

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**USO DE CHANCADORAS DE PEBBLES PARA  
OPTIMIZAR LA MOLIENDA SAG**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Presentado por:

David Saúl Carita Gonzales

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2024

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**


**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

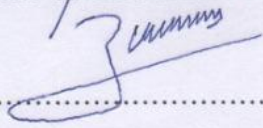
**USO DE CHANCADORAS DE PEBBLES PARA OPTIMIZAR  
LA MOLIENDA SAG**

Trabajo sustentado y aprobado el día 05 de Julio del 2024, estando integrado el Jurado Calificador por:

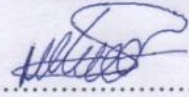
**Presidente** : .....

  
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco


**Secretario** : .....

  
MSc. Daniel Jesús Zevallos Ramos

**Vocal** : .....

  
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

**Asesor** : .....

  
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila en mi condición de asesor acreditado con Resolución de Escuela de Facultad N° 8773-2024-FAIN/UNJBG, del trabajo de suficiencia profesional titulado: **"USO DE CHANCADORAS DE PEBBLES PARA OPTIMIZAR LA MOLIENDA SAG"**, presentado por el Bach. David Saúl Carita Gonzales, para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista, por la modalidad de trabajo de suficiencia profesional.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud del trabajo, y según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es **3%**.

Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD del trabajo y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalurgista.

Tacna, 25 de setiembre 2024

FIRMA ASESOR  
Nombres y apellidos

.....  
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila  
DNI N° 00419682



FIRMA TESISTA  
Nombres y apellidos

.....  
Bach. David Saúl Carita Gonzales  
DNI N° 70969039



## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres Víctor y Reina, por su inquebrantable apoyo, paciencia y amor incondicional. Su ejemplo y dedicación me han inspirado a alcanzar este logro.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, sin su presencia y bendiciones este logro no habría sido posible, y a los docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Materiales por contribuir a mi formación profesional.

## CONTENIDO

HOJA DE JURADOS	ii
CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL TEMA	3
1.1. Descripción del tema	3
1.2. Importancia de la investigación	5
1.3. Justificación de la investigación	7
1.3.1. Justificación técnica	7
1.3.2. Justificación económica	8

1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo general	9
1.4.2. Objetivos específicos	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Definición de términos	10
2.2. Descripción técnica	12
2.2.1. Molienda SAG	12
2.3. Operaciones mineras con molienda SAG	15
2.4. Ventajas técnicas	17
2.5. Chancadoras de pebbles	18
2.5.1. Tipos de chancadoras utilizadas	19
2.6. Circuitos de operación	23
2.7. Simulación de chancado de pebbles	26
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades mineras de Perú con SAG	16
Tabla 2. Flujo de alimentación y descarga del SAG	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Capacidad de molino en función de F80	4
Figura 2	Descripción gráfica de molinos SAG	13
Figura 3	Molino SAG en operación	16
Figura 4	Configuración simple de chancado de pebbles	20
Figura 5	Chancadora vertical de impacto	21
Figura 6	Movimiento del cabezal cónico	23
Figura 7	Configuración SABC-A	24
Figura 8	Configuración SABC-B	26
Figura 9	Circuito de molienda antes y después	27
Figura 10	Perfil granulométrico alimentación inicial SAG	29
Figura 11	Perfil granulométrico alimentación simulada SAG	30
Figura 12	Generación simulada de finos en alimentación SAG	31
Figura 13	Resultados simulaciones SAG con pre-chancado	32
Figura 14	Variaciones en simulación SAG con pre-chancado	33

## RESUMEN

La generación de *pebbles* es un fenómeno inevitable en el proceso de reducción de partículas en la molienda SAG (*Semi Autogenous Grinding*), las características del mineral como la dureza y fracturabilidad tienen incidencia en la generación de este material durante la molienda, un sistema de molienda donde la alimentación al molino es una combinación entre mineral fresco y carga recirculante, es afectado en el rendimiento granulométrico resultante por la presencia de *pebbles* recirculantes.

La presente investigación monográfica evaluará los beneficios técnicos en la implementación de la etapa de chancado que antecede a la molienda SAG del material recirculante, de esta forma los beneficios que podrían obtenerse como el incremento de la capacidad de molienda, reducción del consumo energético, reducción en el desgaste de bolas y revestimiento interno del molino, así como la obtención de una mejor calidad en el producto de molienda serán abordados mediante la revisión bibliográfica y estudio de casos en el contexto actual del procesamiento de minerales.

Finalmente, se presentará alternativas de solución que permitan abordar la problemática relacionada con la generación inherente de *pebbles* durante el proceso de molienda SAG.

## **ABSTRACT**

The generation of pebbles is an inevitable phenomenon in the particle size reduction process in SAG (Semi Autogenous Grinding) milling. The characteristics of the ore, such as hardness and fracturability, have an impact on the generation of this material during milling. A milling system where the mill feed is a combination of fresh ore and recirculating load is affected in the resulting granulometric performance by the presence of recirculating pebbles.

This monograph research will evaluate the technical benefits of implementing a crushing stage prior to SAG milling of the recirculating material. In this way, the benefits that could be obtained, such as increased milling capacity, reduced energy consumption, reduced wear on balls and the mill's internal lining, as well as obtaining a better quality in the milling product, will be addressed through a literature review and case studies in the current context of mineral processing.

Finally, alternative solutions will be presented to address the problem related to the inherent generation of pebbles during the SAG milling process.

## INTRODUCCIÓN

El uso de equipos de conminución para el chancado de material denominado *pebbles*, es una práctica muy extendida en circuitos de molienda SAG donde la generación de esta carga recirculante es habitual, su objetivo primordial está enfocado en mejorar la eficiencia de la molienda SAG, debido principalmente a que los *pebbles*, generados por el astillamiento y la abrasión del mineral durante la molienda, alcanzan un tamaño crítico y que además por características de dureza presentan una alta resistencia a la molienda. Un circuito de molienda SAG donde la dureza del mineral es alta, enfrentará problemas de disminución de la capacidad de procesamiento, este es un problema que debe corregirse en circuitos que no cuentan con una etapa de chancado de este material; por lo que se ven obligados a retirar del sistema este material.

