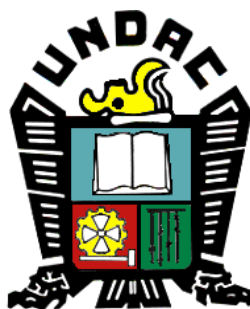


**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**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. - 2019**

**Para optar el título profesional de**

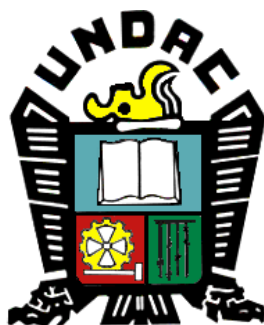
**Ingeniero Metalurgista**

**Autor: Bach. Rogelio Roly ROJAS RUPAY**

**Asesor: Dr. Sc. Hildebrando Anival CÓNDOR GARCÍA**

**Cerro de Pasco – Perú – 2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**METALÚRGICA**



**TESIS**

**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. - 2019**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

**Mg. Mg. Eusebio ROQUE HUAMÁN      Mg. José Elí CASTILLO MONTALVÁN**

**PRESIDENTE**

**MIEMBRO**

**Mg. Manuel Antonio HUAMÁN DE LA CRUZ**

**MIEMBRO**

..

## **DEDICATORIA**

A mis padres Félix y Guillermina por el apoyo que me brindaron durante mi formación profesional; gracias a ellos, soy la persona de ahora, mi amor y gratitud eterna para ellos.

A la compañera de toda mi vida, a la que amo, con toda el alma Rosario, la persona que me inspiró, con sus consejos para realizar el presente trabajo.

A mis hijos Leonardo y Sophia, son las personas que más adoro en esta vida y son la inspiración de todos mis días de labor.

A mis hermanos, quienes en todo momento me dieron y me dan el apoyo incondicional en cualquier proyecto que emprendo y sus consejos sabios e incondicionales.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

## **RECONOCIMIENTO**

Deseo dar mis sinceros reconocimientos de estima personal a los docentes de la Escuela de formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica quienes aportaron sus conocimientos en mi formación profesional.

Expreso mis reconocimientos de inmensa gratitud a mis familiares por el apoyo incondicional en mi formación profesional y mi vida cotidiana.

Así mismo doy mi reconocimiento al personal Staff, empleados y obreros de la Compañía Mineral Antamina por el apoyo, sugerencias para hacer realidad la presente investigación.

## RESUMEN

Operadores de plantas concentradoras mineras, el área de mantenimiento de planta, el área de planeamiento y confiabilidad, la superintendencia de chancado y molienda, están cada vez más interesadas en alcanzar y demostrar un desempeño eficiente en sus operaciones de molienda y así mejorar la calidad de sus productos, en base a su política y objetivos como grandes compañías mineras, la materia del campo de producción con calidad, por lo dicho el trabajo de investigación tiene la finalidad poner a disposición el procedimiento de optimización del molino SAG para mejorar la calidad del concentrado del mineral y aumentar el tonelaje de tratamiento, que es requerido para satisfacer las altas demandas de producción de concentrados de mineral cobre.

En el presente trabajo, se estudió la capacidad del software JKSimMet y su modelo para la molienda SAG de representar el comportamiento de la Función Selección, Función Fractura y transporte de material de un molino a escala industrial. Para ello, se desarrolló un muestreo de una planta de conminución de manera de obtener la cantidad de información suficiente para desarrollar un balance de masas del circuito de molienda, permitir además la obtención de muestras de mineral para llevar a cabo los diferentes ensayos de caracterización de dureza, y, en paralelo, obtener los parámetros operacionales de los equipos principales del circuito de molienda. Una vez obtenida la información, se utilizó el software JKSimMet para calibrar los parámetros de modelo del molino SAG que representaran de mejor manera el comportamiento del mismo. El presente trabajo contiene el desarrollo y la formulación de Modelos Matemáticos del proceso de la Molienda en un Molino SAG, centrandose su aplicación para la simulación y verificando su aplicabilidad en el circuito de molienda primaria.

Es comprensible entonces la gran atención que reciben de parte de todos aquellos que directa o indirectamente son responsables de su productividad. En los últimos años se ha avanzado claramente en la Simulación Matemática de la Molienda a través de los Parámetros propuestos por Leonard G. Austin.

El Modelo Fenomenológico de Conminución está basado en la ecuación general del Balance Poblacional, que depende de dos conceptos:

- Velocidad de fractura de cada partícula - Moliendabilidad (Función Selección)
- Distribución Granulométrica de los fragmentos producidos como consecuencia de un evento dado de fractura (Función Fractura).

Los modelos Matemáticos usados serán capaces de predecir el efecto de las condiciones operacionales y de diseño en el desempeño del circuito con una precisión aceptable en la obtención de parámetros. Añadido a esto, se suman nuevas herramientas al desarrollo teórico y constitutivo del esfuerzo por entender la dinámica de los sistemas de molienda, las computadoras digitales y el método de los elementos discretos.

**Palabras clave:** Molienda SAG, Optimización de variables

## **ABSTRACT**

Operators of mining concentrator plants, the plant maintenance area, the planning and reliability area, the crushing and grinding superintendence, are increasingly interested in reaching and demonstrating efficient performance in their milling operations and thus improving the quality of its products, based on its policy and objectives as large mining companies, the matter of the production field with quality, therefore the research work has the purpose of making available the SAG mill optimization procedure to improve the quality of the concentrate of the ore and increase the treatment tonnage, which is required to meet the high production demands of copper ore concentrate.

In this work, the ability of the JKSimMet software and its model for SAG milling to represent the behavior of the Selection, Fracture Function and material transport of an industrial scale mill was studied. For this, a sampling of a comminution plant was developed in order to obtain the sufficient amount of information to develop a mass balance of the grinding circuit, also allowing the collection of mineral samples to carry out the different characterization tests of hardness, and, in parallel, obtain the operational parameters of the main equipment of the grinding circuit. Once the information was obtained, the JKSimMet software was used to calibrate the model parameters of the SAG mill that best represent its behavior.

This paper contains the development and formulation of Mathematical Models of the Grinding process in a SAG mill, focusing its application for simulation and verifying its applicability in the primary grinding circuit.

It is understandable then the great attention they receive from all those who directly or indirectly are responsible for their productivity. In recent years there has been clear progress in the Mathematical Simulation of Grinding through the Parameters proposed by Leonard G. Autin.

The Phenomenological Model of Comminution is based on the general equation of the Population Balance, which depends on two concepts:

- Fracture speed of each particle – Grinding (Selection Function)
- Granulometric distribution of the fragments produced as a result of a given fracture event (Fracture Function).

The Mathematical models used will be able to predict the effect of the operational and design conditions on the performance of the circuit with acceptable accuracy in obtaining parameters. Added to this, new tools are added to the theoretical and constitutive development of the effort to understand the dynamics of grinding systems, digital computers and the method of discrete elements.

**Keywords:** SAG grinding, variable optimization.



## INTRODUCCIÓN

A fines del año 2018, el envío de mineral M4B de la nueva etapa de explotación denominada Fase VIII, se realiza de forma continua y en proporciones de hasta 50%, afectando en forma negativa al tonelaje de procesamiento en planta concentradora, debido a la dureza del mineral. El impacto al tonelaje básicamente ocurre en los molinos SAGs por el incremento de rocas con tamaños intermedio (2,0 a 4,0”), aumentando el tiempo de residencia al interior del molino, carga total, altas presiones en los descansos de los molinos y alta generación de Pebbles (hasta 900 tph).

A partir del mes de enero se realizaron varias campañas de muestreo del circuito de molienda con mineral M4B procedente de la Fase VIII en proporciones mayores al 50% y con tonelaje de procesamiento en planta restringido, por debajo del objetivo (6500 tph).

Las muestras de mineral tomadas de la alimentación al molino SAG, fueron procesadas y analizadas en un laboratorio externo para la determinación de los parámetros de conminución (DWT). En base a esta información y usando el Software JKSimMet se realizó: el balance, ajuste del circuito y las simulaciones para evaluar los parámetros que influyen de forma directa en el incremento del throughput en la etapa de molienda y la optimización de la función selección y función fractura del molino SAG.

Se realizó un análisis comparativo respecto a la variación de la eficiencia operacional para diferentes velocidades de rotación (RPM) del molino SAG, considerando además diferentes niveles de desgaste en los Shell Liners y diferentes porcentajes de carga de

bolas, para determinar la velocidad de rotación óptima referencial y de esta forma operar el molino a diferentes condiciones y niveles de desgaste de los Shell Liners.

Finalmente se realizó una evaluación en el molino SAG N°1, reemplazando al 100% las bolas de 5” por bolas de 5,5”. Finalizado el periodo de purga se realizó una campaña de muestreos integral del circuito de molienda con mineral M4B (50% proporción Fase VIII) y con tonelaje restringido de 4097 tph (Objetivo: 6500 tph). En base a esta información y usando el Software JKSimMet, se realizaron las evaluaciones del impacto en el throughput y variables de la función selección y fractura.

El trabajo de investigación está conformado de los siguientes capítulos:

Capítulo I: Se da a conocer sobre el problema de investigación, con la identificación y determinación del problema, formulación del problema, formulación de objetivos, la justificación y limitaciones.

Capítulo II: Está conformado por la parte teórica que sustente el trabajo de investigación referente a la molienda SAG.

Capítulo III: Integrado por el tipo, método, diseño de investigación adjuntando las técnicas de investigación. Doy a saber que el trabajo es de índole técnico.

Capítulo IV: Se analiza los resultados de la investigación técnicamente. Llegando a la conclusión, recomendaciones.

## INDICE

DEDICATORIA  
RECONOCIMIENTO  
RESUMEN  
ABSTRACT  
INTRODUCCIÓN  
ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
<i>1.3.1. Problema principal .....</i>	<i>4</i>
<i>1.3.2. Problemas específicos .....</i>	<i>4</i>
<b>1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
<i>1.4.1. Objetivos generales .....</i>	<i>5</i>
<i>1.4.2. Objetivos específicos .....</i>	<i>5</i>
<b>1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>8</b>
<b>MARCO TEORICO.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. BASES TEÓRICAS - CIENTÍFICAS.....</b>	<b>9</b>

2.2.1. <i>Depósito tipo skarn.</i> .....	9
2.2.2. <i>EL skarn de Antamina.</i> .....	10
2.2.3. <i>Clasificación de los tipos de roca.</i> .....	12
2.2.4. <i>Molienda convencional.</i> .....	22
2.2.5. <i>Molienda semi-autogena (SAG).</i> .....	23
2.2.6. <i>Molino SAG.</i> .....	30
2.2.7. <i>Configuraciones de molienda SAG.</i> .....	38
2.2.8. <i>Elementos principales del molino SAG.</i> .....	40
2.2.9. <i>Dinámica de carga.</i> .....	44
2.2.10. <i>Operación y balance del molino SAG.</i> .....	47
2.2.11. <i>Variables de operación del molino SAG.</i> .....	53
2.2.12. <i>Variables manipulables.</i> .....	55
2.2.13. <i>Variables controladas.</i> .....	60
2.2.14. <i>Caracterización de la dureza del mineral para los molinos SAG.</i> .....	67
2.2.15. <i>Modelamiento de procesos metalúrgicos</i> .....	80
2.2.16. <i>Simulador metalúrgico.</i> .....	81
<b>2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS</b> .....	<b>84</b>
<b>2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS</b> .....	<b>86</b>
2.4.1. <i>Hipótesis general</i> .....	86
2.4.2. <i>Hipótesis específicos</i> .....	86
<b>2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES</b> .....	<b>87</b>
2.5.1. <i>Variable dependiente</i> .....	87
2.5.2. <i>Variable independiente</i> .....	87
<b>2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES</b>	<b>87</b>

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>88</b>
<b>METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>88</b>
<b>3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>88</b>
<b>3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>89</b>
<b>3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>89</b>
<b>3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA. ....</b>	<b>89</b>
<b>3.4.1. Población. ....</b>	<b>89</b>
<b>3.4.2. Muestra. ....</b>	<b>90</b>
<b>3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS. ...</b>	<b>90</b>
<b>3.5.1. Muestreo realizado al circuito de molienda.....</b>	<b>90</b>
<b>3.5.2. Inventario y preparación .....</b>	<b>94</b>
<b>3.5.3. Origen y características de las muestras.....</b>	<b>95</b>
<b>3.6.1. Preparación mecánica.....</b>	<b>95</b>
<b>3.6.2. Análisis granulométrico .....</b>	<b>96</b>
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>99</b>
<b>4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....</b>	<b>99</b>
<b>4.2.1. Caracterización del mineral. ....</b>	<b>100</b>
<b>4.2.2. Resultados de la prueba JK dropweight test - JKDWT.....</b>	<b>101</b>
<b>4.2.3. Resultados de la prueba SMC .....</b>	<b>102</b>
<b>4.2.4. Prueba BBWI (índice de trabajo bond bolas).....</b>	<b>102</b>
<b>4.2.5. Prueba Ai (índice de abrasión). ....</b>	<b>103</b>
<b>4.2.6. Análisis de velocidad óptima de molino SAG.....</b>	<b>104</b>
<b>4.2.7. Simulación del circuito de molienda primaria. ....</b>	<b>106</b>

<b>4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS.....</b>	<b>112</b>
<i>4.3.1. Distribución granulométrica del mineral alimentado.....</i>	<i>112</i>
<i>4.3.2. Análisis de la velocidad de rotación del molino SAG.....</i>	<i>116</i>
<i>4.4.1. Evaluación del nivel de llenado de bolas.....</i>	<i>117</i>
<i>4.4.2. Evaluación del tamaño de bola.....</i>	<i>120</i>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>4</b>

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

ANEXO

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.**

En un yacimiento minero en explotación, la variabilidad mineralógica y por ende su respuesta metalúrgica tiene mayor incidencia en etapas de profundización y expansión del tajo abierto, estas incertidumbres de cambio perjudican enormemente el plan de producción y cumplimiento de los objetivos de la empresa.

La producción de la compañía minera disminuyó significativamente al comenzar a tratar minerales Cu/Zn de una nueva etapa de explotación denominada Fase VIII, cuya mineralización se encuentra emplazada en rocas de muy alta competencia

(dureza alta), presentando menor tasa de procesamiento en la concentradora, afectando principalmente a la primera etapa de molienda (SAG), el material molido dentro de la cámara de molienda se acumula cerca del pie de la carga, resultando la formación de una cama de pulpa amortiguando el impacto de bolas lo cual reduce la ruptura por impacto de las partículas, a su vez reduce la atricción en la carga de cascada lo que reduce la molienda de partículas finas. Ambos aspectos reducen la capacidad del molino y la eficiencia de la molienda SAG, el material rechazado por el trommel debe recircularse al Molino SAG considerando su dureza y a la vez produciendo carga circulante en esta primera etapa de molienda.

## **1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El área de operaciones Mina, ha estado operando la chancadora primaria con un Setting entre 5 y 5½” hasta el año 2017 y durante los siguientes dos últimos años 2018 y 2019 tuvo el requerimiento operativo de incrementar la abertura del Setting de la chancadora hasta 7”, debido al incremento del mineral proveniente de la Fase VIII; caracterizado por presentar rocas competentes (dureza alta).

La chancadora primaria está restringida para operar con una mayor capacidad disponible y una configuración más ajustada; de acuerdo a los registros de años anteriores, si reducimos el Setting de la chancadora con la finalidad de obtener mayor cantidad de material fino, estaríamos impactando directamente la disponibilidad del equipo y obteniendo una producción posiblemente más baja. Sin embargo, con una configuración tan ajustada, el ingreso de cualquier objeto extraño de metal, como por ejemplo el diente de una cubeta, sería catastrófico.



El presente trabajo de investigación fue realizado en la etapa de molienda primaria de la concentradora, durante campañas de mineral M4B. En enero, se ejecutaron dos muestreos completos del circuito de molienda. Durante el transcurso de ambos muestreos el throughput del mineral M4B fue relativamente baja. El Muestreo 2 se realizó en condiciones de alimentación más fina y resultó en un incremento de la producción de 250tph en comparación con el Muestreo 1.

Se efectuó un balance de masa de los resultados de los muestreos y se encontró que eran consistentes y de buena calidad. Entonces se desarrollaron modelos de todos los equipos del circuito de molienda para realizar un estudio de simulación utilizando el software JKSIMMET.

### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

Realizar pruebas de caracterización de dureza a los minerales que se procesaran en la planta de beneficio. Determinar las variables que optimicen la función selección y función fractura de la molienda semiautogena y nos permitan incrementar la tasa de procesamiento diario (THROUGHPUT).

- Perfil granulométrico del mineral alimentado al molino SAG.
- Dureza del mineral.
- Tamaño de bolas.
- Nivel de Carga de bolas.
- Razón de recirculación de pebbles.
- Velocidad de giro del molino.

Las parrillas de descarga del molino SAG, deben tener un rediseño mejorado para evacuar una mayor cantidad de mineral molido. Monitorear el movimiento relativo de los medios moledores que impactan en el revestimiento y no sobre el mineral esto es debido a la velocidad crítica, se opera el molino al máximo de velocidad posible, pero con la restricción que la catarata de bolas caiga sobre el pie de carga para no dañar los revestimientos. Uso de herramientas de software (JKSimMet), modelos predictivos y simulaciones, con el objetivo de establecer estrategias de control y operación óptimas para maximizar el beneficio.

### **1.3.1. Problema principal**

¿Cómo realizar el 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.?

### **1.3.2. Problemas específicos**

1.1. ¿Cómo identificar los parámetros de cálculo de la función selección y fractura del molino SAG?

1.2. ¿Cuál será el impacto en el tonelaje, distribución granulometría y desempeño del molino al usar como medio molidor bolas de acero de 5,5 pulgadas?

1.3. ¿Cuál es el uso del software JKSimMet, para realizar los cálculos de

balance de masa, modelamiento y simulación del molino SAG?

## **1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivos generales**

Incrementar el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG, para optimizar las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- 1.- Identificar los parámetros de cálculo de la función selección y fractura del molino SAG para optimizar la molienda SAG.
- 2.- Determinar el impacto en el tonelaje, distribución granulometría y desempeño del molino al usar como medio moedor bolas de acero de 5,5 pulgadas.
- 3.- Determinar el uso del software JKSimMet, para realizar los cálculos de balance de masa, modelamiento y simulación del molino SAG.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo es importante porque a través de los modelos, simulaciones y trabajos en campo, nos permitirán conocer y evaluar el comportamiento de las

diferentes variables operacionales del molino SAG y de esta forma determinar el comportamiento de la carga al interior del molino.

