.00	0.00	0		0	23
2	12397.10	2000.00	1.90	1.90	2000.00	23.1441
4	12394.40	2000.00	2.70	4.60	4000.00	23.1424
6	12392.60	2000.00	1.80	6.40	6000.00	23.1413
8	12390.30	2000.00	2.30	8.70	8000.00	23.1399
10	12387.30	2000.00	3.00	11.70	10000.00	23.1380
12	12385.60	2000.00	1.70	13.40	12000.00	23.1369

La pendiente para estos datos, da -7×10^{-7} , lo que da un valor de b en 2.13×10^{-06}

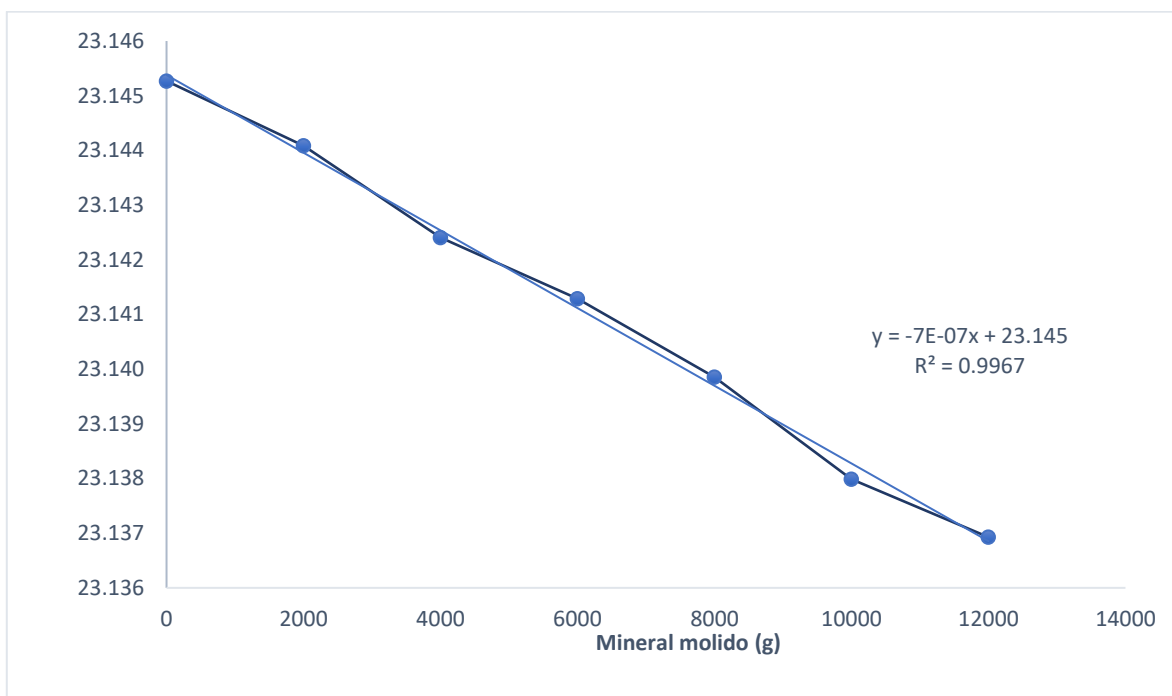


Ilustración 4731. Gráfico de teoría lineal para prueba de bola fundida con mineral de sulfuro.