Estudios que anteceden al presente, dan cuenta que el uso de chancadoras del tipo cónico se presenta como una alternativa eficiente a fin de evitar la sobrecarga del molino y los consiguientes problemas operativos generados, de manera que la instalación de este sistema de chancado debe ser independiente y/o aislado del circuito de molienda, en ese contexto durante

el desarrollo de este trabajo se realizará un estudio sobre las configuraciones habituales de molienda SAG complementado con chancado de *pebbles*.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL TEMA

#### 1.1. Descripción del tema

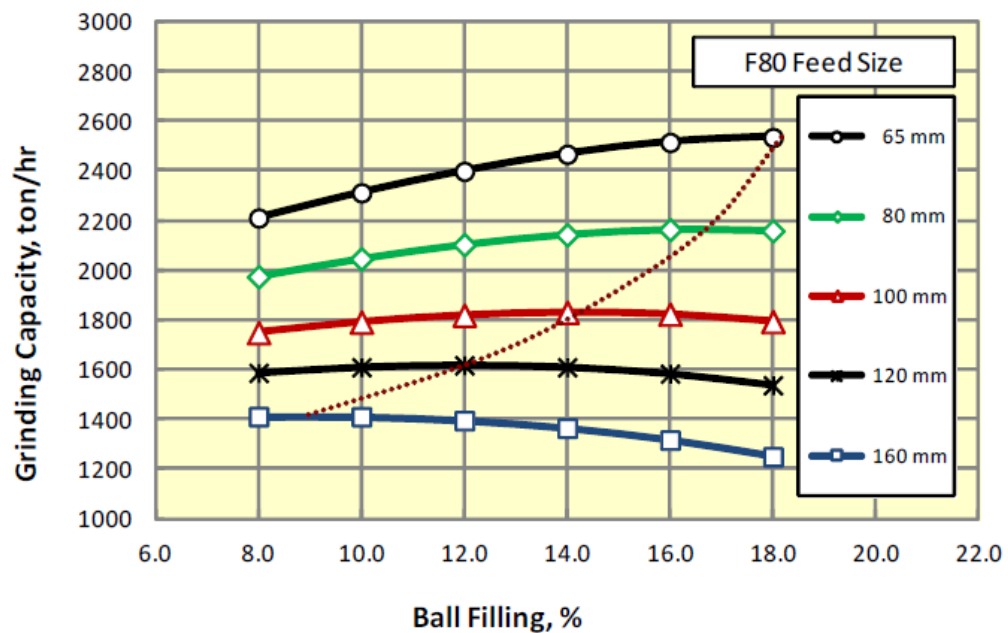
Un indicador crítico en la etapa de molienda es el *throughput* del molino, este término es referido a la capacidad de molienda, razón por la cual si se desea incrementar la productividad de un circuito de molienda se debe optimizar el tonelaje procesado impactando en lo más mínimo posible en la reducción del tamaño.

De acuerdo con la recomendación del investigador Dr. Jaime Sepúlveda, en un circuito de molienda SAG resulta conveniente que la granulometría de la alimentación, término denominado como F80, sea lo más pequeño posible, refiere en su artículo "*Guía práctica para la optimización de la eficiencia energética en la molienda de minerales*", que la capacidad del molino se incrementa a medida que se alimente con mineral de menor tamaño F80, la siguiente figura muestra que esta aseveración es correcta, se indica que un alimentación con un menor F80 incrementa la capacidad del molino comparado con diferentes porcentajes de llenado de bolas, asocia esta condición al hecho de que las rocas tienen un bajo rendimiento como medios

moledores y que el porcentaje de bolas debe incrementarse conforme disminuya la cantidad de rocas en la alimentación (Sepúlveda, 2022, p. 83).

**Figura 1**

*Capacidad de molino en función de F80*



*Nota:* Figura adaptada de “Guía práctica para la optimización de la eficiencia energética en la molienda de minerales”, por J-Consultores Ltda., 2022.

El presente trabajo tiene como línea de investigación a la implementación de una etapa de chancado del material pebbles antes de que ingrese como la alimentación complementaria al circuito de molienda SAG, de

esta forma se estudiará la influencia que se genera en el rendimiento del molino al incrementar el porcentaje de finos en la alimentación SAG.

## **1.2. Importancia de la investigación**

La reducción de tamaño del mineral procesado en las plantas concentradoras, proceso conocido como conminución tiene como objetivo común:

- Reducción de tamaño apropiados para flotación
- Liberación de especies valoradas
- Incremento del área superficial del mineral

Para lograr esta reducción de tamaño es necesario aplicar energía en cada uno de los equipos de conminución; en ese sentido, se relaciona al consumo específico de energía (CEE) como la energía necesaria para la reducción de tamaño.

En el caso específico del molino SAG, la energía para la reducción de tamaño está direccionada a tres mecanismos simultáneos: impacto, abrasión y compresión, si se considera que la demanda energética de los sistemas SAG es sustancialmente más alto en comparación de molienda convencional, la instalación de un sistema que permita incrementar el porcentaje de finos en la

alimentación de la carga recirculante debería reducir el consumo específico de energía al incrementar el tonelaje de alimentación con pebbles previamente chancado.

De acuerdo con el artículo de la Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos “*Predicción de consumo específico de energía en molienda SAG*” presentado por MINSUS (2022), indica que, debido al alta complejidad operativa del molino, la granulometría de la alimentación del molino influye en la demanda energética, por lo que recomienda conocer y controlar esta variable a fin de consumir solo la energía necesaria al tener control operativo sobre la velocidad del molino y la carga molturante.

La importancia de la implementación de circuitos de chancado de pebbles previo al ingreso de molienda SAG, puede resumirse con los siguientes beneficios operativos adquiridos al contar con esta configuración, los cuales tienen potencial de mejorar significativamente el rendimiento general de la etapa de conminución:

- Incremento de capacidad de molienda
- Reducción del consumo de energía específica

- Mejor calidad del producto
- Disminución de costos operativos

### **1.3. Justificación de la investigación**

#### **1.3.1. Justificación técnica**

La generación de pebbles es inherente de la molienda SAG, de acuerdo con Cortés (2018, p. 6) los pebbles tienen la particularidad de ser difíciles de reducir principalmente por su forma y tamaño por lo que resulta conveniente procesar este material en un sistema independiente de chancado donde este material rechazado por sobre-tamaño es triturado para ser recirculados nuevamente hacia el molino SAG, de esta forma se incrementa la cantidad de mineral procesado.

De acuerdo con Armas & Poma (2013, p. 22) las características de consumo energético, clasifica el proceso de molienda como ineficiente, debido principalmente a que la energía demandado en este proceso es convertida primariamente en calor (85 %), en tanto que solo el 1 % cumple con el cometido de reducir el tamaño del mineral, bajo esta consideración, la estrategia implementada en algunas empresas mineras con sistema de molienda SAG es implementar un sistema de pre-chancado, principalmente a

que bajo este sistema se tiene un menor consumo específico de energía en comparación a un sistema convencional SAG-molino de bolas.

### **1.3.2. Justificación económica**

De acuerdo con la revisión de trabajos que tienen la misma línea de investigación, se resalta el enfoque en común que tienen los estudios sobre la demostración cuantitativa de como el sistema de pre-chancado puede generar una disminución significativa en el consumo de energía específica, y que por consiguiente, se obtienen mejores beneficios económicos.

Es así detalla Pino (2018), en su trabajo de tesis demostró mediante la simulación de un proceso de molienda SAG usando los programas Moly-Cop Tools y JKSimMet en un sistema de pre-chancado de pebbles donde se considera 50 mm el *setting* de la chancadora, se registra un incremento en el porcentaje de finos en la alimentación logrando disminuir el consumo específico de energía en 16,29 % ;por lo que es posible procesar más tonelaje frente a un sistema sin pre-chancado.