- Si el material no es duro puede usarse el modo recirculación de pebbles mediante una faja transportadora. Alternativamente puede usarse un sistema de inyección de agua a presión para retornar las partículas gruesas dentro del molino SAG (Modo cañón).
  
- Cuando el material es duro, se utiliza el modo pebbles, que consiste en enviar la carga gruesa producto del trommel a dos chancadoras cónicas para efectuar la reducción de tamaño, y el producto de la chancadora retorna al molino SAG.

Para tomar la decisión es importante tener la información de las pruebas de caracterización de dureza y de consumo de energía de los tipos de mineral que se procesaran en la planta de beneficio. Entre estas se puede mencionar work index, pruebas de carga puntual y pruebas de JKTech DWT.

## **1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.**

La presente investigación solo considera datos obtenidos de las muestras de mineral Cu/Zn, provenientes de la nueva fase de explotación, sin embargo, los resultados de optimización también serán aplicados a otros tipos de minerales, los cuales beneficiaran su procesamiento debido a que presentan de mediana a baja dureza.

Como en todo proceso de conminución, la potencia demandada por un molino SAG es el factor determinante de su capacidad de procesamiento. El nivel de llenado, la densidad aparente de la carga y la velocidad de giro son las variables operacionales que a su vez determinan dicha Potencia.

El método de elementos discretos (DEM), se refiere a un esquema numérico que permite rotaciones finitas y desplazamientos de cuerpos discretos que interactúan con sus vecinos, por medio de leyes de contacto.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO.**

Actualmente se tiene un problema de producción de cobre, debido a la alta competencia del mineral, lo que dificulta alcanzar el nivel de producción planificado.

Los métodos para medir y mejorar la eficiencia de los equipos de molienda y chancado de plantas concentradoras fueron analizadas durante los últimos años en los Congresos Internacionales de Conminución, donde se presentan los avances para el diseño de plantas óptimas para el procesamiento de minerales. Para el entendimiento del criterio de optimización del molino SAG es necesario conocer la capacidad del equipo y realizar de acuerdo a los parámetros de diseño y la

filosofía de operación, saber la geometría del molino y todo en función a las variables de operación como la velocidad, el tamaño de las partículas, el tamaño de elementos molturantes, ya que estos influyen directamente en el consumo de energía y la capacidad del molino; entender la operación de conminución, la optimización del proceso de molienda, está basado hoy en día en sacarle el máximo de potencia al motor del molino de modo que para un consumo específico de energía dado por la dureza del mineral, se maximice la potencia, lo que nos permitirá maximizar con el principal objetivo de incrementar el tonelaje de tratamiento, para aumentar la disponibilidad mecánica y la confiabilidad de operación del molino SAG.

El desarrollo minero en nuestro país está creciendo en los últimos tiempos nuestro país, posee aproximadamente el 40 % de reservas de mineral de cobre mundialmente conocidas, especialmente en el sur hay avances de diferentes proyectos mineros, la conminución de minerales es de vital importancia en el desarrollo de nuestro país, ya que involucra operaciones y procesos unitarios de alto consumo energético; así en nuestro medio la energía eléctrica consumida en las plantas concentradoras de Toquepala y Cuajone, equivale al consumo de energía de las ciudades de Arequipa, Tacna, Moquegua y Puno, y por tanto nos da la justificación para priorizar el estudio de conminución en el molino SAG.

## **2.2. BASES TEÓRICAS - CIENTÍFICAS**

### **2.2.1. Depósito tipo skarn.**

El término skarn fue introducido por petrólogos metamórficos suecos para designar rocas metamórficas regionales o de contacto constituidas por silicatos de Ca, Mg y Fe derivados de un protolito de calizas y dolomitas en las cuales se ha introducido metasomáticamente grandes cantidades de Si, Al, Fe y Mg. Se entiende por skarn rocas que contienen minerales calcosilicatados, tales como, por ejemplo: diópsido, wollastonita, granate andradita y actinolita. Estas comúnmente ocurren en aureolas metamórficas de contacto en torno a plutones que intruyen secuencias calcáreas. A este tipo de rocas metamórficas se asocia un variado grupo de depósitos minerales extremadamente irregulares, los que pueden formar lenguas de mena que se extienden a lo largo de cualquier estructura planar (estratificación, diaclasas, fallas, etc). Los cuerpos de mena pueden terminar abruptamente con cambios en la estructura.

El término SKARN es ampliamente utilizado y es adecuado para referirse a este tipo de depósitos relacionados a aureolas de contacto de intrusiones dentro de secuencias calcáreas (calizas, dolomitas). Estas últimas rocas formadas por calcita o dolomita ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) se convierten en mármoles, rocas córneas calcosilicatadas (hornfels) y/o skarns por el efecto del metamorfismo de contacto.

### **2.2.2. EL skarn de Antamina.**

El depósito es un skarn de cobre muy desarrollado conteniendo zinc, plata, molibdeno, plomo y bismuto formado por la intrusión del cuerpo de cuarzo



monzonita en las calizas. Las características de una zona de skarn dependen de la naturaleza de la roca intruída y las emanaciones activadas por el cuerpo intrusivo. Se reconocen dos tipos de alteración: recristalización o reacomodo de los constituyentes presentes en las rocas y adición de materiales. La mayoría de los depósitos de skarn muestran ambos aspectos. Los skarn más evidentes se desarrollan cuando la roca encajonante es una roca sedimentaria de composición carbonatada. La depositación de minerales en los depósitos de skarn típicamente muestra controles estructurales y estratigráficos. La litología del skarn generalmente es zonada a partir del centro hacia los bordes.

El depósito muestra características tanto de un skarn de cobre como de zinc. Los skarns de cobre normalmente se forman en asociación proximal con el intrusivo que es la fuente de los metales, mientras que los skarns de zinc generalmente se forman distales a la fuente de fluídos. Los estudiosos del depósito de Antamina creen que los fluídos mineralizantes se originaron en una fuente distal más profunda y por lo tanto no estuvieron en equilibrio con el intrusivo presente en el valle actual. Esto resultó en una reacción de los fluídos tanto en los intrusivos como en las calizas formando las unidades endoskarn y exoskarn. Se cree que los intrusivos previamente emplazados causaron un evento de metamorfismo termal formando los hornfels que rodean el depósito con wollastonita asociada y colapso en el volumen. Estas unidades luego actuaron como trampas para sucesivos eventos mineralizantes que forzaron a los fluídos a reaccionar con los intrusivos formando el endoskarn y limitaron la reacción hacia la roca circundante

formando los exoskarns. Se cree que los fluidos fluyeron a través de los contactos originales intrusivo-caliza y varios otros planos de debilidad estructural.

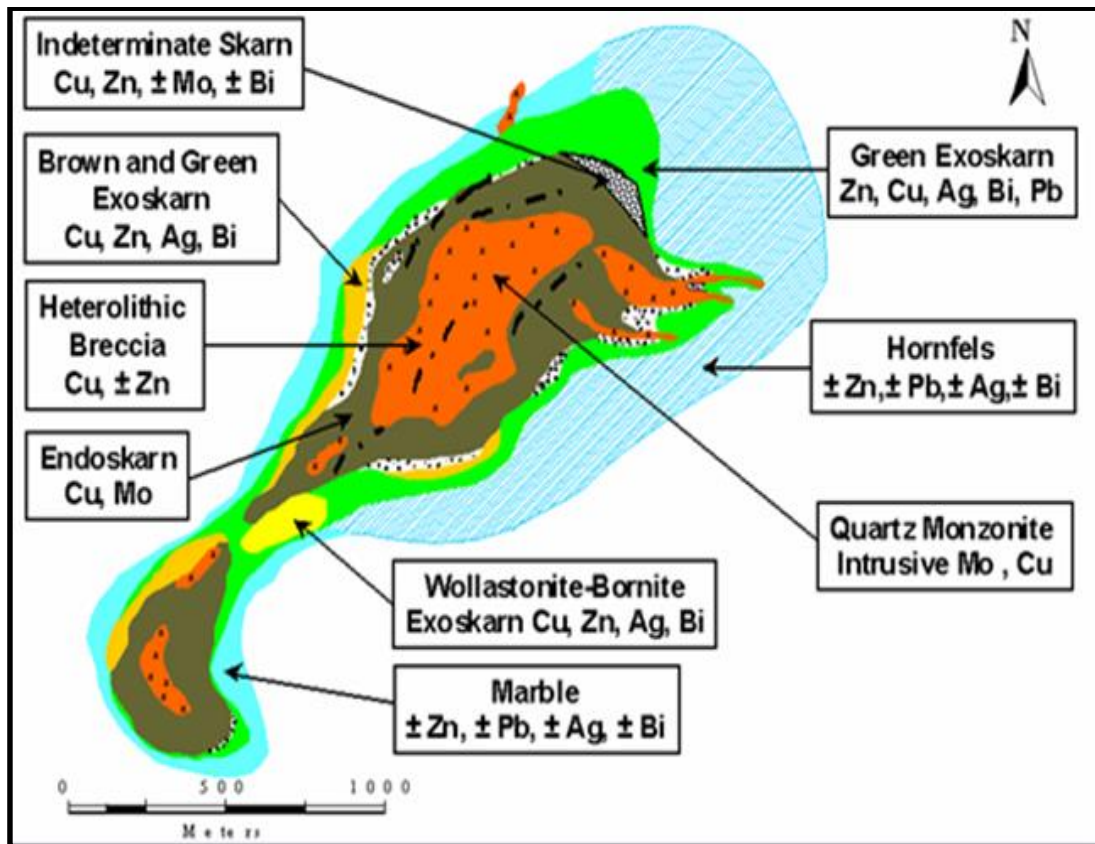
La mineralización se pudo extender distancias significativas del depósito a través de las fallas de sobre-escurrimiento, planos de falla, contactos con diques y a través de las unidades estratigráficas favorables. A medida que el sistema se desarrollaba se piensa que ocurrió una sobre presurización con un violento destape del sistema y la formación de las brechas hidrotermales. El sistema de la mineralización colapsó como resultado de este evento.

Después del evento de brecha apareció un último evento de mineralización como se evidencia por las venillas que cortan la brecha. Hay una fase final de alteración retrógrada muy débil generalmente evidente sólo en las áreas de debilidad estructural que permitieron el flujo de fluidos.

### **2.2.3. Clasificación de los tipos de roca.**

Actualmente hay 156 tipos de roca identificados y logueados en el depósito. El zonamiento general del skarn (mostrado en la Figura N° 2.2) a partir del núcleo intrusivo hacia afuera es como sigue: endoskarn de granate café, skarn indeterminado, exoskarn mixto de granate café y verde, exoskarn de granate verde, exoskarn de diópsida, exoskarn de wollastonita, hornfels, mármol, caliza. Las brechas heterolíticas compuestas de todos los tipos de skarn pueden ocurrir en todos los tipos de litología.

Figura N° 2.2: Plano esquemático mostrando el zonamiento típico Litológico/Metálico.



Fuente: Departamento de Geología

a) Intrusivos – geología, edad y estructura.

La intrusión fue previamente dividida en fases mineral-temprano, intra-mineral, mineral-tardío y post-mineral cada una dividida en varias subfases, inicialmente sobre la base del grado de alteración, la intensidad y el tipo de venilleo, la mineralización asociada y la ubicación. Este esquema fue reemplazado por una clasificación empírica de las rocas intrusivas basada en sus aspectos petrográficos en lugar de basarlo en sus inferencias de tiempo. Se reconocen 4 grandes tipos de intrusivos que se usaron en el relojero distinguiéndose por el tipo de fenocristales y abundancia. Ellos son: pórfido

de plagioclasa abundante, pórfido con plagioclasa abundante y feldespatos potásico, pórfido con plagioclasa abundante y megacristales de feldespatos potásico y pórfido de plagioclasa escasa con feldespatos potásico. Un tipo de intrusivo menor denominado pórfido de plagioclasa esparcida con hornblenda forma un dique en el área de Poderosa al extremo NE del valle.

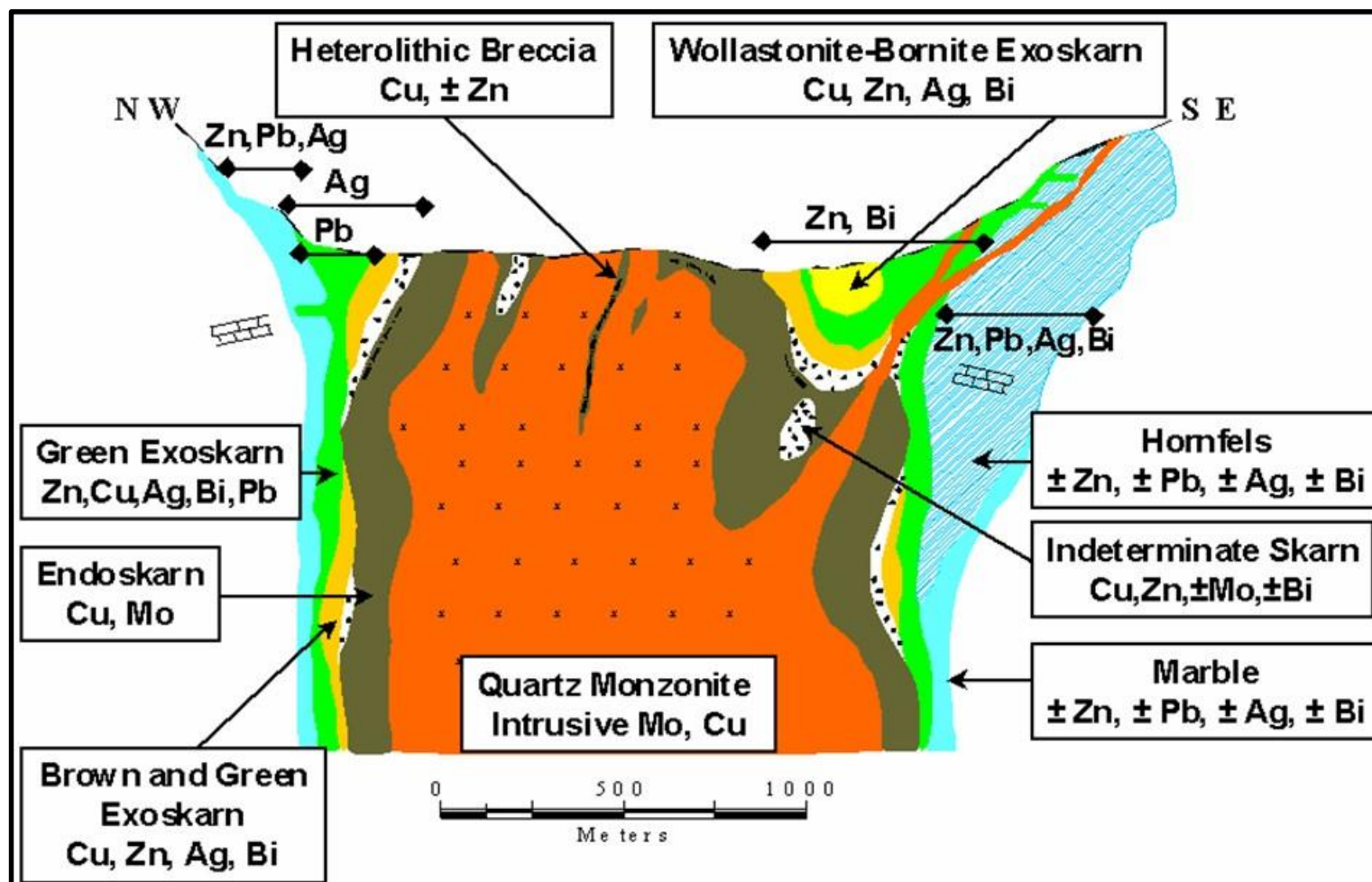
Aunque las relaciones de contacto entre los diferentes tipos de fase no están claras en todas partes, en general el pórfido de plagioclasa abundante es la fase más temprana y el pórfido con más matriz el último. Localmente, el pórfido de plagioclasa abundante contiene venillas en stockwork de cuarzo y alteración biotítica i.e. potásica. Este pórfido no skarnizado pero alterado localmente alberga mineralización diseminada y en venillas y menor calcopirita diseminada (0,2% Cu y 0,03% Mo). Los diques porfiríticos de plagioclasa esparcida cortan los pórfidos de plagioclasa abundante, el skarn y la brecha, y localmente contienen xenolitos de skarn.

#### b) Endoskarn

El endoskarn de granate rosa de grano grueso es uno de los dos tipos de endoskarn. Consiste de una matriz rica en plagioclasa blanco lechosa (distinguible de la matriz translúcida gris pálido del pórfido no skarnizado) encerrando grandes granates rosa y granates marrones más espaciados y mostrando relictos de textura porfirítica. Aparentemente no hay asociación paragenética de mineralización relevante con el desarrollo de endoskarn de grano grueso, la cual, aunque comúnmente contiene molibdenita diseminada sólo escasas manchas y/o venillas de calcopirita asociada con epidota. Logra

tener importancia como huésped de mineral gracias a las venillas de sulfuros tardíos que están asociados con alteración retrógrada y localmente conforman patrones paralelos. Los delgados intervalos de endoskarn de plagioclasa comúnmente ocurren entre el pórfido y el endoskarn de granate rosa de grano grueso. El endoskarn de plagioclasa raramente contiene mineralización económica de Cu y carece enteramente de Zn pero es un útil indicador de proximidad a la mineralización. El segundo mayor tipo de endoskarn es el endoskarn de granate rosa oscuro de grano fino que comúnmente alberga la brecha crackle o mosaico y constituye muchos de los fragmentos en los cuerpos de brecha heterolítica que cortan la roca intrusiva. El endoskarn rosa de grano fino se distingue del de plagioclasa de grano más grueso – o rosa – por el color, el tamaño de grano, la mineralogía y los relictos de textura porfirítica. La explicación más simple para su origen es que se formó por la relación del pórfido con los fluidos de brechamiento. Sin embargo, se puede haber formado adyacente a estructuras que posteriormente controlaron el brechamiento

Figura N° 2.3: Sección esquemática mostrando el zonamiento típico Litológico



Fuente: Departamento de Geología

c) Skarn indeterminado.