Del mismo modo, Silva (2013, pp. 96-98) refiere la importancia de contar con un sistema de chancado para los pebbles que son evacuados de la molienda SAG, manteniendo un *setting* de 100 % -1/2" se evidencia una reducción en el consumo energético del molino SAG asociado principalmente

a una disminución en la granulometría en la alimentación al molino al tener un mayor ingreso de carga recirculante (pebbles chancados), finalmente el autor recomienda no superar el contenido de 26 % de carga circulante sobre el mineral fresco, a fin de no disminuir la alimentación fresca y afectar el rendimiento energético del molino.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

- Analizar el impacto del uso de chancadoras de pebbles como etapa complementaria de la molienda SAG, considerando aspectos técnicos y económicos.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Describir el proceso de molienda SAG
- Describir los problemas asociados a la generación de pebbles en la molienda SAG
- Analizar los principios de funcionamiento y los tipos de chancadoras de pebbles.
- Presentar estudios de casos reales que demuestren la efectividad del sistema de chancado de pebbles

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Definición de términos

Las siguientes definiciones fueron tomadas del glosario técnico minero.

- **Conminución:** Operaciones unitarias sucesivas o complementarias donde a través de chancado o molienda el mineral es sometido a la reducción de tamaño.
- **Chancado:** Etapa de conminución posterior a la voladura del mineral donde se obtiene un tamaño de mineral que puede ser procesado mediante molienda.
- **Molienda:** Operación posterior al chancado o trituración, generalmente los molinos son cuerpos cilíndricos rotatorios donde la fricción entre el mineral y el medio moledor genera la reducción de tamaño del mineral.
- **Molienda SAG:** Método de molienda cuyo medio moledor está conformado por bolas de acero y el mismo material en forma de trozos grandes.
- **Granulometría:** Medición del tamaño de las partículas del mineral o sedimento.

- **Carga circulante:** Partículas de mineral con sobre tamaño que retornan a los circuitos de chancado o molienda antes de ingresar a la siguiente etapa de conminución.
- **Circuito cerrado:** Sistema de conminución donde una fracción del producto es retornado directamente a la alimentación a fin de lograr las especificaciones deseadas.
- **Hidrociclón:** Equipo de clasificación de forma cónica donde el fluido que contiene partículas del mineral es dividido interiormente en dos corrientes, una más pesada evacuada por la parte inferior y otra con material más fino es llevado con flujo ascendente que es evacuado por la parte superior.
- **Costo de operación:** Costo total que deriva de costos por conceptos de salarios del personal y de gastos relacionados con el desarrollo de la operación.

## **2.2. Descripción técnica**

### **2.2.1. Molienda SAG**

Se considera molienda SAG a aquellos donde se utiliza una combinación de elementos moledores o molturadores entre bolas de acero y mineral de tamaño grueso del propio material a moler, una característica muy distintiva de este tipo de molinos es apreciable en la relación más alta de D/L (diámetro interno y longitud) en comparación de otros molinos; el efecto moedor se da principalmente por impacto, compresión y abrasión (Campoverde & Díaz, 2020, p. 24) , donde la caída del mineral desde una gran altura requiere un menor consumo de energía en comparación de molinos de bolas, este tipo de molinos permite prescindir de etapas de chancado grueso, de manera que los circuitos de molienda SAG son apreciados por los menores gastos de operación. El uso molinos SAG generalmente permite obtener un producto de molienda intermedio por lo que es necesario complementarlo con molinos de bolas en circuitos cerrados y en serie, esta configuración es ampliamente utilizada en la minería de cobre (Blanco, 2017, p. 31).

## Figura 2

### *Descripción gráfica de molinos SAG*



*Nota:* Molino SAG complementado por molinos de bolas en circuito cerrado. Figura adaptada de “Tecnología mineralúrgica. Bloque II. Capítulo 8. Molienda”, por Blanco, 2022.

Una definición complementaría otorga el autor de Extractive Metallurgy of Copper, donde indica que la relación de bolas de acero utilizado en circuitos SAG es de aproximadamente  $0,15 \text{ m}^3$  por cada  $0,85 \text{ m}^3$  de mineral, expresado

en términos de porcentaje, se suele usar un 15 % de bolas de acero en relación con el mineral para ayudar a la molienda. Así mismo, refiere que posterior a la etapa de molienda se suele clasificar al producto mediante parillas clasificadoras (trommel) donde se logra separar los pebbles que por características de sobre tamaño son separadas del material que ingresa a molienda fina llevada a cabo en molinos de bolas, indica que los pebbles retenidos son recirculados y enviados hacia trituración cónica para finalmente ser devueltas hacia el molino SAG, de acuerdo con el autor esta forma de complementar el circuito de molienda SAG con el chancado de pebbles, permite maximizar la molienda minimizando el consumo energético (Schlesinger, 2011, p. 36)

Para Wills et al. (2016, p. 159) la carga de bolas debe estar en un rango entre 4 y 15 % con respecto al volumen del molino, la gran demanda de este tipo molinos en la minería mundial se ve reflejada por la adquisición de por lo menos 1075 molinos para finales del año 2000 con equipos que exceden una capacidad de procesamiento superior a las 100 000 toneladas por día, estos equipos reemplazan las etapas finales de trituración (chancado secundario y terciario); por lo que brindan ventajas operativas como menor costo de inversión inicial al requerir menos equipos, menor costos operativos

relacionado al menor consumo de acero, presenta ventajas de diagramas de flujos relativamente más simples, por lo que además la demanda de personal especializado es menor, finalmente la ventaja de molinos de gran volumen representa una ventaja operativa por la capacidad de tratar grandes volúmenes de mineral (Wills et al., 2016, p. 160).

En cuanto al revestimiento del molino, refiere que la constitución interna del molino se da con placas de desgaste las cuales son sujetadas con lifters o elevadores atornillados al shell o carcaza, un aspecto crítico para el rendimiento del molino se da precisamente por la altura y grado de inclinación de los lifters debido a que la acción de estos elementos permite un adecuado deslizamiento de la carga del molino incidiendo directamente en la acción de molienda y desgaste del revestimiento (Wills et al., 2016, p. 160).

### **2.3. Operaciones mineras con molienda SAG**

Por las características y ventajas antes mencionadas, las principales plantas concentradoras de gran minería en el Perú, integran dentro de sus circuitos de molienda equipos de molienda SAG, entre los que se puede destacar el caso de la minera Las Bambas donde se procesa más de 380 000 toneladas de mineral diariamente.

**Tabla 1**

*Unidades mineras de Perú con SAG*

Concentradora	Tipo de Mineral	Capacidad de procesamiento diario (TM)
Yanacocha	Oro	330 000
Antapacay	Cobre	110 000
Antamina	Cobre, Zinc, Plomo, Molibdeno	270 000
Las Bambas	Cobre	380 000
Constancia	Cobre	140 000
Quellaveco	Cobre	335 000
Hudbay Perú (Chalcochalén)	Cobre	140 000

**Figura 3**

*Molino SAG en operación*



*Nota:* Molino SAG Tintaya Antapaccay , diámetro 12.2 m (40 ft), potencia de consumo 24 MW. Figura adaptada de “Wills’ Mineral Processing Technology”, por Wills, 2016.

La sociedad nacional de minería, petróleo y energía publicó en el año 2008, la implementación del sistema de chancado de *pebbles* en la unidad minera Antamina a fin de dar tratamiento al material de rechazo de la molienda SAG, describe además que este material presenta características de alta dureza pero que por su contenido de cobre, zinc y bismuto tienen que ser reprocesados a través de una etapa complementaria de chancado para ser reinsertados a molienda, con esta implementación Antamina esperaba incrementar su producción en 12 %, en su momento fue la primera empresa peruana en implementar este sistema (SNMPE, 2008).

#### **2.4. Ventajas técnicas**

- Requiere de una menor cantidad de etapas y equipos principalmente por eliminación de chancado intermedio (secundario y terciario), precisamente esto representa una ventaja económica al requerir menores costos de capital.
- Operacionalmente estos tipos de molinos presentan mejor rendimiento frente a minerales con alto contenido de arcillas.
- Bajos costos operacionales debido principalmente a su alta eficiencia en la fragmentación.

- Alta capacidad de reducción al procesar minerales desde 200 mm (chancado primario o mineral ROM) hasta 0,1 mm en una sola etapa.
- Hay investigaciones que muestran que el mineral procesado mediante molienda SAG, presenta mayor capacidad de flotar en comparación a minerales molidos solo con bolas de acero, esta característica puede ser asociada a que mediante molienda SAG el material fino adquiere una superficie más rugosa la cual es más propensa a adherirse a una burbuja de aire (Wills et al., 2016, p. 161).

## **2.5. Chancadoras de pebbles**

La necesidad operativa en la molienda SAG en los primeros diagramas de flujo no contemplaba la trituración complementaria. Sin embargo, se hizo evidente la necesidad de anteponer circuitos de chancado a la alimentación del molino SAG principalmente por la dureza del mineral, se ha llegado a evidenciar que se puede incrementar hasta en un 50 % la capacidad de procesamiento retirando el material de sobre tamaño, conocido comúnmente como *pebbles* para ser tratados en circuitos abiertos, donde previa trituración, son devueltos como parte de la alimentación al molino (Mular et al., 2002, p. 628).

El manual de entrenamiento de la minera Antamina da cuenta de la importancia de la instalación y uso de un circuito de chancado de *pebbles*, indica que estos equipos permiten disminuir la granulometría de la alimentación de 60 a 9 mm, de esta forma el mineral es acondicionado para poder ser ingresado a remolienda en el molino SAG (Antamina, 2006).

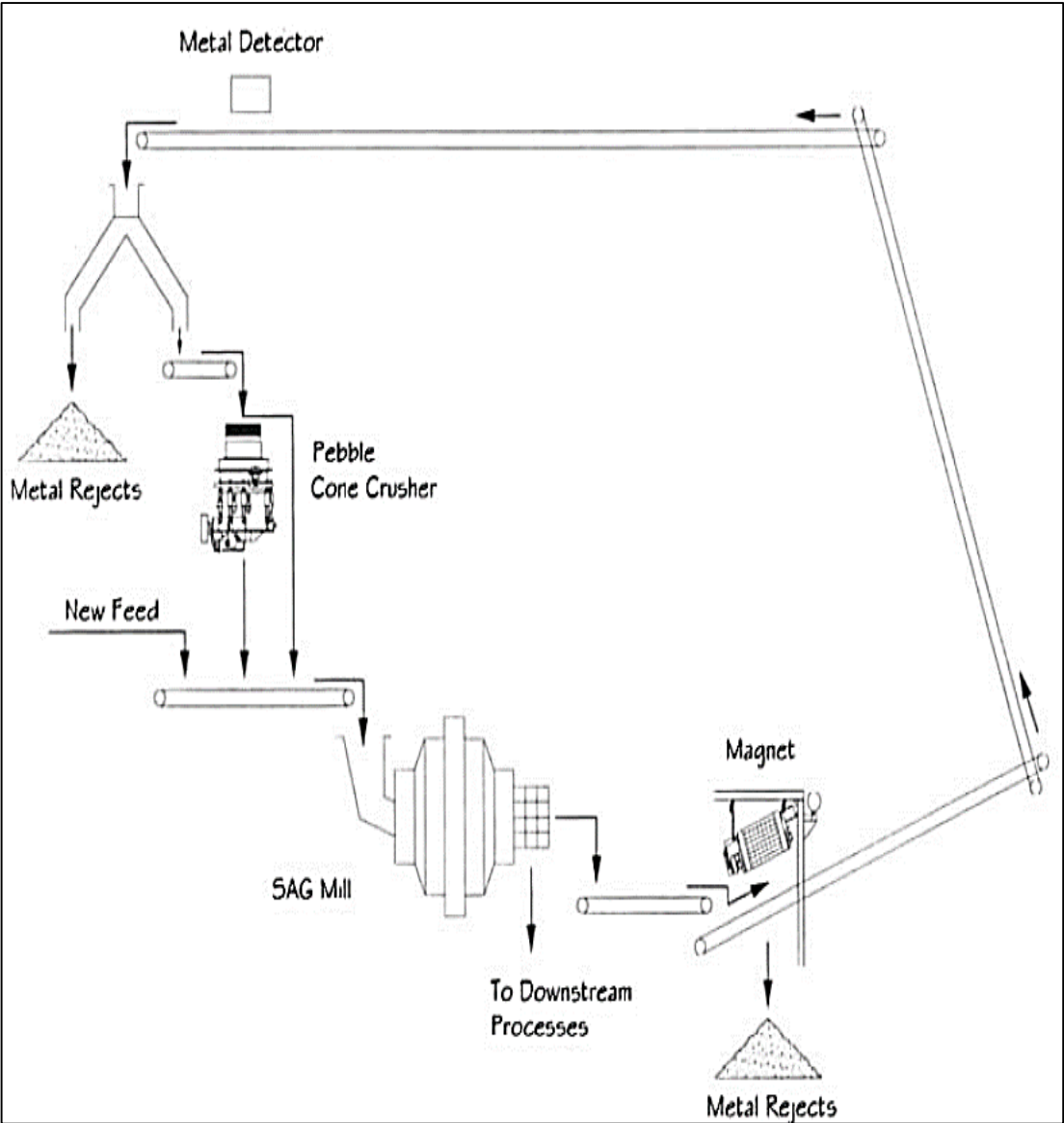
El objetivo principal de la trituración de *pebbles*, es obtener un nivel de granulometría más fina a partir del rechazo de la molienda SAG, esta disminución en la granulometría hace posible la reducción de la carga del molino; por lo que aspectos como consumo de energía y desgaste de componentes se ven ampliamente favorecidos (Mular et al., 2002, p. 629).

### **2.5.1. Tipos de chancadoras utilizadas**

La alimentación debe estar libre de bolas de acero a fin de no impactar negativamente sobre el material componente, se presenta el siguiente esquema donde se ha contemplado la instalación de imanes y detectores de metales instalados sobre las fajas transportadoras, con la finalidad de extraer metales para garantizar la protección de la chancadora.