También se ha reconocido un skarn de origen indeterminado. Este es comúnmente café, de grano medio y granular, pero sobre todo es variable en textura, tamaño de grano y color. El skarn de granate café granular de grano medio con calcopirita intergranular se debería clasificar como exoskarn de granate café donde constituye el extremo de una gradación continua a partir del exoskarn de granate verde. El skarn de granate rosa oscuro que contiene venillas con salbandas cloríticas pero carente de relictos de textura porfirítica se debería clasificar como endoskarn si estuviera en contacto gradacional con el pórfido. Si estuvieran ausentes o ambiguas las características críticas y/o de variación gradacional para interpretar el skarn como endo- o exoskarn entonces la unidad debe clasificarse como skarn indeterminado. Se cree que donde la skarnización fue muy intensa, ambos el endoskarn y exoskarn alcanzaron la misma composición y mineralogía y las dos facies llegaron a ser indistinguibles.

El skarn indeterminado café y verde generalmente contiene granates de grano grueso a muy grueso de color café pálido o beige con granates intergranulares de grano medio y verde oscuro. Bajo la parte norte del Lago Antamina y localmente dondequiera en proximidad al endoskarn, este skarn indeterminado café y verde contiene diópsida en parte como agregados radiales. En el área de Pantano esta face es común, aunque no contiene diópsida pero localmente contiene wollastonita.

d) Exoskarn mixto de granate café+verde.

En el tipo de exoskarn mixto café y verde, el granate café comúnmente ocurre como venillas cortando al granate verde. En algunos lugares el granate café preferencialmente reemplaza algunas capas en el exoskarn de granate verde a la escala de un centímetro, produciendo una granatita café y verde. Esta facie puede contener esfalerita + calcopirita con el mismo estilo de mineralización y leyes como el exoskarn de granate verde.

El tipo de roca que fue clasificado como exoskarn de granate café es texturalmente idéntico en leyes y color al exoskarn de granate verde. Parece formar la zona más interna de exoskarn, entre el anillo interno del endoskarn (alrededor de un núcleo de pórfido inalterado) y una corteza externa de exoskarn de granate verde y localmente skarn de wollastonita. Localmente gradúa al interior a skarn indeterminado café. El exoskarn de granate café (en sentido estricto) es mucho más raro que el que se estimó inicialmente durante el logueo de testigos de 1996-1997.

e) Exoskarn de granate verde.

En gran parte del depósito la face de skarn adyacente al mármol o hornfels es el skarn de granate verde. En esta face el granate parece reemplazar directamente la calcita, y no hay evidencia que el granate reemplazó a la wollastonita. Se cree que el exoskarn de granate verde en diferentes partes del depósito se formó por dos diferentes vías de reacción, una, mencionada



anteriormente, vía el skarn de wollastonita y el otro directamente a partir del mármol. Los dos tipos son texturalmente indistinguibles.

El skarn de granate verde contiene ya sea calcopirita-esfalerita o solamente esfalerita: los sulfuros varían de diseminado a masivo e interbandeado con granate verde. La esfalerita promedia por lo menos de 3 a 5% en el exoskarn de granate verde. Sin embargo, está erráticamente distribuída, comúnmente ocurre como bandas ricas separadas por secciones relativamente estériles.

f) Exoskarn de wollastonita.

El exoskarn de wollastonita comprende una zona interna de bornita (contigua con skarn de granate verde) y una zona externa de bornita-esfalerita (más cercana al mármol). El contacto entre el skarn de wollastonita y el skarn de granate verde es una zona amplia de reemplazamiento gradacional donde el granate verde reemplaza a la wollastonita en una zona clasificada como skarn de wollastonita-granate verde. La bornita ocurre en toda esta zona intermedia, así como tanto en el exoskarn de granate verde como en el exoskarn de wollastonita. El contacto entre la bornita y calcopirita es una zona amplia y gradacional generalmente dentro del skarn de granate verde cerca al skarn de wollastonita. Hay una segunda variedad documentada de brecha, la brecha de wollastonita en la cual la wollastonita pulverizada constituye la matriz. Debido a la similitud textural de esta brecha a la más común brecha heterolítica garnetífera está también podría ser una brecha hidrotermal freática. Este tipo de brecha se distingue porque no contiene magnetita.

g) Hornfels.

El hornfels de grano fino puede ser café pálido o gris amarillento y varía de grano fino a afanítico. Varía de masivo a laminado con bandeamiento composicional fino y ondeado, y generalmente consiste de un agregado muy fino de granate y diópsida con wollastonita menor. Se ha identificado localmente dentro o en las cercanías de los márgenes del depósito. Esta roca no tiene aparente porosidad o permeabilidad y raramente contiene escasos sulfuros. Donde estas capas ocurren en los márgenes de la intrusión parece limitar el desarrollo de la mineralización.

h) Calizas.

La mayoría de las calizas cortadas por la perforación en los márgenes del skarn son de color gris claro, de grano muy fino y micrítica con estratificación paralela a la escala de varios centímetros, pero sin fósiles, fragmentos de concha u otra estructura biogénica o sedimentaria. En los afloramientos en las partes altas del valle estas calizas son de estratificación gruesa (1-3 m), gris claras y facetas coloreadas a color blanco o crema por intemperismo. Estas calizas se clasifican como micritas. Se interpretan como pertenecientes a la formación Jumasha que es anómalamente potente en Antamina como resultado de los sobreescurremientos.

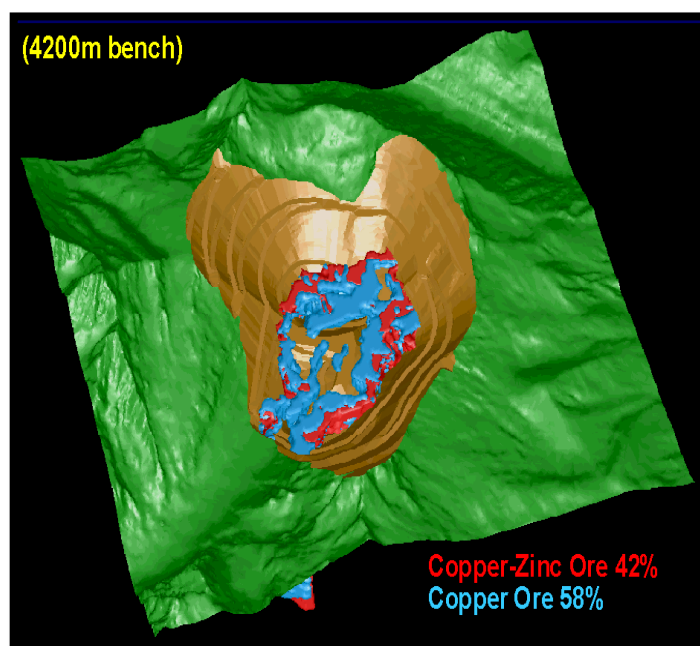
En el eje del anticlinal al lado oeste del valle hay calizas gris oscuro expuestas y en los testigos de perforación. Estos tienen estratificación ondulada a escala

de centímetro (bioturbado o slump), contienen conchas y típicamente tienen bandas de nódulos de chert negro. Esta caliza pertenece a la formación Pariatambo.

Las calizas expuestas en el anticlinal al lado este del valle tienen un núcleo gris claro seguido por una unidad de caliza negra con estratos delgados grises, luego una caliza micrítica gris. Esta caliza se distingue de los estratos suprayacentes (sobrescurrimiento) que son típicos de la formación Jumasha. La formación Jumasha es susceptible a meteorización tipo karst.

No hay aspectos de karst en la superficie del depósito de Antamina (pero los hay en las áreas adyacentes). Sin embargo, las cavidades subterráneas con alto flujo de agua (karst o zonas de falla) se encontraron en la perforación diamantina en las áreas de Laberinto y Taco Sur.

*Figura N° 2.4: Distribución de los principales tipos de mineral de Antamina*



Fuente: Departamento de Geología

#### **2.2.4. Molienda convencional.**

A través de la molienda, la segunda parte de los procesos de conminución, posterior al chancado, consolida la reducción de tamaño de las partículas que forman parte del mineral. En este proceso se utilizan grandes equipos giratorios, cilíndricos o cilindro-cónicos, denominados molinos, quienes, con la ayuda de medios de molienda (barras o bolas de acero) adicionados en su interior, llevan a cabo la conminución del mineral alimentado a la planta.

Los circuitos de molienda más comunes en la actualidad obedecen a 3 configuraciones de amplio uso. Uno es el circuito de molienda convencional unitario, constituido únicamente por un molino de bolas de gran capacidad, capaz de satisfacer la demanda productiva de toda la planta de procesamiento. La principal característica de esta configuración, es ser muy eficiente en cuanto a la calidad del producto final obtenido, por lo cual debe operar en circuito cerrado directo, con hidrociclones que sean capaces de clasificar, posterior a la molienda, el producto final con la granulometría requerida. Este tipo de circuitos debe contar con molinos de grandes dimensiones, de hasta 28 pies de diámetro por 41 pies de largo, para hacer frente al amplio rango granulométrico proveniente de la etapa de chancado previo.

La segunda configuración, el diagrama clásico de molienda que se ha usado durante muchos años, corresponde a la Molienda Convencional en dos etapas. Esta modalidad comprende una primera etapa de molienda desarrollada por un molino de barras, el que desarrolla un trabajo selectivo,

al moler preferentemente las rocas de mayor tamaño en desmedro del material más fino. Posteriormente el producto pasa a un proceso de molienda con molinos de bolas, que constituye la molienda secundaria, en un esquema cerrado inverso, de manera de clasificar con hidrociclones el producto molido y enviar el material que ya cumple con la granulometría demandada como producto final. Lamentablemente este esquema, debido a los problemas asociados al molino de barras, al desarrollo de nuevas tecnologías y la expansión de la molienda SAG, ha visto limitado cada vez más su uso.

A pesar de la reconocida ineficiencia energética de los molinos de Bolas para el proceso de fractura, la implementación de estos equipos, operando en circuito cerrado con clasificadores hidráulicos (hidrociclones), ha sido la alternativa tecnológica tradicionalmente seleccionada para la molienda fina de minerales, sea esta en etapas únicas o múltiples, asociados con molinos de barras, molinos Autógenos (AG) o Semi-autogeno (SAG).

La tercera y última configuración corresponde al circuito de molienda SAG, actualmente el de mayor aceptación y uso en el procesamiento de minerales. Esta configuración se explica en profundidad a continuación.

#### **2.2.5. Molienda semi-autogena (SAG).**

La molienda convencional tiene asociada un alto costo operacional, caracterizado por el consumo de acero de los medios de molienda y de los revestimientos del equipo. El incremento de las tasas de desgaste y los costos

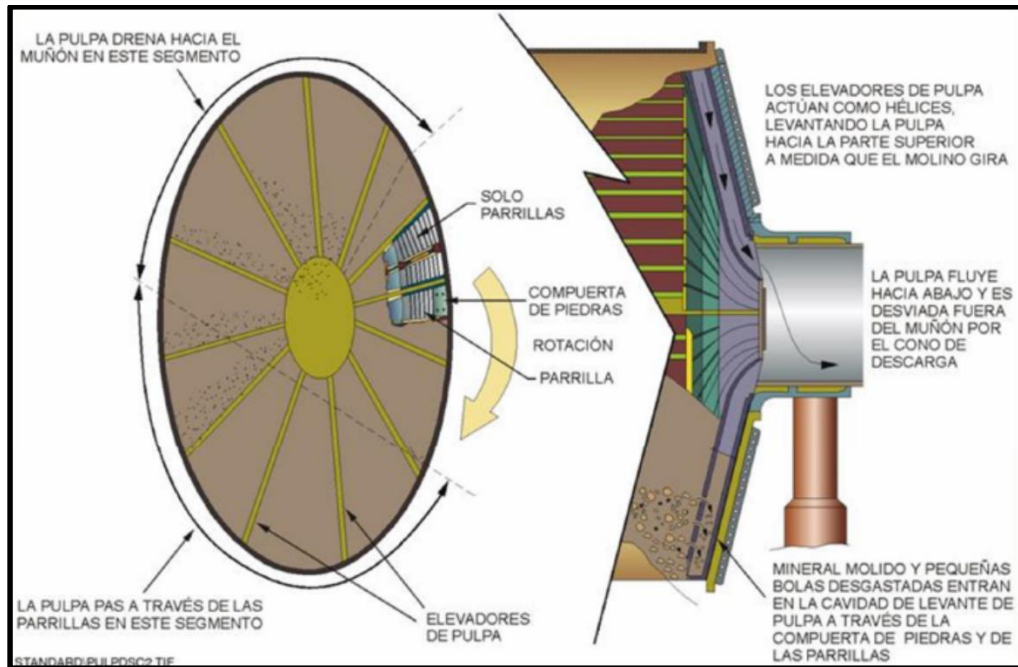
operacionales asociados, llevaron a la industria minera a buscar nuevas metodologías que hicieran frente a este aspecto. En respuesta a ello surgió la idea de reducir e incluso evitar el uso de los medios de molienda de acero al interior de los molinos, llegando con ello al desarrollo de grandes equipos, similares a los convencionales, que pudiesen ocupar las mismas rocas de mineral como remplazo a las bolas de acero originales. De esta manera se empezaron a desarrollar los denominados molinos Semiautógenos (SAG), en donde el uso de medios de molienda de acero se reduce ampliamente, y los molinos Autógenos (AG), en donde la conminución es desarrollada únicamente por el mismo mineral.

La idea de que los minerales puedan reducirse de tamaño a sí mismos surgió de los investigadores y técnicos del área de la conminución, tras el advenimiento de los molinos rotatorios en 1880. El primer molino AG operó en Sudáfrica y se dio a conocer en una publicación del “American Institute of Mining, Metallurgic and Petroleum Engineers”, el año 1908. Este molino sólo utilizaba rocas de mineral de 8” de diámetro como medio de molienda.

La primera versión comercial de un molino AG fue denominada Hardinge Hadsell y fue construida en el año 1932 por Harlowe Hardinge. Una imagen de la sección transversal del equipo se puede observar en la Figura N° 2.5. El molino contaba con dimensiones de 24 pies de diámetro por 3 pies de largo y a pesar de haber funcionado de manera satisfactoria para minerales blandos, su diseño no fue óptimo para el tratamiento de minerales más duros, los que

hacían que el molino tendiera a sobre llenarse y los procesos de fractura perdieran eficiencia.

*Figura N° 2.5. Sección transversal del molino SAG.*



Fuente: Manual Moly-Cop.

Los molinos SAG corresponden a una variante del molino AG en donde se adiciona una carga de bolas de acero como medios de molienda, considerablemente inferior a la utilizada en los molinos de bolas, la que oscila normalmente entre un 5 y un 19%. Los molinos SAG se han utilizado preferentemente en las plantas de procesamiento de oro, cobre y platino con usos también en zinc, plomo y níquel. La molienda semiautogena en Chile comenzó a operar durante 1981, fecha en que la compañía Minera *Disputada de las Condes* puso en funcionamiento el primer molino SAG, de 28 pies de diámetro por 14 pies de largo y 5200 kW de potencia instalada, en Los Bronces.

De acuerdo al estado actual de la tecnología de molienda, si se toman las precauciones necesarias durante el diseño, la gran mayoría de las menas minerales se adaptan al procesamiento tanto por molienda SAG como convencional. La selección de una u otra alternativa, en la mayoría de los casos, depende de las consideraciones económicas, preferentemente sobre las técnicas. De acuerdo a lo anteriormente mencionado los argumentos que abalan el crecimiento en la utilización de molinos SAG corresponden a su mayor capacidad de tratamiento y el menor número de etapas y reciclos involucrados (menor cantidad de equipos y personal, mayor simplicidad en el diseño del circuito, etc.). Otro aspecto que ha favorecido la selección de las configuraciones de molienda SAG, corresponde a los altos niveles de productividad demandados, consecuencia de las cada vez menores leyes medias presentes en los yacimientos actuales; asociado a este hecho, los molinos SAG son capaces de tratar el mineral que se obtiene como producto del chancado primario, descartando con ello las etapas y equipos asociados al chancado secundario y terciario.

*Tabla N° 2.1: Molinos SAG de mayor envergadura operando actualmente.*

<b>D (pies)</b>	<b>L (pies)</b>	<b>Potencia instalada (kW)</b>	<b>Proveedor</b>	<b>País</b>
<b>40</b>	36	28000	CITIC	Australia
<b>40</b>	27	23980	Metso	Panamá
<b>40</b>	26	23860	FLSmith	Chile

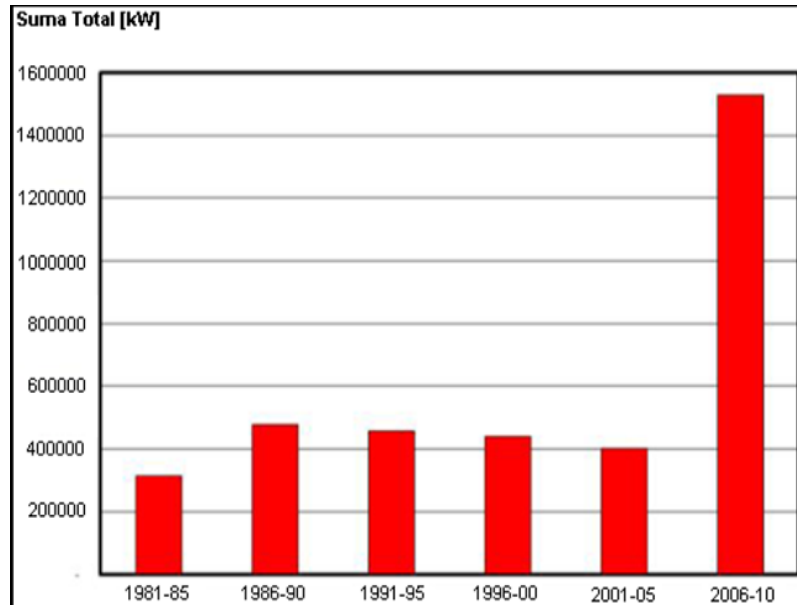
**Fuente: Jones y Fresko, 2011**

A pesar de que la molienda SAG implica un ahorro del costo de capital en un proyecto, producto de la menor cantidad de equipos considerados durante el chancado, se ha podido constatar que las diferencias en el consumo específico



de energía, medido en “kWh/t procesada”, de esta tecnología respecto a la molienda convencional, no son significativas.