**Figura 4**

*Configuración simple de chancado de pebbles*



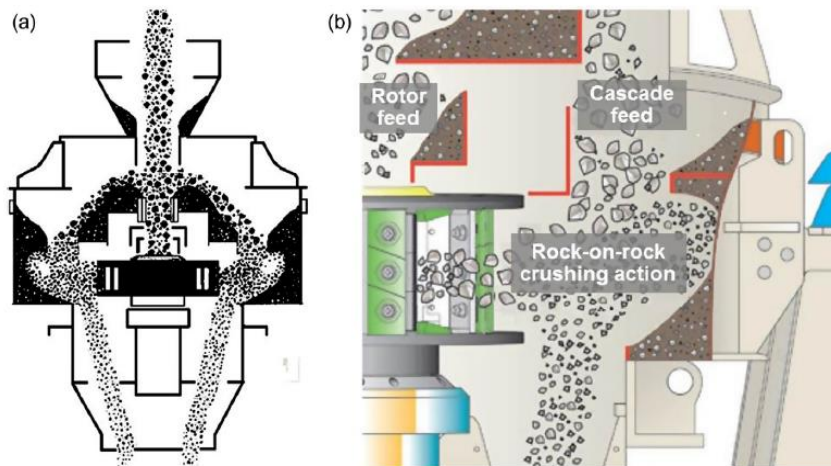
*Nota:* Configuración básica con uso de separadores magnéticos. Figura adaptada de "Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control", por Mular et al., 2002.

- **Chancadora vertical de impacto**

Este tipo de equipos están diseñados para utilizar la aceleración como la masa para la generación de la fuerza capaz de fragmentar los pebbles, según este tipo de chancadoras combinan trituración por impacto y aceleración de las partículas generados por un rotor que ingresan violentamente a las partículas hacia la cámara de trituración donde la reducción de partículas se da principalmente por el impacto entre rocas por efectos de la fuerza centrífuga generando atricción y abrasión, este mecanismo se observable en la

**Figura 5**

*Chancadora vertical de impacto*



*Nota:* Configuración básica con uso de separadores magnéticos. Figura adaptada de “Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control”, por Mular et al., 2002.

- **Chancadora cónica**

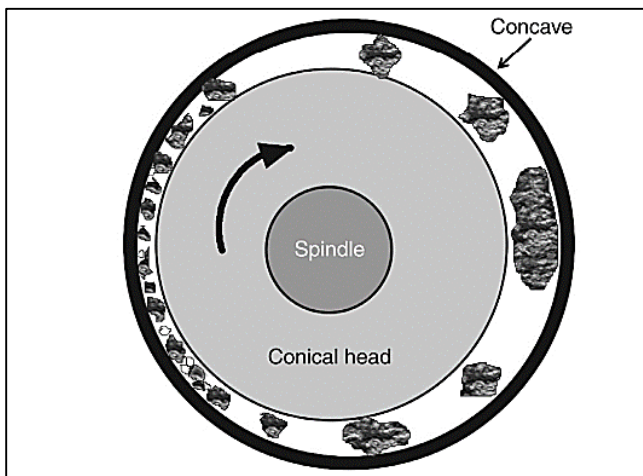
Es esencialmente un tipo de chancadora giratoria modificada, actualmente existen chancadoras giratorias con potencia instalada de hasta 2500 HP, tal es el caso de la minera First Quantum Minerals en Zambia, la cual tiene una capacidad de procesamiento de hasta 4500 t/h, esta alta capacidad de procesamiento permite excluir el uso de chancadoras cónicas secundarias y terciarias; el mecanismo de fragmentación ocurre por la compresión que genera el cabezal sobre el mineral cuando este está girando lentamente sobre una trayectoria excéntrica, el grado de inclinación del cabezal esta diseñado para evitar atoros, esta característica permite además entregar un material más homogéneo con tamaños de partículas desde 0,3 a 2 cm, finalmente estos equipos poseen sistemas de accionamiento hidráulico que liberan la carga en el caso de que algún material no deseable como trozos de hierro o minerales extremadamente duros, esto con la finalidad de proteger el material constituyente de la chancadora.

En la Figura 6, tomada del libro de Gupta & Yan (2016) se puede apreciar el movimiento que realiza el cabezal para triturar el material cuando el manto aprieta este sobre el cóncavo, el movimiento se repite reduciendo

cada vez más el mineral conforme el cabezal complete su ciclo de giro, el material cae cuando alcanza un tamaño menor al setting de la chancadora.

### Figura 6

#### *Movimiento del cabezal cónico*



*Nota:* Movimiento excéntrico en chancadora cónica. Figura adaptada de “Mineral processing design and operations : an introduction”, por Gupta & Yan, 2016.

### 2.6. Circuitos de operación

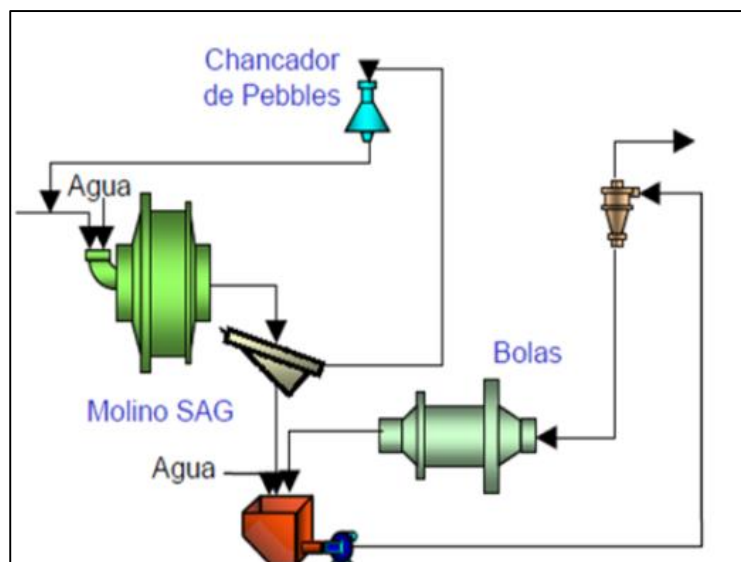
Es ampliamente difundido a nivel mundial la configuración molino SAG/ molino de bolas, este sistema a logrado contribuir en el procesamiento de minerales de cobre y oro de baja ley principalmente por el alto tonelaje procesado.

Existen variantes dentro de la molienda SAG, sin embargo, son típicos dos configuraciones en la molienda SAG, SABC-A y SABC-B, ambos comprenden la utilización de los siguientes equipos:

- Molino SAG
- Molino de bolas
- Chancadora de pebbles
- Hidrociclones

**Figura 7**

*Configuración SABC-A*



*Nota:* El producto del chancado de pebbles es retornado hacia molienda SAG. Figura adaptada de “Incremento de throughput en la etapa de molienda SAG, para la optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.”, por U-cursos, Rojas, Roly, 2019.

La diferencia radica básicamente en la disposición final de los pebbles chancados, en el circuito SABC-A retorna como alimento al molino SAG, en tanto que en la configuración SABC-B pasa directamente como alimento del molino de bolas (U-cursos, 2014, p. 70).