*Figura N° 2.6: Suma de la potencia total instalada para los molinos AG/SAG de todo el mundo*



**Fuente: Autogenous and Semiautogenous Mills, Jones y Fresko, 2011**

La potencia instalada, respecto a los molinos SAG, ha visto incrementada su magnitud en los últimos años de manera considerablemente alta. La Figura N° 2.6, muestra un gráfico que representa el incremento en la suma total de la potencia instalada en los equipos de molienda SAG/AG de todo el mundo, durante períodos de 5 años, desde 1981 hasta el 2010.

Los circuitos de molienda que utilizan grandes equipos AG o SAG ofrecen múltiples beneficios, como, por ejemplo, tener la capacidad de procesar mayores volúmenes de mineral, lo que dada la contingencia se transforma en un factor preferencial frente a la molienda convencional. Otro aspecto trascendental, comentado anteriormente, es que los molinos SAG están

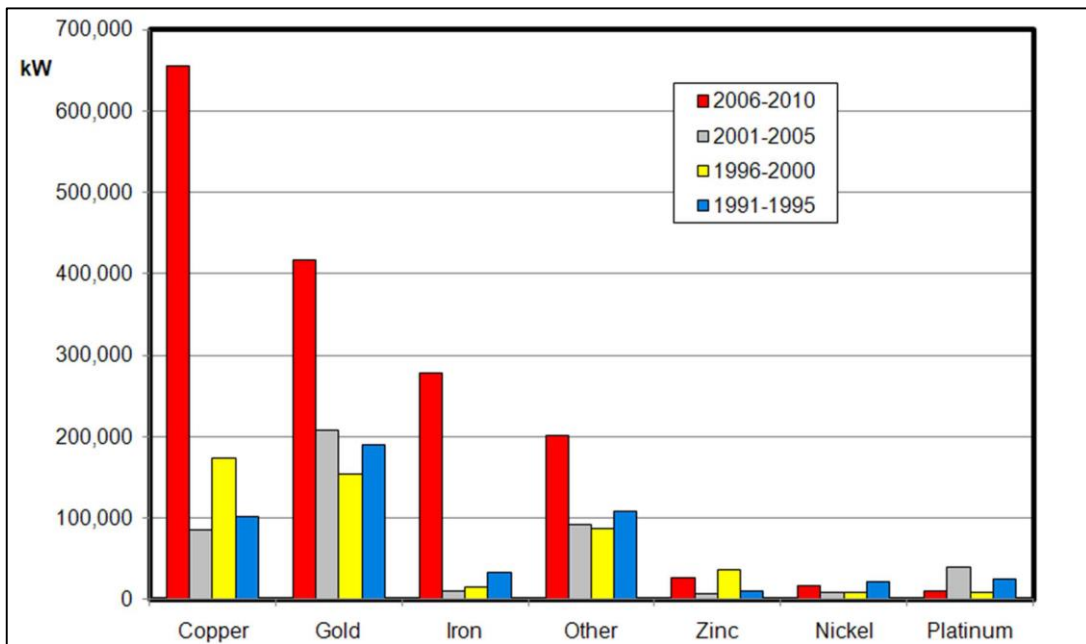
diseñados para procesar el producto del chancado primario. De esta manera las etapas habituales de chancado secundario y terciario son llevadas a cabo por este equipo, ahorrando los costos operacionales y de capital asociados a estas dos fases.

La experiencia muestra que una línea de molienda SAG requerirá un menor costo de capital que una línea de molienda convencional, en particular para molinos de gran capacidad. El costo de capital de un circuito de molienda SAG corresponde aproximadamente a un 85% del costo de capital de un circuito convencional.

La aplicación de la molienda SAG se ha concentrado preferentemente sobre los minerales de cobre. Debido a la dureza y a los grandes tonelajes demandados por las bajas leyes en los yacimientos de este metal, es preciso trabajar con equipos capaces de ajustarse a crecientes demandas productivas y a minerales de distinta dureza.

La Figura N° 2.7, muestra la tendencia que han presentado los distintos metales hacia la utilización de molinos SAG/AG para su explotación, mediante la suma total de la potencia instalada para estos equipos en todo el mundo.

**Figura N° 2.7: Potencia instalada en distintos períodos por tipo de mineral**



**Fuente: Autogenous and Semiautogenous Mills, Jones y Fresko, 2011**

El hecho de recurrir a menores porcentajes en los medios de molienda de bolas, con lleva a la utilización de rocas de mayor tamaño en la alimentación del molino SAG. El intercambio que se genera al remplazar las bolas de acero, con una densidad aproximada de 7,8 g/cm<sup>3</sup>, por rocas de mineral, cuya densidad es de alrededor de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, conlleva a una disminución de la carga en los medios de molienda en alrededor de un 62%. Para mantener la misma carga y así no deteriorar el perfil de la conminución, se requiere de un incremento en el diámetro de las rocas de mineral que remplazarán a las bolas de acero en su rol moledor.

De esta manera gran parte de la energía se pierde por la interacción entre las rocas y el movimiento giratorio de las mismas. Ello conlleva a que el consumo energético de los molinos SAG sea exagerado y se incremente cada

vez más producto de las tendencias anteriormente comentadas (mayores tonelajes de alimentación).

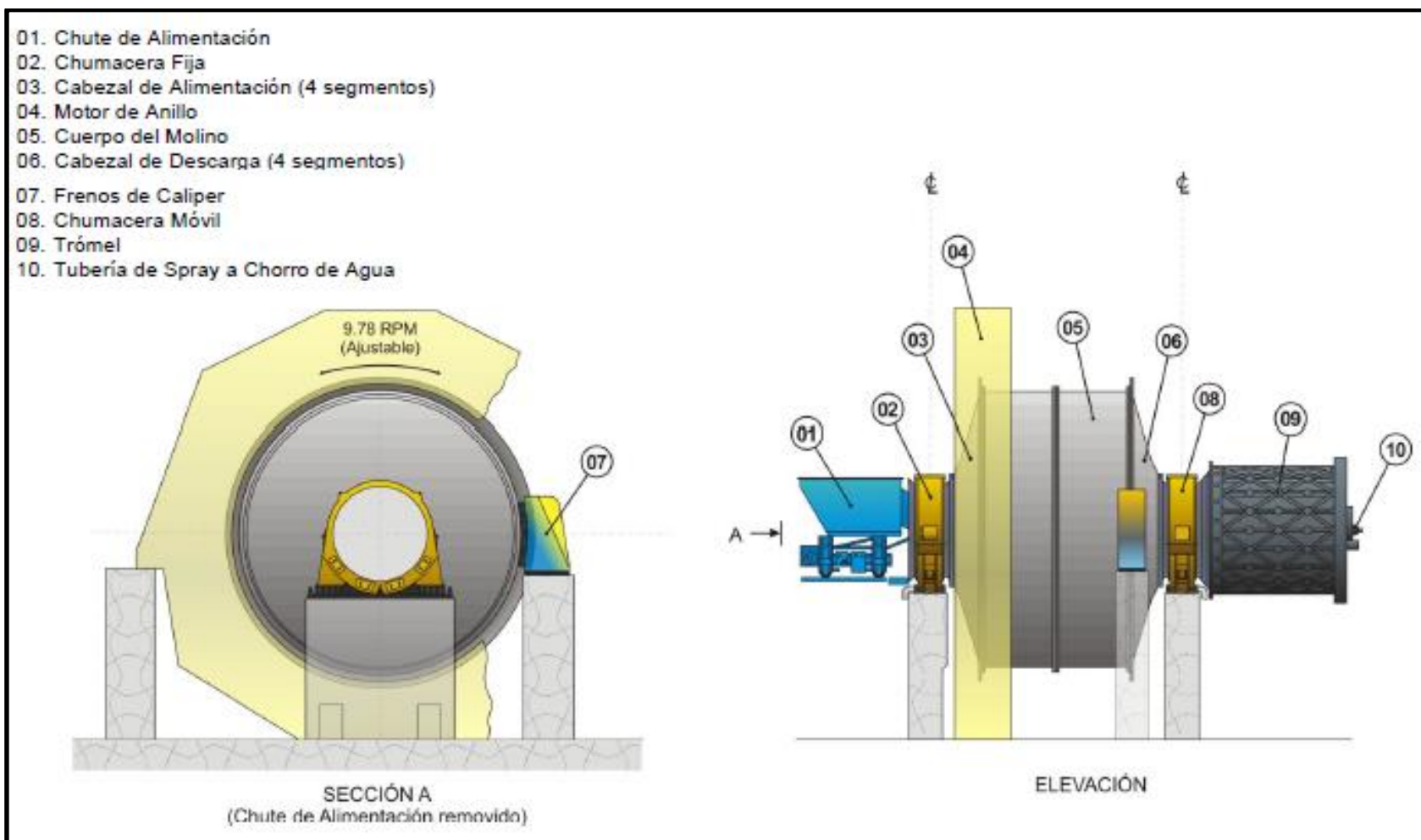
#### **2.2.6. Molino SAG.**

Los molinos SAG son equipos de gran envergadura, con dimensiones de hasta 40 pies por 25 pies (diámetro por largo) y con potencias instaladas de hasta 28000 kW, capaces de tratar altos tonelajes de alimentación y diseñados, por lo general, con parrillas de descarga y un trommel en la salida, implemento diseñado para la pre-clasificación del mineral descargado.

El mineral se recibe directamente desde la etapa de chancado primario (con un tamaño máximo que oscila por lo general en torno a las 8”) y se mezcla con agua y otro tipo de reactivos si así se desea (cal, por ejemplo). El material es reducido de tamaño por la acción conjunta del impacto generado por las mismas rocas de mineral, más las bolas de acero alimentadas al molino, las que poseen un tamaño aproximado entre 4” a 6”.

Dado el tamaño y la forma del molino, las bolas de acero se precipitan en caída libre, generando un efecto conjunto de chancado y molienda más efectiva, con menor consumo de energía, ahorrando las etapas de chancado secundario o terciario que en el caso de la molienda convencional son requeridas.

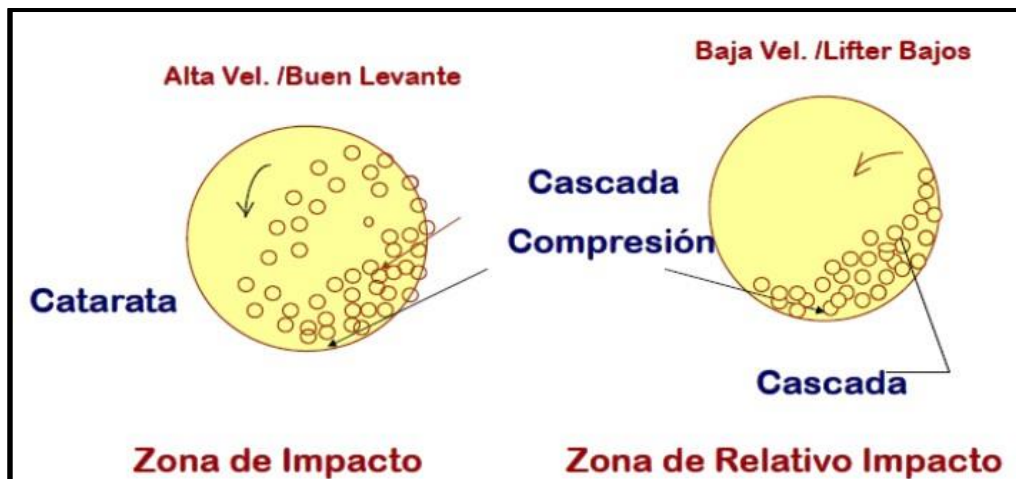
Figura N° 2.8: Componentes básicos de un molino SAG



Fuente: Metso Process Technology

En la molienda SAG existe un problema característico, asociado a la formación de material indeseado dentro del proceso: los pebbles. El molino SAG genera en su interior una fracción de tamaño “crítico” de partículas, con una granulometría que se encuentra usualmente entre 1” y 3”, denominada pebbles. Esta fracción de mineral, que se produce por el astillamiento y la abrasión de rocas con tamaños superiores a las 3”, presenta una alta resistencia a la molienda, por lo que su conminución debe ser desarrollada de manera aislada en un chancador de Pebbles, usualmente de tipo “cónico de cabeza corta”, para así evitar la sobre carga del molino SAG con este material de tamaño crítico. Para el tratamiento de los pebbles, la descarga del molino SAG debe ser clasificada en dos o tres fracciones de tamaños, con la ayuda de harneros y/o el trommel de descarga. Los molinos SAG suelen descargar el material molido a través de parrillas, las que cumplen el rol de una malla selectiva, previo a la salida del equipo, con el fin de acotar la granulometría del producto y así impedir el paso de rocas de mayor tamaño que no han sido molidas satisfactoriamente.

*Figura N° 2.9: Sección transversal de un molino SAG; identificación de las zonas de fractura.*

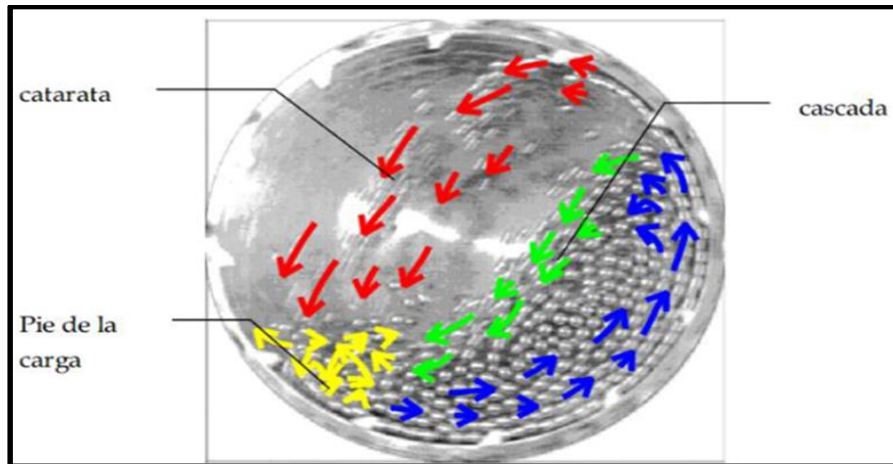


Fuente: Manual Moly-Cop.

La estructura del molino debe ser tal que permita el movimiento ascendente de los medios de molienda (rocas y bolas de acero), para que estos puedan caer sobre la carga de mineral que ingresa y así generar la conminución. La mecánica de fractura del molino SAG se caracteriza por dos sucesos: una fractura por impacto y otra por abrasión. La primera, de mucha mayor energía, es la encargada de quebrar las rocas de mayor tamaño, hasta un rango acotado o granulometría intermedia, mientras que la segunda es la que genera la población de partículas de menor tamaño o granulometría más fina.

Los mecanismos de fractura detallados se dan en distintas regiones del molino y la carga interna, según se aprecia en la Figura N° 2.9. Como se puede apreciar en la imagen anterior, el movimiento de la carga es ascendente y se caracteriza por una acción de volteo. El giro del molino, que en la Figura N° 2.10, se encuentra en dirección contrarreloj, hace que la carga ascienda por el lado derecho, hasta alcanzar un punto de máxima altura, luego del cual desciende y vuelve a caer. Dependiendo de la velocidad de giro a la que opera el molino, la disposición de las bolas y la estructura interna del equipo, la caída del mineral se puede dar por desmoronamiento sobre la carga o bien por caída libre. Usualmente se les denomina, a estas dos formas de caída, movimiento de “cascada” y de “catarata”, respectivamente. Visto de lado, el sistema completo de la carga interna adquiere una forma similar a la de un riñón ver Figura N° 2.12, en cuyo extremo inferior izquierdo puede identificarse una zona de movimiento caótico denominada “pie de la carga”, donde se disipa la energía restante de la caída para que la carga nuevamente ascienda.

*Figura N° 2.10: Patrones de movimiento de la carga, en un tambor rotatorio horizontal.*



Fuente: Autogenous and Semiautogenous Mills, Jones y Fresko, 2011

Para que la carga pueda ascender de manera eficiente y no resbale en los contornos del molino, es esencial que éste cuente en su revestimiento interno con relieves o accesorios que faciliten el ascenso del material. Estos resaltes o relieves que se adicionan a los revestimientos internos del molino se denominan “lifters” o levantadores. Los principales parámetros que caracterizan a los lifters y que influyen en el movimiento de la carga, corresponden a su altura y ángulo de ataque. El ángulo de ataque se mide entre la cara frontal de los mismos y la base de la carcasa, como se indica en la siguiente figura N° 2.11:

*Figura N° 2.11: Bosquejo de los lifters de un molino SAG, indicando su ángulo de ataque “ $\theta$ ”.*



Fuente: Manual Moly-Cop



Otro factor esencial en la trayectoria y el movimiento de la carga, corresponde a la velocidad de operación del molino SAG. Cada molino está caracterizado por su propia velocidad crítica, la que determina la condición de equilibrio de las partículas al interior y hace que la carga se centrifugue. Esto se obtiene al igualar las fuerzas centrífuga y gravitacional de las partículas en el sistema. La velocidad crítica,  $N_c$  (rpm), dependerá de las dimensiones del molino, según la siguiente ecuación, donde  $D$  (m) corresponde al diámetro del equipo y  $(1/s)$  a su velocidad angular crítica.

$$N_c = \frac{\omega_c}{2 * \pi} = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$$

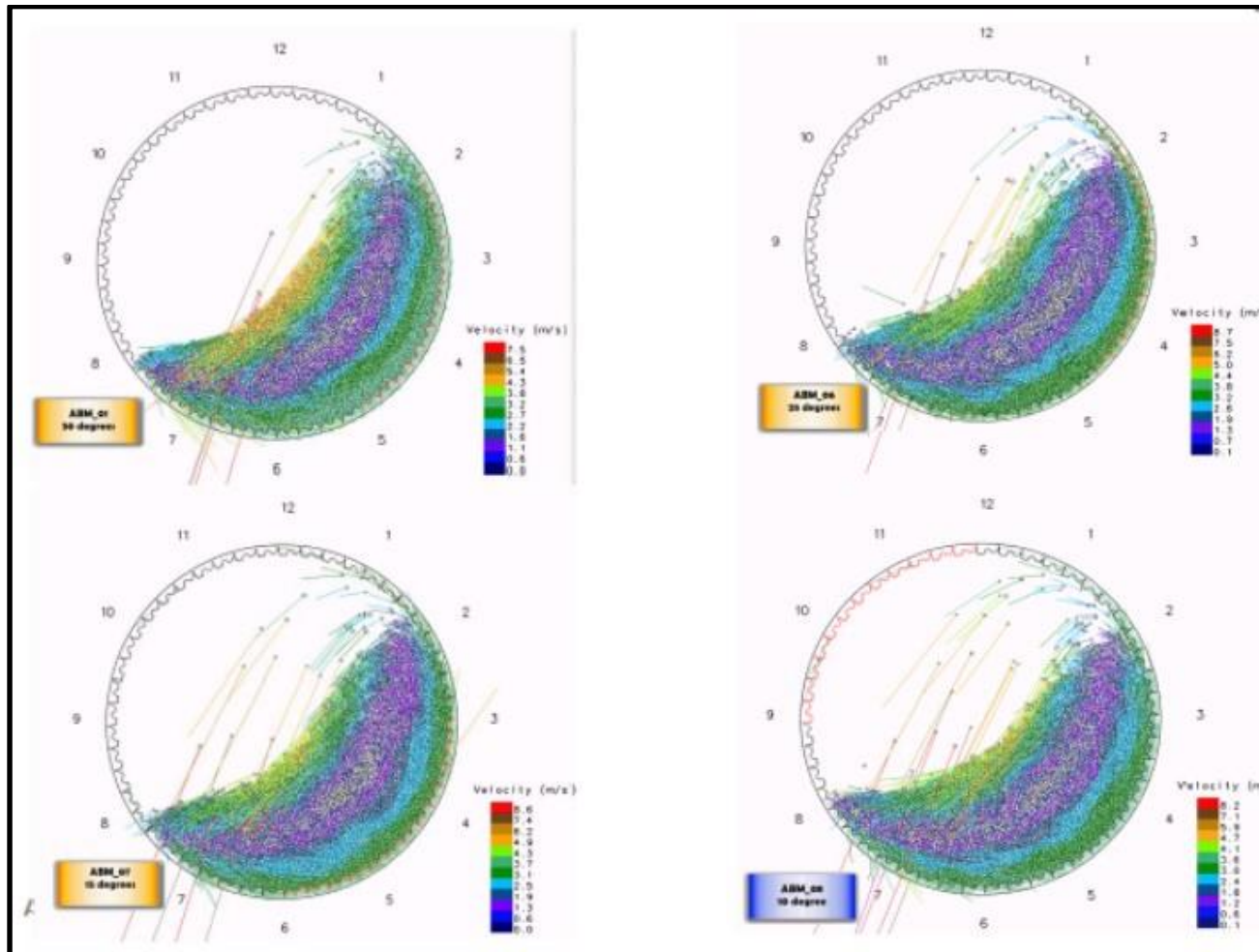
$N_c$  : Velocidad crítica en r.p.m.

$\omega_c$  : Velocidad crítica en *rad/s*

$D$  : Diámetro interno del molino en (m).

Es usualmente utilizado en la práctica el término “Porcentaje de velocidad crítica”,  $N/N_c(\%)$ , para caracterizar la velocidad a la que opera un determinado molino. Esta velocidad influye fuertemente en el tipo de movimiento que tendrá la carga (catarata o cascada), puesto que de acuerdo al balance de fuerzas podrá ascender de manera preferente para caer e impactar tal como se desea o bien, si se sobrepasa un determinado límite en la velocidad, esta puede seguir la trayectoria del molino, sin resbalar ni tampoco descender de los revestimientos internos, adicionándose a estos de manera permanente y estática (carga centrifugándose).

Figura N° 2.12: Efecto de la velocidad en el movimiento de la carga, a distintos porcentajes de velocidad crítica.



Fuente: Metso Process Technology

En la Figura N° 2.12, se puede apreciar la evolución en el movimiento de la carga de acuerdo a los distintos niveles del porcentaje de la velocidad crítica a la que se opera (esquina inferior izquierda de cada recuadro), considerando un ángulo de ataque de los lifters del 90% para cada caso. De acuerdo a ello se puede observar lo siguiente:

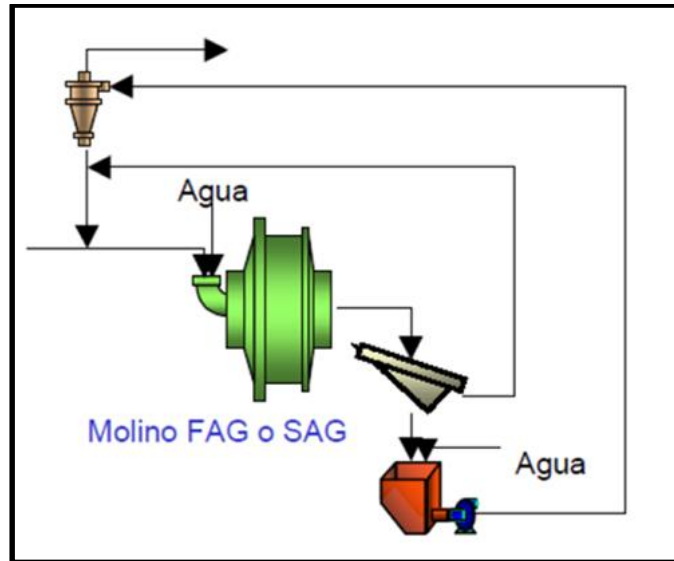
- a) El movimiento de la carga al cual se da su desmoronamiento, corresponde a un bajo nivel del porcentaje de velocidad crítica (40% aproximadamente), en cuyo caso el ángulo de ataque de los lifters no tiene mayor incidencia dentro del perfil de movimiento del sistema interno.
- b) A medida que se incrementa la velocidad de operación, las bolas que están en contacto con los revestimientos y levantadores del equipo, son proyectadas hacia arriba, descendiendo posteriormente en caída libre y generando el impacto y trayectorias deseadas. El más representativo de los recuadros corresponde al que se opera a un 70% de  $N_c$ , siendo éste un valor cercano al utilizado habitualmente en la industria.
- c) Si la velocidad es suficientemente alta, la trayectoria de las bolas sigue el movimiento giratorio del molino de manera extrema, haciendo que la caída libre se dé en los revestimientos del molino y no en el “pie”, que es donde se encuentra la carga. Lo anterior se puede observar en el recuadro en el que se opera a un 90% de  $N_c$ .

### 2.2.7. Configuraciones de molienda SAG.

Las configuraciones de molienda SAG más comunes corresponden a las siguientes:

- a) SAG: circuito con molino SemiAutógeno.

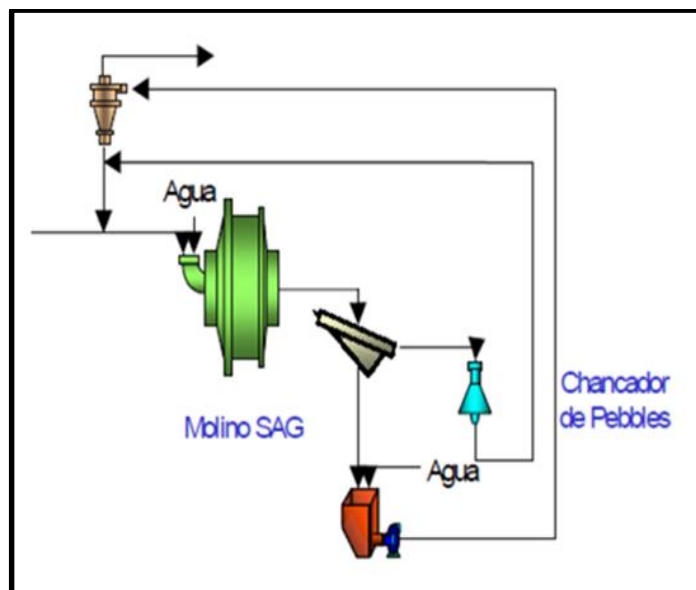
*Figura N° 2.13. Circuitos de molienda SAG.*



Fuente: Molienda Semiautógena, Magne, L.y Valdelamar, W.

- b) SAC: circuito con molino SAG y un chancador de pebbles.

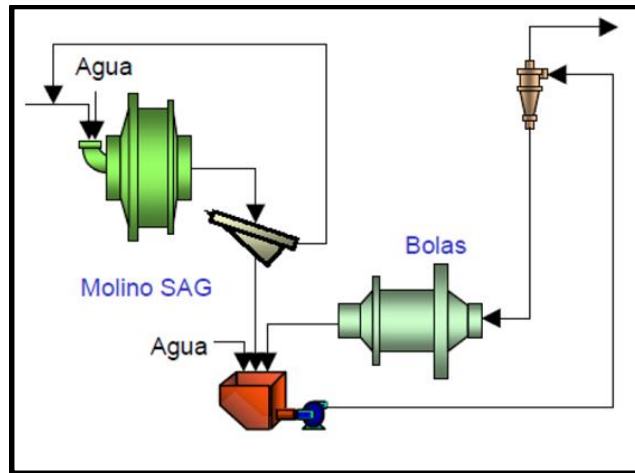
*Figura N° 2.14: Circuitos de molienda SAC.*



Fuente: Molienda Semiautógena, Magne, L.y Valdelamar, W.

- c) DSAG: circuito formado por un molino SAG, seguido de un circuito secundario de molinos de bolas con recirculación directa de pebbles al molino SAG.

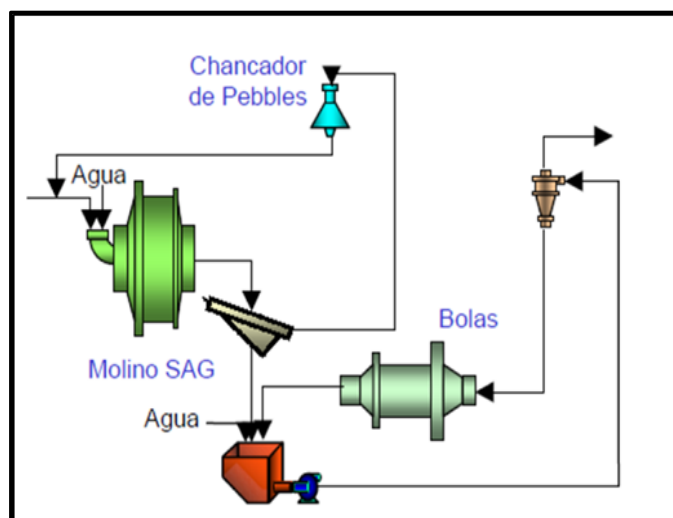
*Figura N° 2.15: Circuitos de molienda DSAG*



Fuente: Molienda Semiautógena, Magne, L.y Valdelamar, W.

- d) SABC-A: circuito constituido por un molino SAG, seguido de un circuito secundario de molinos de bolas, con chancado de pebbles recirculados al molino SAG.

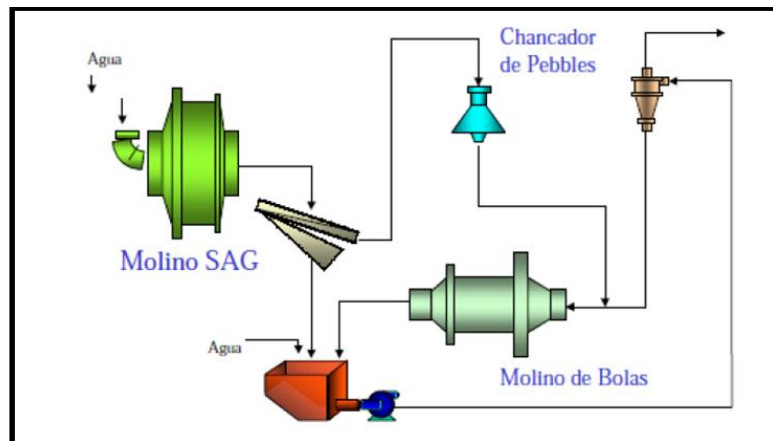
*Figura N° 2.16: Circuitos de molienda SABC-A*



Fuente: Molienda Semiautógena, Magne, L.y Valdelamar, W.

- e) SABC-B: circuito con la misma configuración del SABC-A, sólo que acá los pebbles chancados son enviados a la alimentación del molino de bolas secundario.

*Figura N° 2.17: Circuitos de molienda SABC –B*



Fuente: Molienda Semiautógena, Magne, L.y Valdelamar, W.

## 2.2.8. Elementos principales del molino SAG.

Las piezas fundamentales de un molino son: casco, chaquetas o revestimientos, parrillas o rejillas de descarga, cuerpos trituradores, dispositivos de carga y de descarga y el accionamiento o mando del molino.

### 2.2.8.1. Casco del molino SAG

El casco del molino se rola con planchas de acero en maquinaria diseñada para la operación diseñada para la mecánica de rolado luego se suelda o se remacha. El espesor depende de la carga de bolas y del mineral que se desea moler, y también del grado de debilitamiento del casco por los huecos que se perforan y que son practicados por el

taladro para la fijación por medio de pernos de cabeza ovalada del revestimiento. En los extremos del casco se sueldan anillos de hierro ángulo o de acero fundido para la fijación de las tapas del cilindro del molino mediante pernos.

En el casco se abre aberturas con tapa llamadas manhole para poder realizar la carga y descarga de las bolas, inspección de las chaquetas o revestimientos y para el reemplazo de las chaquetas y de las parrillas del molino SAG.

#### 2.2.8.2. Rejillas o parrillas en molinos SAG.

En los molinos se instalan unas rejillas destinadas a retener los cuerpos trituradores y los trozos gruesos de mineral, durante el traslado del mineral molido a los dispositivos de descarga. En la rejilla de descarga que se instala en los molinos SAG, que operan y trabajan por vía húmeda.

Para dejar salir el mineral molido por el trunnion de descarga está separado del espacio de trabajo por parrillas dispuestas radialmente con aberturas que se ensanchan hacia la salida. El mineral molido que pasa por las parrillas, es recogido por las nervaduras, dispuestas radialmente y se vierte fuera del molino por el trunnion de descarga. Las parrillas y las nervaduras se reemplazan fácilmente cuando se desgasta.

Otro tipo de rejilla, está formada por placas con ranuras alargadas que se ensanchan hacia la salida. Las placas, se colocan sobre las

nervaduras, de la pared de cabecera y se ajustan con los pernos grandes.

La descarga del mineral se efectúa por las aberturas a la canaleta anular.

La elección correcta de la ubicación para la instalación de las rejillas y la sección útil de las mismas condicionan una gran capacidad de producción y una finura de molino eficiente.

Si la sección útil de la rejilla es insuficiente, una de las cámaras trabajara con exceso de carga y la cámara contigua, con falta de carga, o sea que el molino trabajara forzado.

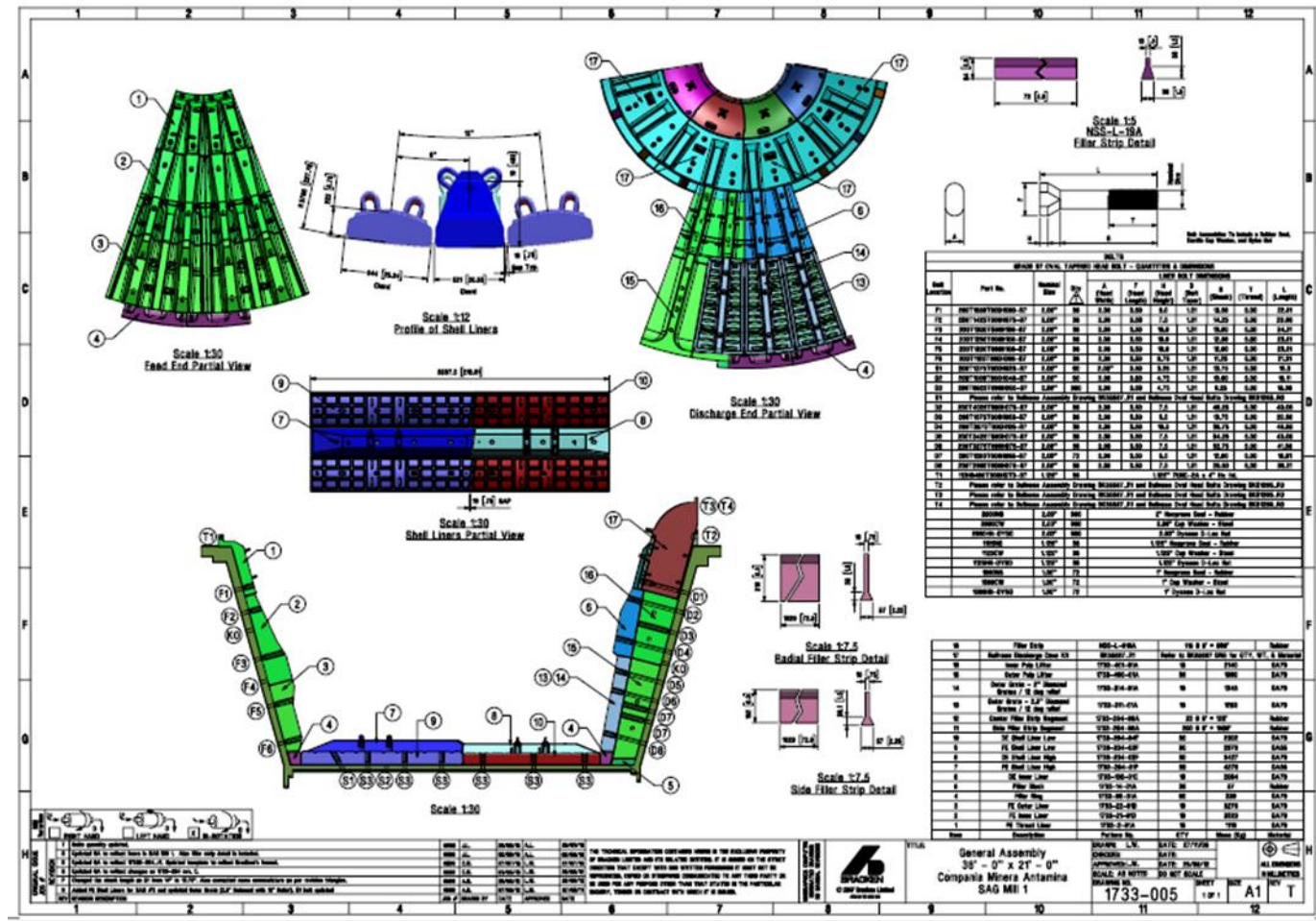
#### 2.2.8.3. Revestimientos o liners para molinos

El uso industrial de revestimiento de caucho en los molinos se inició al principio de la década del 60 y desde entonces se ha difundido para todo el mundo.