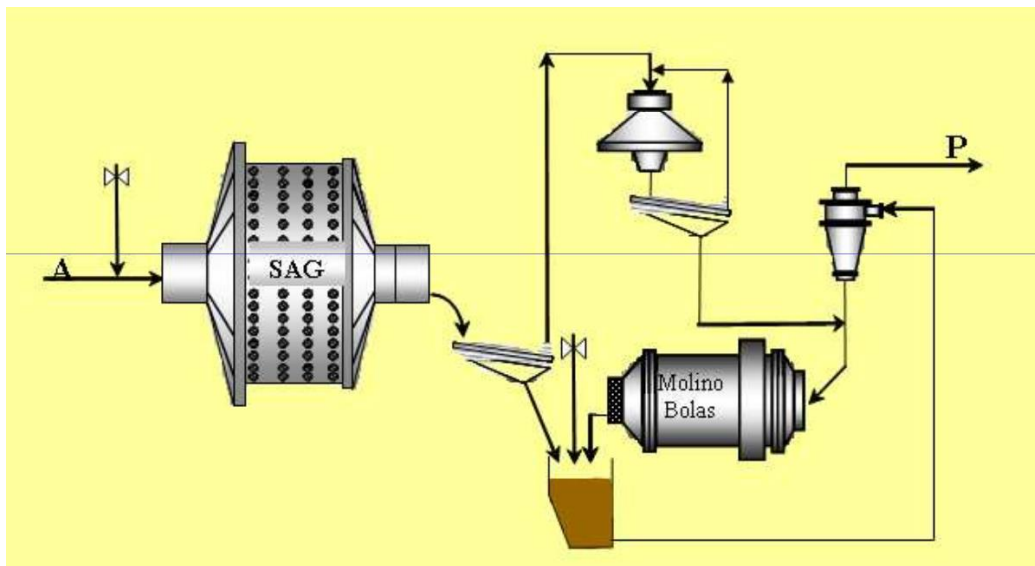
Wills et al., (2016) describe un ejemplo de configuración SABC-A instalado en la mina australiana Cadia Hill Gold, como configuración básica se describe una línea de molienda con molino SAG de 12 metros de diámetro y 6,1 m de longitud, dos chancadoras de pebbles y dos molinos de bolas instalados en paralelo en circuito cerrado con hidrociclones, gracias a esta configuración se logra obtener una descarga final de P80 150  $\mu\text{m}$ , para este cometido la descarga del molino SAG enviado hacia los hidrociclones menor a 12 mm. se junta con la descarga del molino de bolas, el material grueso conformado por los pebbles proveniente de la descarga del trommel es procesado con dos chancadoras seteadas a P80 12 mm, el material fino cae hacia una faja que alimenta al molino SAG.

El mismo autor hace referencia que en diferentes plantas que tratan pórfidos de cobre en la minería chilena, utilizan el circuito abierto denominado SABC-B donde el producto del chancado de pebbles es descargado directamente sobre la línea de alimentación del molino de bolas, tal es el caso

de la minera Los Bronces, donde el producto generado en la chancadora de pebbles es transportado hacia la alimentación de tres molinos de bolas (Wills et al., 2016, p. 172).

**Figura 8**

*Configuración SABC-B*



*Nota:* El producto del chancado de pebbles es enviado hacia molienda de bolas. Figura adaptada de “Operaciones de Conminución”, por U-cursos, Universidad de Chile., 2014.

## 2.7. Simulación de chancado de pebbles

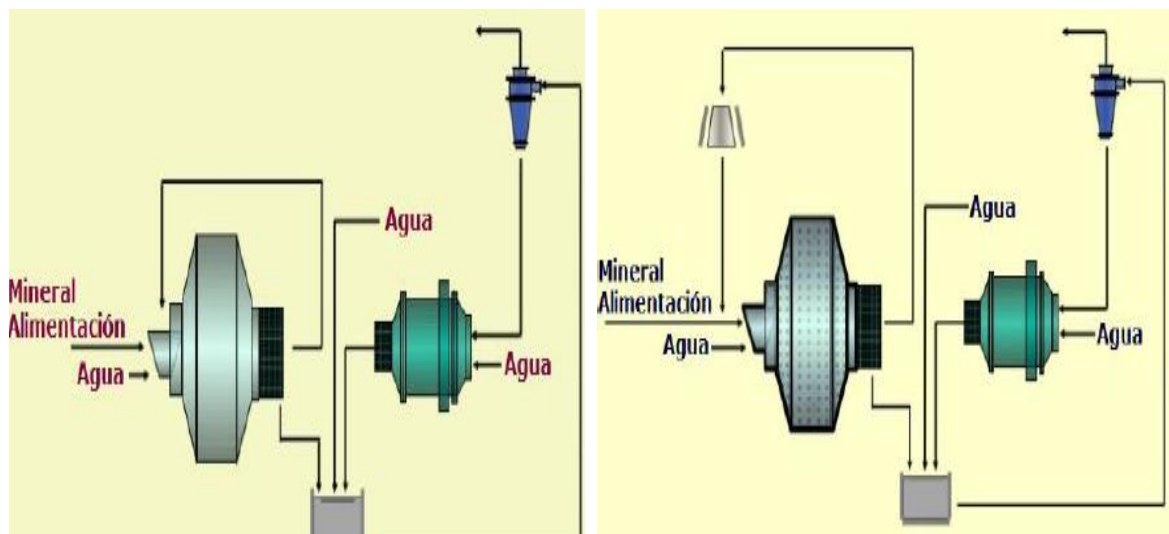
Se presenta como caso práctico el trabajo desarrollado por Pino (2018) “*Efectos del pre-chancado en operación de molienda SAG, cía. contractual minera candelaria*” donde el uso del simulador JKSimMet permitió la

evaluación de la instalación de un circuito de chancado en la alimentación del molino SAG, a fin de disminuir el consumo específico de energía (CEE).

La siguiente imagen hace referencia a dos situaciones, la primera, operación normal sin instalación de sistema de pre-chancado y la segunda, operación simulada con instalación de chancadora.

### Figura 9

*Circuito de molienda antes y después*



*Nota:* La figura muestra dos situaciones, la primera el circuito convencional con de circuito cerrado de molienda SAG, la segunda muestra la implementación de chancado de pebbles en circuito cerrado en molienda SAG”, adaptado de Pino (2018), pp. 20.

El circuito de molienda SAG en operación normal presenta el siguiente cuadro de operación en su alimentación:

**Tabla 2**

*Flujo de alimentación y descarga del SAG*

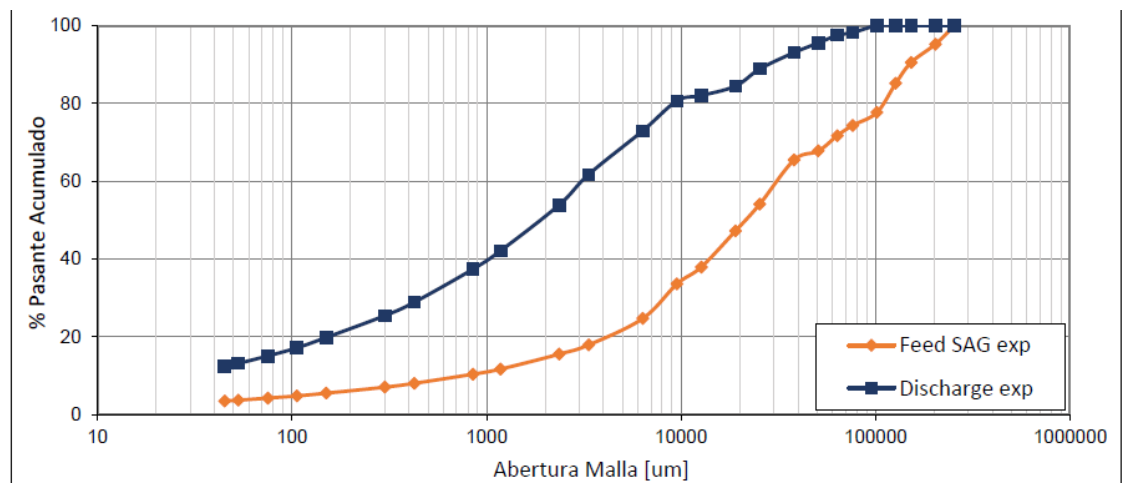
flujo	t/h
alimentación	1653,90
sobretamaño (zaranda)	328,05
pasante (zaranda)	1325,86
descarga	1653,90

*Nota:* Datos operativos en molienda SAG de la empresa minera Candelaria, Chile, año 2011. Adaptado de Pino (2018), pp. 20.

El muestreo realizado en la alimentación y descarga del molino SAG, presenta la siguiente distribución granulométrica:

**Figura 10**

*Perfil granulométrico alimentación inicial SAG*



*Nota:* Datos operativos en molienda SAG de la empresa minera Candelaria, Chile, año 2011. Los gráficos muestran la alimentación y descarga del molino SAG en operación normal antes de la instalación de la chancadora de pebbles.

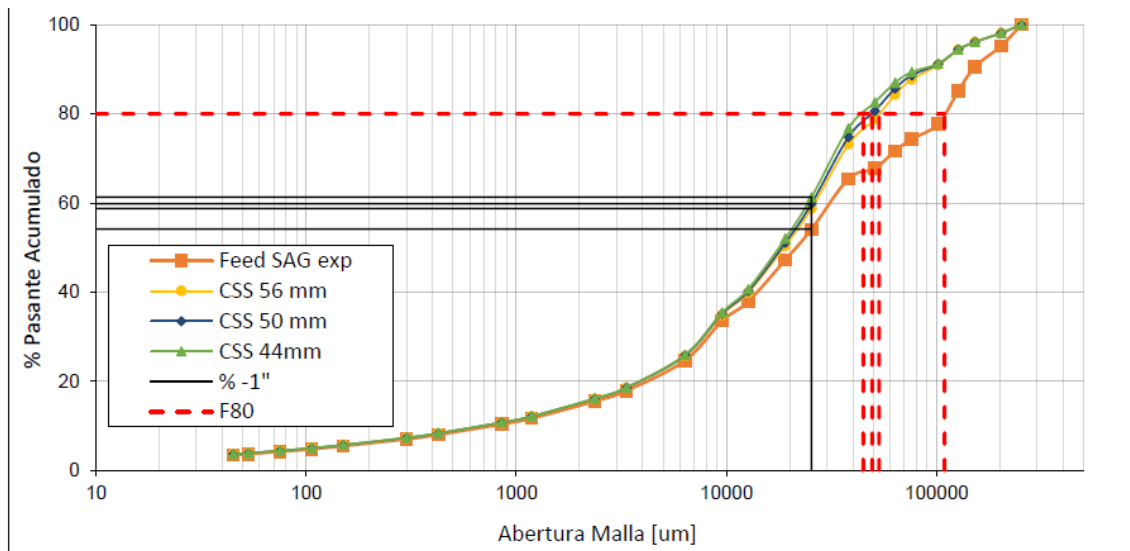
Adaptado de Pino (2018), pp. 39.

De acuerdo con el perfil granulométrico, la alimentación del molino presenta un porcentaje de 54,11 % de malla -1 pulgada (25 400 um).

Las simulaciones efectuadas utilizando el programa JKSimMet. contempló la instalación de un circuito de pre-chancado en la alimentación del molino SAG, se evaluó tres aberturas o settings de la chancadora tipo cónica: 44, 50 y 56 mm. Los resultados obtenidos establecieron el siguiente perfil granulométrico:

**Figura 11**

*Perfil granulométrico alimentación simulada SAG*



*Nota:* Datos simulados en molienda SAG. Los gráficos muestran la alimentación del molino SAG en operación simulada con la instalación de la chancadora de pebbles. Adaptado de Pino (2018), pp. 56.

Se evidencia que en las tres situaciones se logra incrementar el porcentaje de finos en la alimentación al molino SAG (líneas amarillo, azul y verde), tomando como referencia la línea en naranja (alimentación sin chancado), este incremento de finos permite disminuir el F80 en la alimentación SAG, tal como se muestran los valores obtenidos de la simulación en la siguiente figura:

**Figura 12**

*Generación simulada de finos en alimentación SAG*

	Sin Pre-chancado	Simulación con Pre-chancado		
		CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
-1", %	54.11	61.31	59.84	58.77
F80, pulg	4.20	1.76	1.94	2.10
F80, mm	109.2	44.8	49.3	53.5

*Nota:* Datos simulados en molienda SAG. El cuadro muestra la disminución de finos generados en la alimentación del molino debido a la instalación de la chancadora de pebbles. Adaptado de Pino (2018), pp. 56.

Estos valores obtenidos son relevantes si se considera que el ingreso de material más fino en la alimentación SAG, permite disminuir su consumo específico de energía, de acuerdo con los valores presentados en la siguiente figura, en las tres situaciones de setting, se logra incrementar el pasante de

malla 1 pulgada, razón por la cual el tonelaje o rendimiento del molino se incrementa.

**Figura 13**

*Resultados simulaciones SAG con pre-chancado*

	Simulación Sin Pre-chancado	Simulación con Pre-chancado		
		CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
-1", %	41.76	46.61	44.93	43.70
Rendimiento, t/h	1680.6	2029.7	2007.6	1983.6
Potencia, kW	12264	12264	12264	12264
CEE, kWh/t	7.30	6.04	6.11	6.18

*Nota:* Datos obtenidos de la simulación en molienda SAG. El cuadro muestra que la instalación de la chancadora de pebbles es favorable en el tonelaje procesado del molino. Adaptado de Pino (2018), pp. 60.

A partir de los datos anteriores, se deduce una disminución de hasta 17,20 % en el CEE del molino; así mismo, el decrecimiento en el tamaño de partícula en la alimentación representa una clara ventaja al poder procesar más material. En ese sentido, los datos obtenidos también muestran incrementos sustanciales en el rendimiento operativo del molino, logrando una mejora de hasta 20,77 % en este aspecto.