- Elementos principales de un revestimiento de para molinos son:
- Barra elevadora
- Mordaza
- Revestimiento de las tapas de entrada y salida
- Revestimiento del casco o Shell



Figura N° 2.18: Revestimientos principales del molino SAG



### **2.2.9. Dinámica de carga.**

Para ello, hay que tener en cuenta los mecanismos de conminución que actúan en la reducción de tamaño: impacto, compresión y abrasión; los tres tipos actúan simultáneamente.

Los mecanismos de conminución:

#### **2.2.9.1. Impacto:**

Ocurre cuando la energía se aplica rápidamente y es mayor que la que se necesita para romper la partícula, bajo estas condiciones la partícula se rompe en muchos pedazos con un amplio rango de tamaños. Esto sucede cuando las bolas de gran tamaño son levantadas con suficiente energía como para que se separen de la carga y al caer golpeen violentamente el mineral que se encuentra al pie del molino. La misma función cumplen las rocas grandes (auto fractura).

#### **2.2.9.2. Compresión:**

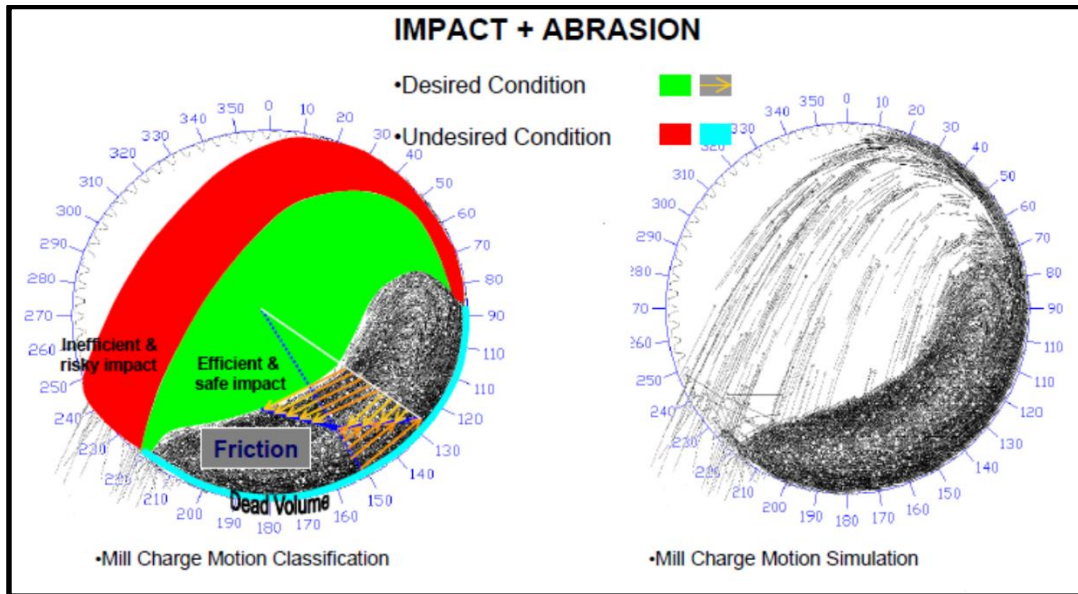
Ocurre cuando la energía se aplica lentamente y es la necesaria para llevar la partícula justo a su punto de fractura, y romperla luego en unos pocos pedazos. Esta situación ocurre, por ejemplo, por la acción de las bolas y rocas de gran tamaño, al rodar hacia el pie de la carga sobre las partículas de tamaño intermedio y fino.

#### **2.2.9.3. Abrasión:**

Ocurre cuando la energía aplicada es insuficiente para producir un quiebre de la partícula y más bien se produce una fractura localizada. Este tipo de molienda ocurre entre las rocas que están en contacto,

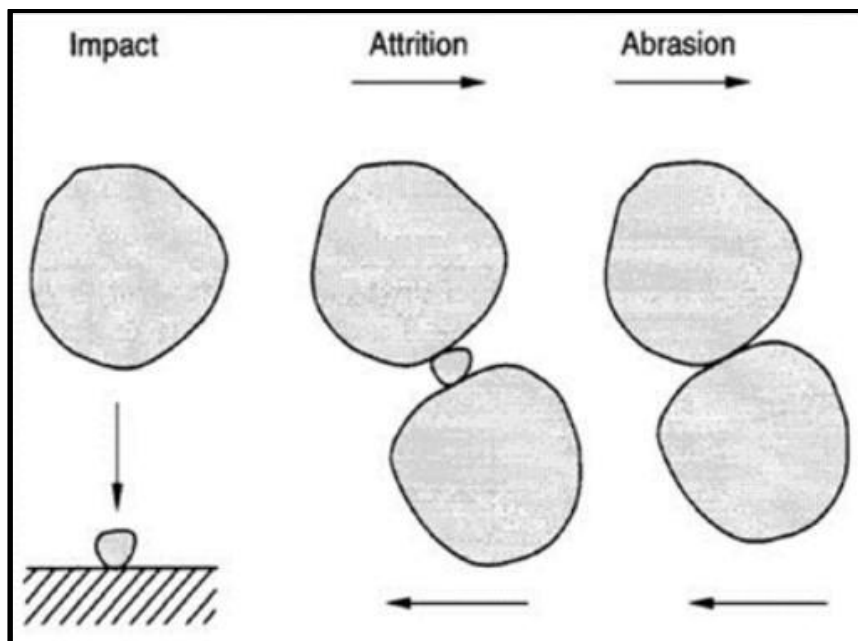
las cuales se desgastan hasta que son suficientemente pequeñas como para ser fracturadas por bolas o partículas mayores.

Figura N° 2.19: Movimiento de la carga de un molino operando a velocidad.



Fuente: Autogenous and Semiautogenous Mills, Jones y Fresko, 2011

Figura N° 2.20: Tamaños y formas de partículas según mecanismo de molienda.



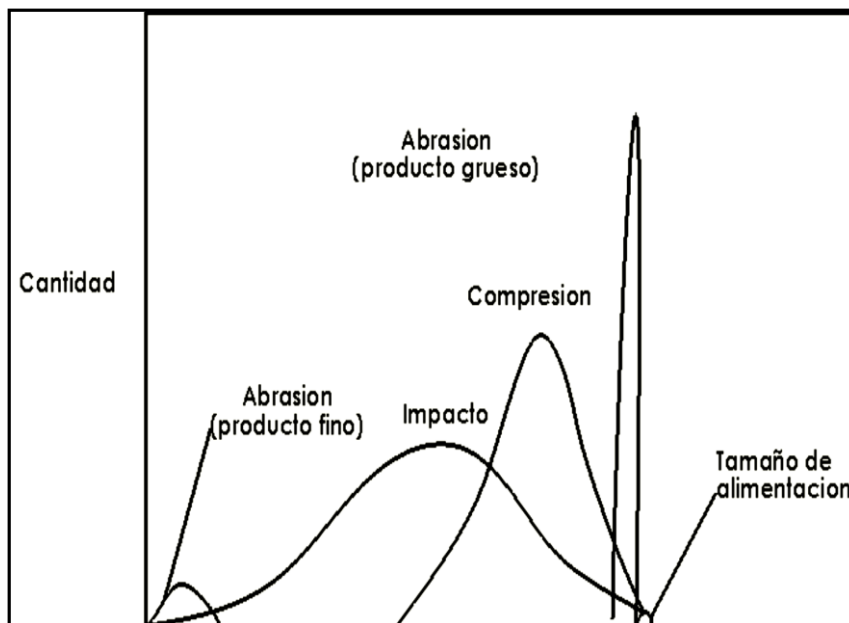
Fuente: Compendio de Conminución, 2003

En molinos SAG, está influenciada por el tamaño, cantidad, el tipo de movimiento y los espacios entre los elementos de molienda en el molino.

Estos mecanismos distorsionan las partículas y cambian su forma más allá de ciertos límites determinados por su grado de elasticidad, causando el quiebre de ellas. La molienda comúnmente se efectúa vía húmeda.

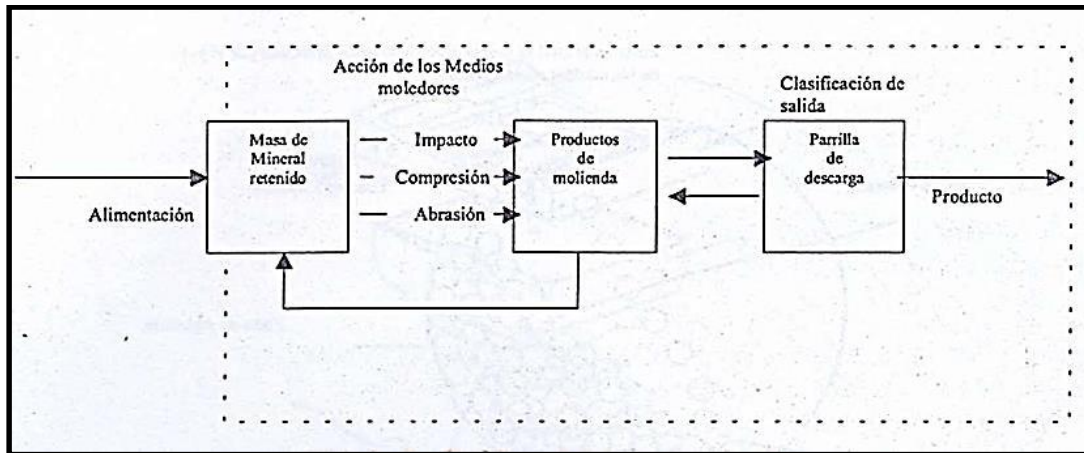
Cuando el molino se hace rotar, el agente de molienda, mineral y agua, se mezclan en forma íntima y el agente de molienda puede reducir de tamaño las partículas por cualquiera de los mecanismos anteriores, dependiendo de la velocidad de rotación del molino.

*Figura N° 2.21: Representación de los mecanismos de conminución de las partículas y la distribución de tamaños de producto.*



Fuente: Compendio de Conminución, 2003

Figura N° 2.22: Gráfico del interior de un molino SAG



Fuente: Compendio de Conminución, 2003

A todo esto, tenemos que mencionar el término astillamiento o chipping, que se usa para nombrar en forma específica la remoción de puntas y asperezas de una roca fresca. Este mecanismo de fractura entrega un producto de una distribución granulométrica similar a la que se obtiene por abrasión; es decir, un núcleo redondeado y una fracción fina con pocas partículas en el rango intermedio.

Los mecanismos de molienda que actúan sobre las partículas son determinados en gran medida por el movimiento de la carga y por la composición de los medios molidores.

El tipo de movimiento de la carga depende de la velocidad con que se rota el molino y de los levantadores de carga que tenga la coraza.

#### 2.2.10. Operación y balance del molino SAG.

La acción del molino está regulada principalmente por dos fenómenos:

- El proceso de molienda.

- El transporte del material a través del molino y de la parrilla.

Dentro de la operación de molienda, podemos decir que existen dos parámetros que lo definen:

- La velocidad con que se muelen las partículas.
- La distribución de tamaño de los productos que se obtiene.

#### 2.2.10.1.Zona de cascada:

Los medios moledores tienden a rodar suavemente produciéndose un flujo tipo cascada. Esta cascada favorece la abrasión, generando gran cantidad de finos. Se produce también un mayor desgaste de la coraza.

#### 2.2.10.2.Zona de catarata:

Los medios moledores se separan de la carga en el punto más alto y al caer desarrollan una trayectoria parabólica. Se produce la conminución por impacto con menor desgaste de las corazas. Debe notarse que en la zona de catarata los medios moledores caen libremente y no ocurre fractura sino hasta que ellos impactan contra la carga o contra el cilindro. Cuando el nivel de carga en el molino es bajo, el impacto de las bolas se puede producir directamente sobre el cilindro generando ruptura de los medios moledores y dañando seriamente los revestimientos.

#### 2.2.10.3.Zona de compresión:

La carga tiende a pegarse a la coraza, en este caso se reduce drásticamente la ruptura por impacto y sólo actúan los mecanismos

de abrasión y compresión por la fuerza centrífuga y presión de la carga.

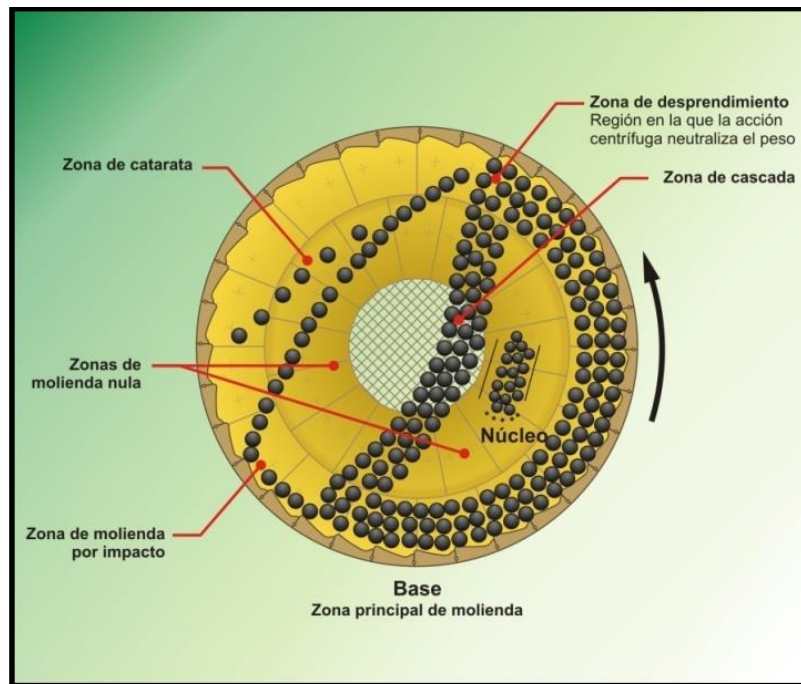
Se dice que la carga en el molino sigue un movimiento de catarata, cuando los medios de molienda bolas son arrojados desde la parte alta de la carga hasta el pie de ella. El movimiento de catarata generalmente produce fragmentación por impacto, lo que da lugar a un producto de molienda gruesa.

En general el movimiento de la carga en el molino es una combinación de movimientos de cascada y catarata, en el gráfico, se indica los movimientos indicados.

En el interior del molino para que puedan tener lugar la elevación y caída de los cuerpos moledores (bolas) es necesario que en la pared interior del molino existan forros con barras levantadoras ó lanners corrugados "lifters", de otra forma la carga se deslizaría como un todo por la superficie interior del molino.

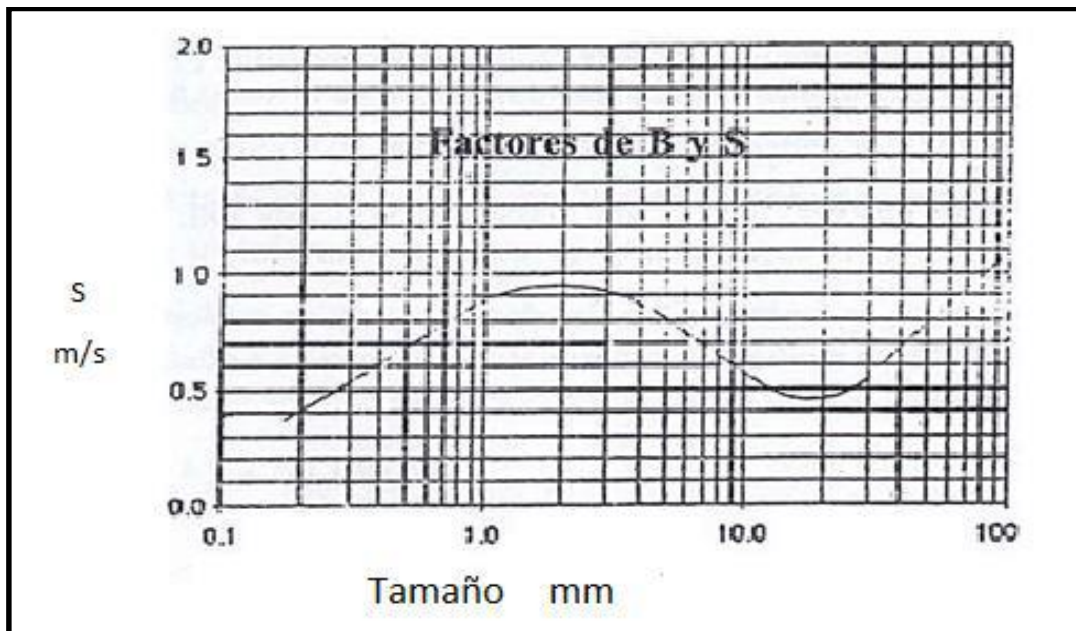
Consecuentemente, en la molienda tradicional por bolas conviene tener el mínimo de catarata; en la molienda por barras también conviene tener el mínimo de catarata para evitar el entrecruzamiento de las barras; sin embargo, en la molienda SAG conviene tener una fracción de la carga en catarata para promover adecuadamente el fracturamiento del mineral fino e intermedio causado por la fracción gruesa. A su vez, el mineral grueso, con los golpes que aplica se va desgastando hasta alcanzar un tamaño en el cual puede ser fracturado por las bolas o fracción gruesa de la carga fresca.

Figura N° 2.23: Característica del movimiento cascada y catarata de carga



Fuente: Manual Tecsup.

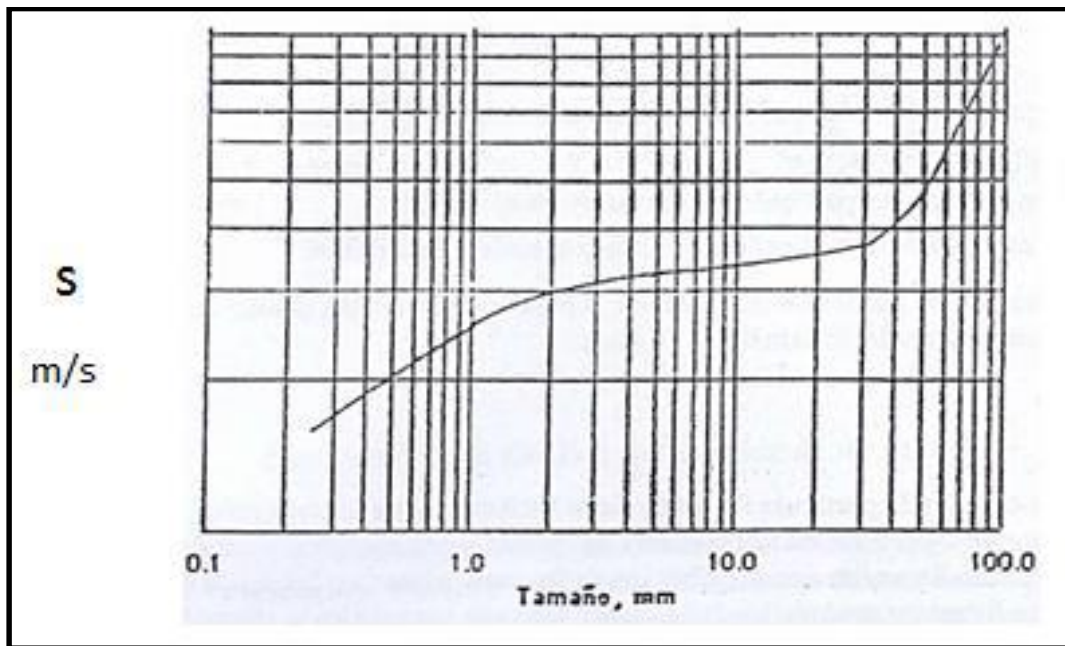
Figura N° 2.24: Forma típica de los valores de la velocidad específica de molienda (s), en función del tamaño.