**Figura 14**

*Variaciones en simulación SAG con pre-chancado*

	Referencia CCP CSS 50 mm	Simulación con Pre-Chancado		
		CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
Finos -1"	+10%	+11.69%	+7.59%	+4.65%
Rendimiento	+15%	+20.77%	+19.45%	+18.03%
Potencia	-	-	-	-
CEE	-15%	-17.20%	-16.29%	-15.28%

*Nota:* Datos obtenidos de la simulación en molienda SAG. El cuadro muestra que la instalación de la chancadora de pebbles es favorable en el consumo específico de energía del molino. Adaptado de Pino (2018), pp. 60.

## CONCLUSIONES

- La revisión bibliográfica desarrollada en el presente trabajo permite destacar el impacto generado en la implementación de chancadoras de pebbles para el tratamiento del mineral sobre tamaño de molienda SAG desde perspectivas técnicas y económicas. Desde un punto de vista técnico, podemos destacar tres grandes beneficios operativos que se obtiene al complementar los circuitos de molienda SAG con chancadoras de pebbles:
  - Mayor capacidad de molienda
  - Menor desgaste de revestimiento interno del molino
  - Granulometría final más reducida del circuito de molienda

Las ventajas operativas mencionadas son obtenidas a partir de una menor carga de trabajo al contar con una alimentación más fina, por lo que también puede deducirse las siguientes ventajas económicas:

- Menor consumo energético
- Menor costo operativo y mantenimiento
- Mayor productividad

- En cuanto a la descripción de la molienda SAG, la investigación realizada da cuenta que es principalmente usada como molienda primaria por su capacidad de tratar minerales medianamente duros con granulometría intermedia, permitiendo prescindir de chancado secundario y terciario.
- La generación de pebbles en molienda SAG representa un problema bastante común, este material está asociado directamente con la disminución de la eficiencia de molienda, desgaste de componentes internos como forros y bolas; sin embargo, al ser un problema recurrente existen estrategias que permiten reducir los aspectos negativos mencionados, de manera que la instalación de un sistema de chancado de pebbles representa la alternativa más viable teniendo en cuenta que existe operaciones alrededor del mundo que hacen uso trituración de pebbles.
- Los tipos de chancadoras de pebbles más comúnmente usadas en la actual industria son las chancadoras cónicas verticales y verticales de impacto cuya característica principal para la reducción de partículas es el uso de la compresión e impacto como fuerzas de trituración.
- Finalmente, el presente trabajo dio cuenta de la importancia del uso de chancadoras pebbles en el procesamiento de minerales duros que no pueden ser tratados solo por molienda SAG, empresas líderes de la gran

minería peruana se sirven de esta tecnología a fin de optimizar sus eficiencias energéticas, tal es el caso de empresas como Antamina, Yanacocha, Antapacay, destacando entre las mencionadas la minera Las Bambas donde se procesa 380 000 TM/día. Así mismo, el caso práctico presentado concluye mediante simulación que se puede lograr un incremento en el porcentaje de finos en la alimentación del molino SAG con lo que es posible disminuir el consumo energético específico (CEE) e incrementar el tonelaje de alimentación, estos valores dependen del setting de la chancadora, de acuerdo con el trabajo referenciado se logra obtener una disminución de 16,29 % en el CEE y un incremento de 327 t/h en la alimentación para una configuración de 50 mm en el setting logrando generar 7,59 % de finos en la alimentación.

## **RECOMENDACIONES**

- Es importante considerar las características intrínsecas del mineral, la capacidad de molienda y los objetivos de la operación al tomar la decisión de utilizar chancadoras de pebbles que complementen al circuito de molienda primaria SAG.
- Es importante realizar los balances másicos respectivos para medir la productividad alcanzada por la extracción del material de "tamaño crítico" denominado pebbles y su trituración con posterior retorno al molino primario.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antamina. (2006). *Manual de entrenamiento - área de molienda*.  
<https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-ingenieria/ciencias-sociales/pdf-chancadoras-de-pebbles-compress/89338714>
- Armas, H., & Poma, J. (2013). *Evaluación del consumo de energía eléctrica en la operación de conminución de la planta concentradora de Huari* [Universidad nacional del centro del Perú].  
[https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/577/TIMM\\_23.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/577/TIMM_23.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Blanco, E. A. (2017). *Tecnología mineralúrgica*.  
[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8.\\_molienda.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf)
- Campoverde, J., & Díaz, S. (2020). *Análisis de eficiencia de molienda seca SAG para una mena de sulfuros* [Universidad del Azuay].  
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9927/1/15557.pdf>
- Cortés, D. (2018). *Evaluación el efecto de mejoras en tronadura y pre-chancado sobre el rendimiento del molino SAG*.  
<http://hdl.handle.net/11673/39986>

- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral processing design and operations: an introduction*.
- Ministerio de energía y minas - Colombia. (2003). *Glosario técnico minero*.
- MINSUS. (2022). *Predicción de consumo específico de energía en molienda SAG*. Equipo UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA – PERU.  
<https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2022/04/resumen-peru-prediccion-de-consumo-especifico-de-energia-en-molienda-sag-aplicando-machine-learning.pdf>
- Mular, A. L., Halbe, D. N. (Doug N.), Barratt, D. J. (Derek J.), & Society for Mining, M. (2002). *Mineral processing plant design, practice, and control proceedings*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Pino, I. (2018). *Efectos del pre-chancado en operación de molienda SAG, CIA. Contractual minera Candelaria* [Universidad de Concepción].  
[http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3216/4/Tesis\\_Efectos\\_del\\_prechancado\\_en\\_operacion.Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3216/4/Tesis_Efectos_del_prechancado_en_operacion.Image.Marked.pdf)
- Schlesinger, M. (2011). *Extractive metallurgy of copper* (Fifth Edition).
- Sepúlveda, J. (2022). *Guía práctica para la optimización de la eficiencia energética en la molienda de minerales*. J-Consultores Ltda.

<https://4echile.cl/wp-content/uploads/2022/01/GIZ-GUIA-PRACTICA-OPTIMIZACIÓN-MOLIENDA.pdf>

Silva, M. (2013). *Variables operacionales y su influencia en la operación, pro optimización del consumo energético en la molienda SAG* [Universidad de Chile].

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116302/Variables-operacionales-y-su-influencia-en-la-operacio%CC%81n-pro-optimizacio%CC%81n.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

SNMPE. (2008). *Antamina inaugura planta chancadora de pebbles*. Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. <https://www.snmpe.org.pe/prensa/notas-de-prensa/notas-de-prensa-de-asociados/671-antamina-inaugura-planta-chancadora-de-pebble.html>

U-cursos. (2014). *Operaciones de conminución*. Universidad de Chile, Ingeniería Civil de Minas. [https://www.u-cursos.cl/diplomados/2011/0/DGMMC-4/2/material\\_docente/bajar?id\\_material=397825](https://www.u-cursos.cl/diplomados/2011/0/DGMMC-4/2/material_docente/bajar?id_material=397825)

Wills, B. A., Finch, J. A., & Wills, B. A. (Barry A. (2016). *Wills mineral processing technology : an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (Eighth edition).