Fuente: Compendio de Conminución, 2003



Figura N° 2.25: Forma típica de la distribución de fractura acumulada (b), en función de tamaño.



Fuente: *Compendio de Conminución, 2003*

Aunque la descripción de los mecanismos de molienda es útil para explicar por qué ocurre la fractura, no ha servido para desarrollar un análisis cuantitativo de los sistemas de reducción de tamaño. Esto se debe a que es muy difícil aislar los tres mecanismos teóricos en forma experimental.

A pesar de esta dificultad, ya se han realizado algunos avances en el estudio del proceso y es posible medir tasas de abrasión y tasas de fractura.

Los valores B y S son muy útiles para desarrollar un estudio en el interior del molino y un modelo matemático del mismo. Sin embargo, S y B dependen de las condiciones y de las características del mineral, por lo que se necesita tener relaciones matemáticas que representen estas dependencias. Es importante notar que en un

molino semi-autógeno, la carga moledora está compuesta por dos componentes:

- Las rocas de mineral
- Las bolas de acero.

En este caso, las tasas de fractura (velocidad específica de fractura) y la distribución de los fragmentos va a ser la resultante de la acción de ambos medios de molienda. La adición de bolas es una forma de controlar el balance entre los distintos mecanismos de molienda, siendo favorece la ruptura por impacto y compresión.

Por otra parte, en términos generales la dureza puede ser definida como la resistencia a la fractura, es decir, la resistencia a la propagación de grietas que dividen la roca en fragmentos de menor tamaño. Por la naturaleza heterogénea de los yacimientos, los minerales no poseen una sola dureza, sino que más bien presentan un rango entre un valor alto que dará origen a un "mineral duro" y un valor bajo que dará origen a un mineral blando. La existencia de esta variabilidad hace que la operación de los molinos SAG tenga fluctuaciones, pasando de una alta capacidad de procesamiento para minerales de una dureza adecuada, a una baja capacidad de procesamiento para minerales muy duros. Normalmente, esta dureza se refleja en la distribución de tamaños en el flujo de alimentación. La mejor forma de minimizar este problema es suministrando al molino una mezcla de alimentación de dureza promedio y constante. En la práctica, es muy difícil poder implementar esto, ya que se

requiere de una programación de la explotación del yacimiento y un control de inventario de los acopios de mineral detallado.

En resumen, podemos decir que los factores que afectan la molienda son:

- Dureza del mineral.
- Composición de los medios de moledores (bolas-rocas).
- Distribución de tamaño de los medios de molienda.
- Nivel de llenado del molino.
- Densidad de la pulpa.

Esto es una muestra de cómo a partir de los parámetros s. y b. es posible formular modelos que permiten representar la conducta del molino frente a cambios de granulometría de alimentación, dureza, flujo de sólidos y de líquidos entre otros. Ahora se puede decir que los principales factores que afectan el transporte de mineral a través del molino son:

- Densidad de la pulpa.
- Distribución del tamaño de la carga, que depende mucho de la distribución de tamaño de la alimentación.

#### **2.2.11. Variables de operación del molino SAG.**

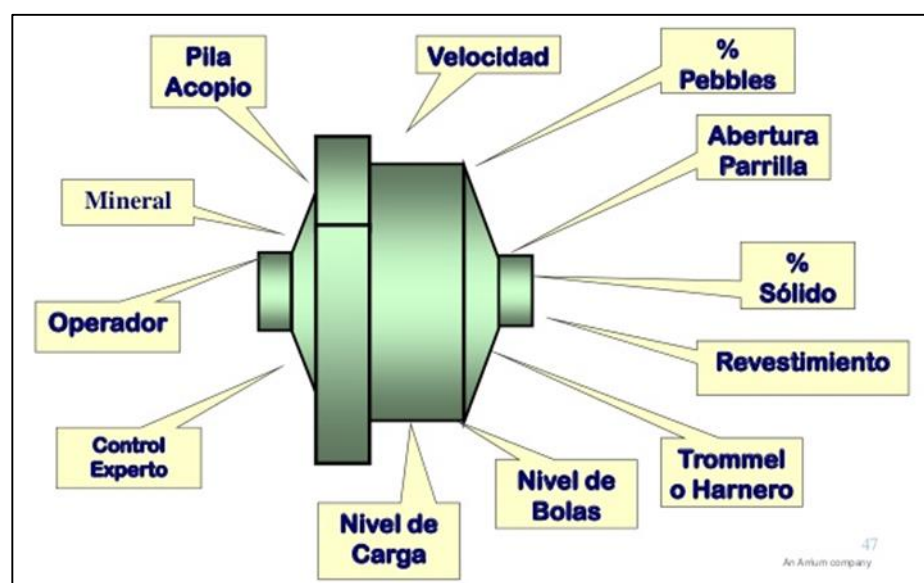
Antes de analizar cada variable, vamos a enumerar las características y el modo de operación de un molino SAG:

- Utilizar una parrilla de descarga que evite que las partículas gruesas dejen el molino.
- El flujo del mineral a través de la parrilla es proporcional a la masa

de mineral fino en el interior del molino.

- La tasa de alimentación no afecta mayormente el tamaño de la descarga.
- El mineral de llenado aumenta con el flujo de alimentación.
- Existe un flujo máximo que permite una operación estable.
- La distribución de tamaño del mineral retenido define las tasas de molienda.
- El mineral actúa simultáneamente como agente de molienda y como material sometido a molienda.
- La carga del molino y el flujo máximo de procesamiento quedan determinados principalmente por las características del mineral y no por el operador.
- Puede ocurrir una acumulación de partículas de un cierto tamaño, problema conocido como la existencia de un tamaño crítico.

*Figura N° 2.26: Perturbaciones asociadas a la operación del molino SAG.*



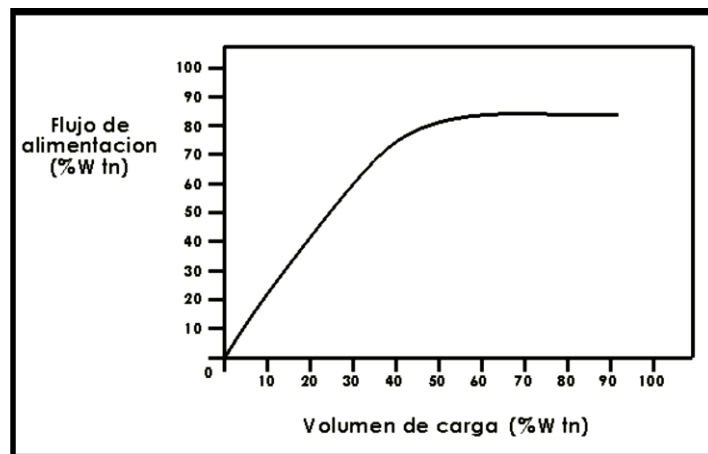
*Fuente: Moly-cop.*

### 2.2.12. Variables manipulables.

#### a) Flujo de alimentación fresca:

El grado de llenado de un molino SAG depende del flujo de alimentación del mineral fresco con que opera; mientras mayor sea el flujo de alimentación, mayor será el volumen de la carga con que trabaja el molino. Esto se debe a que la molienda y la descarga de mineral son procesos cinéticos, en los cuales, si las condiciones operacionales permanecen constantes, las masas de mineral molido y descargado por unidad de tiempo son proporcionales a la masa presente en el molino. En consecuencia, para igualar (balancear) un aumento de flujo de entrada, la cantidad de mineral presente en el molino debe necesariamente aumentar; esto ocurre así hasta un cierto valor de llenado del molino, sobre el cual el proceso se revierte. Debido a que el volumen de la carga está relacionado con el flujo de alimentación, como se indica en la figura, en la práctica el nivel de la descarga se controla ajustando el flujo de alimentación.

*Figura N° 2.27: Relación entre el flujo de alimentación y el volumen de la carga.*

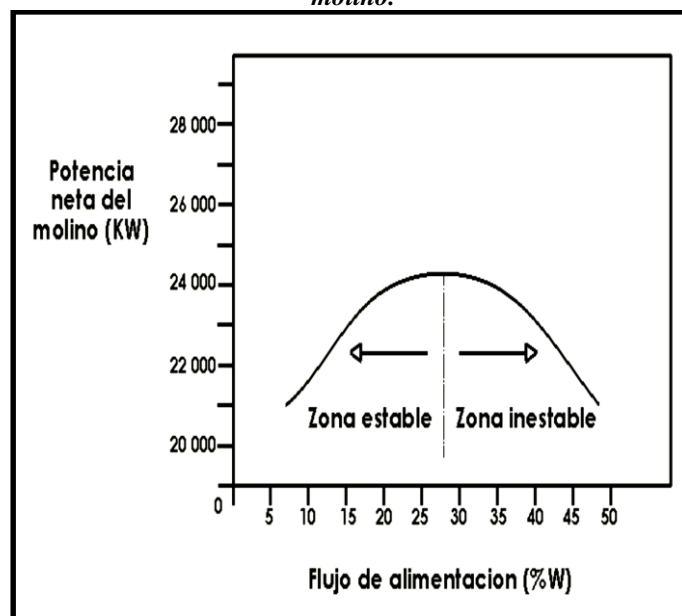


Fuente: Compendio de Conminución.

Se observa que la potencia aumenta con el flujo, comenzando desde un valor cero; a medida que el flujo de alimentación crece, la potencia consumida se incrementa hasta llegar a un valor máximo. Un flujo de alimentación mayor provocará una sobrecarga y la potencia comenzará a caer rápidamente. En esta condición de sobrecarga, la intensidad de la acción de molienda se reduce y la capacidad de tratamiento del molino disminuye. Frente a esta situación el operador pasará la alimentación de sólidos al molino siguiente lo que permitirá que se vacíe y, por lo tanto, la tasa de la alimentación será más baja; se repite hasta estabilizar la operación nuevamente.

Además de la relación mencionada, el volumen de la carga tiene un efecto directo en la potencia, de tal manera que el flujo de alimentación y la potencia queda relacionado como se indica en la figura N° 2.28.

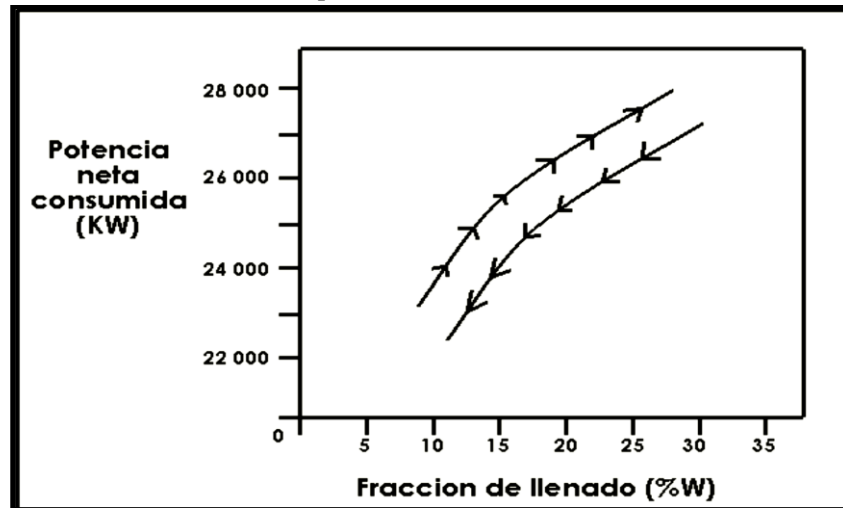
**Figura N° 2.28: Efecto del flujo de alimentación en función de la potencia neta consumida por el molino.**



**Fuente: Compendio de Conminución.**

La siguiente figura muestra la variación de la potencia consumida cuando un molino SAG es alimentado con mineral fresco hasta que se sobrecarga y luego se le permite vaciarse.

*Figura N° 2.29: Efecto de la carga fresca y vaciado de una sobrecarga en función de la demanda de potencia del molino*



**Fuente: Compendio de Conminución.**

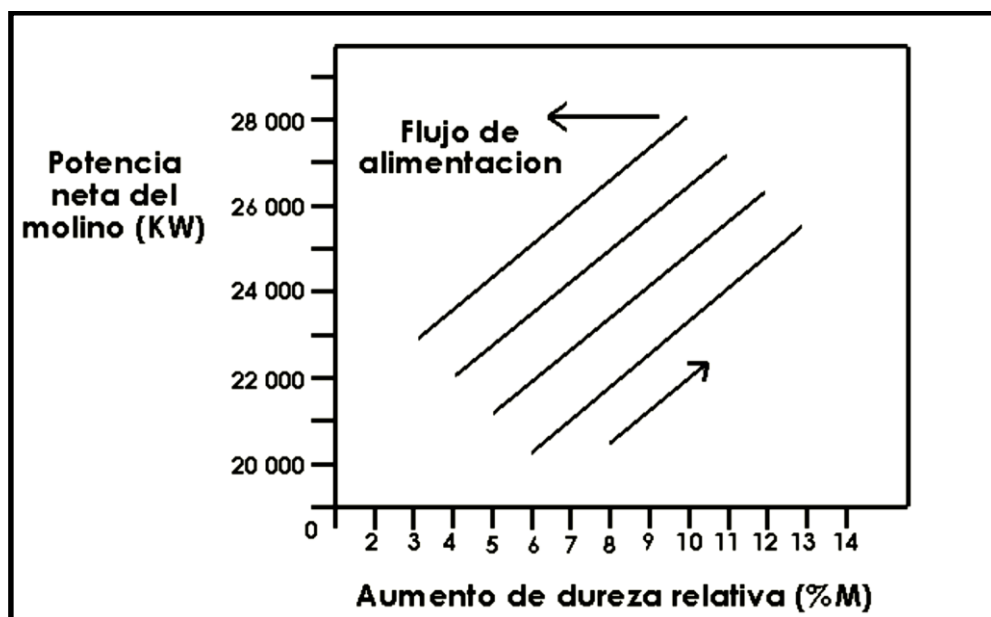
Es importante destacar que el máximo de la potencia cuando se está cargando el molino con "roca fresca" es mayor que el máximo cuando se encuentra vaciándose. Este efecto es el resultado del estado (o forma) de las rocas.

Cuando se agrega alimentación fresca, las rocas tienen formas irregulares y presentan un ángulo de reposo diferente que generalmente es mayor. Durante la fase de vaciado los guijarros (pebbles) formados a partir de la alimentación se habrán redondeado y rodarán más fácilmente sobre la carga, presentando un ángulo de reposo menor y en consecuencia demandarán menos energía.

b) Distribución granulométrica en la alimentación:

Otro factor que afecta al volumen de la carga en un molino SAG es la distribución de tamaño de partícula en la alimentación. La experiencia operacional ha mostrado que, para un flujo de alimentación fijo, el volumen de la carga en el molino es menor, mientras mayor es la proporción del mineral grueso en la alimentación. Visto de otra forma, para un volumen de carga constante, una mayor capacidad de tratamiento se logra cuando el mineral de alimentación es más grueso.

*Figura N° 2.30: Potencia neta vs aumento de la dureza relativa.*



Fuente: Compendio de Conminución.

Lo anterior se debe a que la capacidad moledora del molino está determinada por los medios de molienda, los cuales se forman a partir de las rocas de mayor tamaño en la alimentación. Si la cantidad de gruesos alimentada no es suficiente, la intensidad de la molienda en el molino será



reducida y la capacidad del molino será reducida y la capacidad del molino decrecerá. Este efecto se muestra en la figura N° 2.30.

El análisis anterior sólo será válido en el caso donde la dureza del mineral sea normal y permanezca constante y los cambios de granulometría correspondan a problemas de segregación natural en el mineral.

Si la cantidad segregada de mineral grueso en la alimentación aumenta demasiado, la capacidad de procesamiento del molino disminuirá, ya que estaría faltando la fracción fina, que es la que se muele; es decir el mineral se comportaría como si fuera más duro y la capacidad de molienda del molino bajaría. Esto también será así si el mineral se vuelve completamente fino.

Es importante notar que en estos dos casos (granulometría muy gruesa y muy fina) el mineral tendrá un alto consumo de energía específica, aparentando ser más duro (menor aptitud para ser molido en forma semi-autógena).

c) Dureza del mineral:

La dureza del mineral con que se alimenta al molino es algo sobre lo cual el operador no tiene control. Mientras más duro es el mineral, mayor será el tiempo que toma su reducción de tamaño. Por esto, para un flujo de alimentación constante, el volumen de la carga aumentará junto con la

dureza del mineral. Si el molino está operando con un tonelaje inferior a su capacidad máxima, al aumentar el volumen de su carga consumirá más potencia y el cambio en la dureza se compensará con un aumento del consumo de energía por tonelada de mineral fresco. Sin embargo, si el molino está siendo operado a su máxima capacidad, un aumento de la dureza producirá un sobrellenado que sólo podrá ser compensado con una disminución del tonelaje tratado.

### **2.2.13. Variables controladas.**

#### a) Densidad y viscosidad de la pulpa:

Están muy ligadas entre ellas desafortunadamente la densidad de la pulpa dentro del molino no puede ser medida directamente, de modo que lo que se mide y controla es la densidad de la pulpa en la descarga del molino. Es importante notar que ambas densidades, en la descarga y en el interior del molino, no son las mismas. La retención de agua en el molino es generalmente menor que la de sólidos finos, de allí que la densidad de la pulpa al interior sea mayor que en la descarga.

A través de la densidad de la pulpa en la descarga, es posible controlar el nivel de pulpa en el molino.

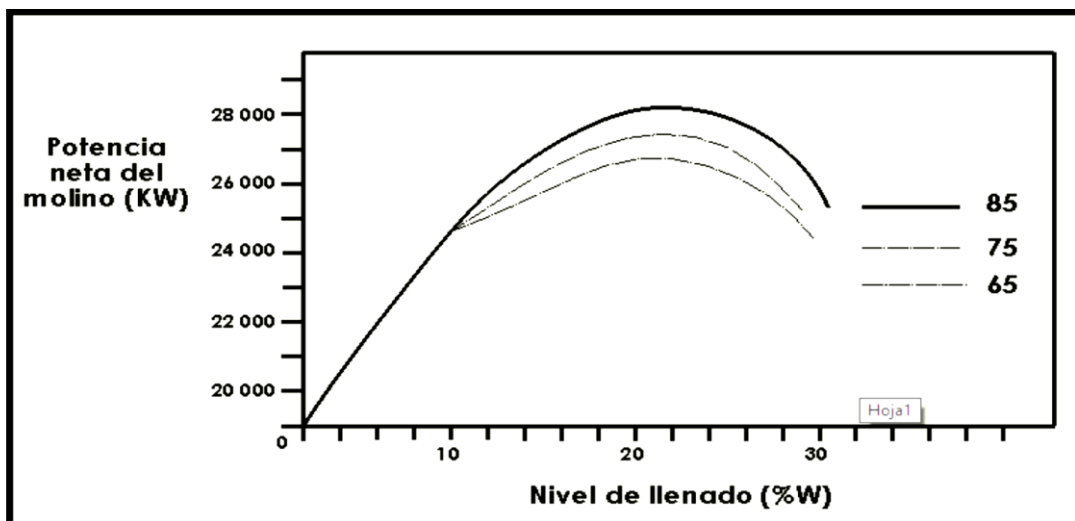
Si se aumenta el agua de alimentación, es posible descargar todos los finos con mayor rapidez.

En términos de tasas de descarga, lo que ocurre es que, aumentando la densidad, se incrementa la viscosidad y se reducen las tasas de descarga, provocando un aumento del volumen de pulpa y de la potencia, además de una disminución de la capacidad de procesamiento del mineral.

El aumento de la potencia se debe a un leve crecimiento de la masa en el molino y del ángulo de apoyo de la carga.

Una pulpa más densa y viscosa favorecerá un ángulo de apoyo mayor, que significa mayor demanda de potencia.

*Figura N° 2.31: Demanda de potencia del molino en función del llenado (j) para pulpas de distintos porcentajes de sólidos.*



Fuente: Compendio de Conminución.

La figura N° 2.31, muestra el aumento de la potencia relativa que se puede esperar al variar el porcentaje de sólidos de la pulpa al interior del molino, considerando que el ángulo de la carga permanece constante.

b) Carga de bolas:

Un factor que influye mucho en la operación de un molino SAG es el volumen de la carga de bolas. Este volumen se expresa como una fracción del volumen total del molino y puede variar entre 12% y 18% siendo el valor más usado un 16%. Existen dos casos generales en los cuales es deseable agrupar bolas en un molino SAG:

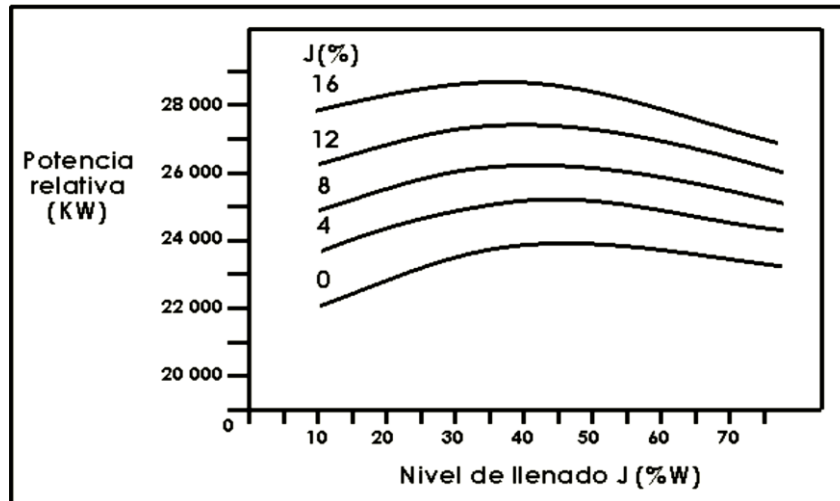
- Cuando se tiene una excesiva acumulación de mineral fino e intermedio, debido a una falta de rocas grandes en la alimentación al molino, que permita formar una carga apta para moler esos tamaños.
- Cuando existe una acumulación de rocas grandes debido a la incapacidad de la carga para romper esos tamaños.

En el primer caso es preferible una distribución de bolas relativamente finas, con un máximo de 5 pulgadas (127 mm).

Para el segundo caso una distribución más gruesa con bolas de tamaño máximo es más adecuada. En ambos casos, el uso de las bolas incrementa las tasas de molienda de los tamaños críticos y la capacidad de molienda se verá favorecida. El uso de las bolas eleva la densidad media de la carga y hace que la potencia demandada por el molino sea mayor, como se muestra en la figura, la cual se obtuvo para valores fijos de la carga de bolas, aumentando el nivel del molino a través de una mayor carga de mineral.

Esto tiene como consecuencia que la densidad media de la carga disminuye a medida que aumenta el llenado del molino.

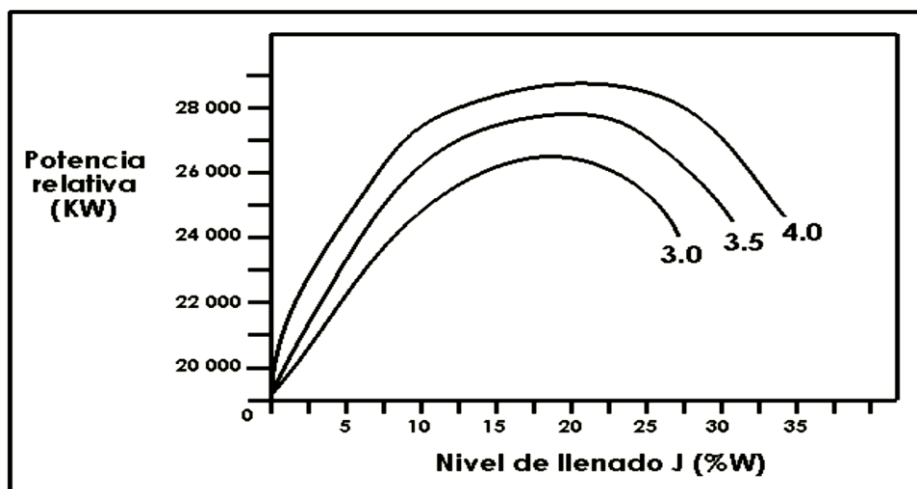
*Figura N° 2.32: Variación de la potencia en función del llenado del molino para distintas cargas de bolas.*



Fuente: Compendio de Conminución.

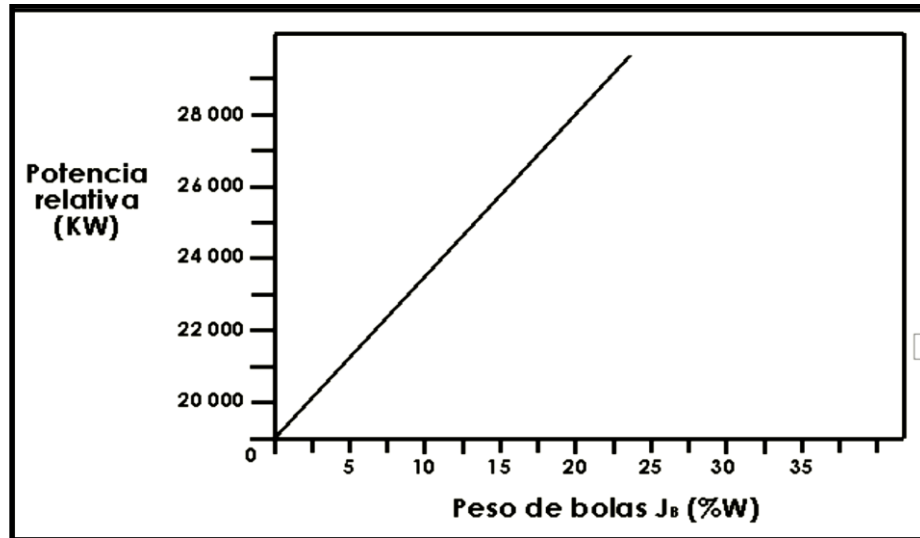
Si, por el contrario, mantenemos la densidad media de la carga fija, entonces al llenar el molino, la carga de bolas aumenta y la potencia relativa varía como se indica en la figura.

*Figura N° 2.33: Demanda de potencia del molino en función del llenado para distintas densidades de carga*



Fuente: Compendio de Conminución.

*Figura N° 2.34: Efecto de la carga de bolas en la potencia para un nivel de llenado del molino constante.*

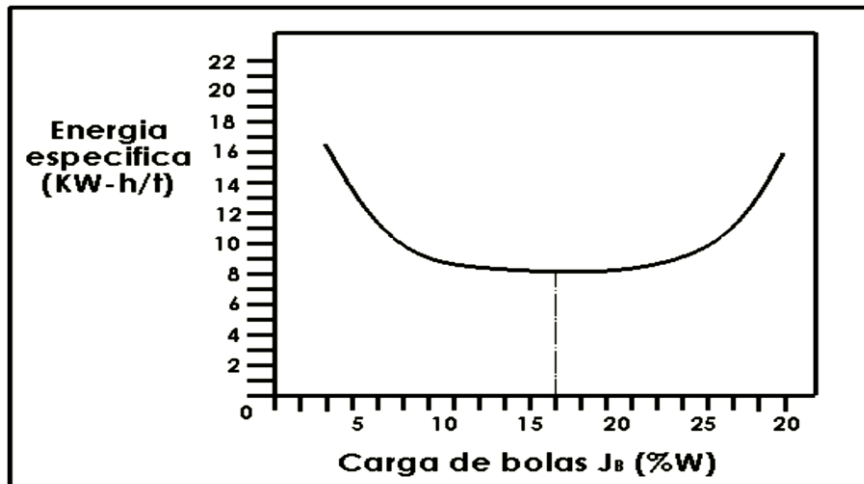


*Fuente: Compendio de Conminución.*

El efecto de un aumento de bolas en el molino para nivel de llenado constante de 31% se puede notar en la figura. En ella se aprecia que el aumento de potencia es directamente proporcional a la carga de bolas en el molino.

Un simple cálculo permite demostrar que para una fracción de llenado de un 25% del molino, el 8% corresponde a bolas y representa aproximadamente el 45% de la masa total del molino. El aumento del peso de la carga es la consecuencia del uso de bolas de acero y es quien produce un gran aumento del consumo de potencia en los molinos SAG. La carga máxima de bolas es de un 12% a 18% del volumen del molino. Este es un límite impuesto por el desgaste excesivo de las huellas y revestimientos del molino y demás por problemas mecánicos que se originan por el uso de cargas mayores.

Figura N° 2.35: Esquema del efecto de la carga de bolas ( $J_b$ ) en función de la energía específica



Fuente: Compendio de Conminución.

El uso de bolas de acero en el molino hace que éste entregue un producto más grueso y tenga una mayor capacidad por unidad de volumen. Sin embargo, se ha encontrado que para la mayoría de los minerales existe una carga de bolas óptima, que minimiza la energía específica consumida por el molino como se muestra en la figura N° 2.35.

La determinación de la carga de bolas óptima es un problema de carácter económico, pues una de las principales ventajas de costos para los sistemas autógenos es el bajo consumo de acero.

c) Distribución de tamaño de partículas de mineral en la carga:

Ya se indicó que la distribución de tamaño de partículas de mineral en la carga del molino está determinada principalmente por la distribución de tamaño de las partículas en la alimentación. Mientras más grueso sea el mineral en la alimentación más gruesa será la carga.

Esto afecta la retención de pulpa en el molino, debido a que las tasas de descarga a través de la parrilla dependen de la permeabilidad de la carga, que es función de su distribución de tamaños de partícula. En términos generales, mientras más gruesa es la carga, más permeable será y mayores serán las tasas de descarga.

Las variaciones en la tasa de descarga debido a la distribución de tamaños de la carga, pueden ser compensadas mediante el ajuste de densidad de la pulpa del molino, de tal manera que, a medida que la alimentación se torna más gruesa, uno podría incrementar la capacidad de descarga.

Sin embargo, la alimentación más gruesa tiende a aumentar la carga circulante, lo cual implica aumentar la densidad de la carga automáticamente sin la intervención del operador.

En todo caso, es probable que se obtengan beneficios adicionales al aumentar la densidad de la pulpa frente a una carga más gruesa. Esto debido principalmente a que para aumentar el fracturamiento necesitamos aumentar la altura de caída (o ángulo de la carga), lo que es posible lograr a través de una mayor densidad de la pulpa. También puede darse el caso de que para una carga gruesa y dura convenga más diluir al máximo la alimentación al molino, ya que con eso promovemos el desgaste de las rocas.

Contradictoriamente, cuando el mineral de alimentación viene muy fino,



también podría convenir disminuir la densidad de la pulpa con el objeto de evacuar el mineral en un estado más grueso como una manera de compensar, la falta de capacidad de molienda.

El planteamiento anterior no es válido para todos los minerales, ya que cada mineral presenta un comportamiento específico, distinto en todos los casos. Puede darse ciertos niveles de granulometría y porcentaje de sólidos que permitan analizar la existencia del fenómeno de empaquetamiento del molino. Este problema consiste en que se deposita y se fija el material fino e intermedio entre los levantadores de carga del molino y puede controlarse con un adecuado manejo del porcentaje de sólidos en el molino.

d) Angulo de la carga:

El ángulo de la carga es un factor determinante del consumo de potencia del molino. Hasta la fecha no se ha desarrollado estudios que permitan establecer la forma en que el ángulo de la carga se ve afectado por las condiciones de operación.

#### **2.2.14. Caracterización de la dureza del mineral para los molinos SAG.**

Una desventaja de la prueba de molienda por lotes y del modelo de balance de población es la dificultad de separar la influencia de las propiedades específicas del material (la función fractura) de las propiedades específicas

de la máquina (las tasas de rotura o función de selección) de una manera significativa en el contexto de la molienda industrial. Es por ello, que varios investigadores han desarrollado distintas pruebas de rotura para investigar las características importantes en el proceso de trituración complejo, distinguiéndose básicamente tres tipos de sistemas de rotura: impacto, comprensión y corte.

#### 2.2.14.1. JK DropWeight test.

La prueba de JK Drop Weight fue desarrollada por el Centro Australiano de Investigación en Minerales, Julius Kruttschnitt.

El principal objetivo de la prueba es la de determinar funciones de energía versus distribuciones de quebrantamiento para una serie de partículas minerales de diversos tamaños, los que oscilan de 2 ½ a ½ pulgadas.

Estas funciones se usan entonces para determinar el rendimiento de chancado y las características de molinos AG/SAG.

Los parámetros determinados a partir de las pruebas se usan para la simulación de circuitos de molienda y modelamiento utilizando el “Software JK SimMet”.

En la molienda AG/SAG existen dos mecanismos de rompimiento:

- De impacto, (alta energía).
- De abrasión, (baja energía).

La Tabla N°2.1, indica los valores típicos y su significado de los parámetros, tanto para la prueba de “JK Drop Weight”, A y b; como para la Prueba de Abrasión, Ta.

**Tabla N°2.1: Parametros de A \* b y Ta**

Property	Very Hard	Hard	Mod. Hard	Medium	Mod. Soft	Soft	Very Soft
A*b	<30	30-38	38-43	43-56	56-67	67-127	>127
Ta	<0.24	0.24-0.35	0.35-0.41	0.41-0.54	0.54-0.65	0.65-1.38	>1.38

**Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).**

Estos utilizan dos métodos separados:

- a) Los parámetros de quebrantamiento por impacto, A y b, se determinan utilizando un equipo de rompimiento por alta energía de impacto, que se denomina el “JK Drop Weight Tester”.
- b) El parámetro de rompimiento por abrasión, Ta, se determina por una prueba de deslizamiento.

Los tres parámetros relevantes de la prueba de Drop Weight para la molienda AG/SAG, son A, b y Ta.

- A y b son utilizadas para caracterizar el quebrantamiento por

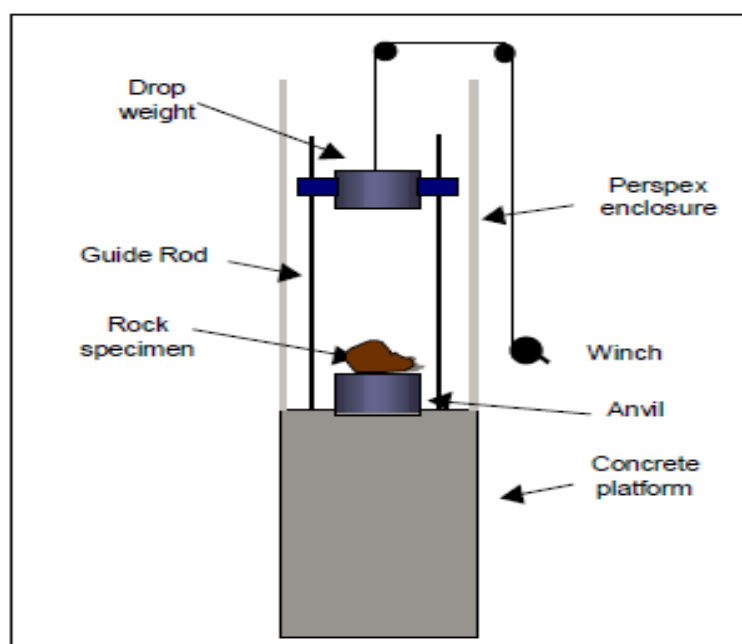
impacto del mineral.

- El parámetro  $T_a$  es la medida de la resistencia del mineral a la abrasión.

En ambos casos, cuanto menor es el valor, mayor es la resistencia del mineral al tipo de quebrantamiento.

La Figura N° 2.36 esquematiza la prueba de caída de peso, la cual consiste en un peso de acero montado en dos rieles que se suelta por medio de un interruptor neumático y cae por efecto de la gravedad para impactar una partícula individual montada sobre un yunque de acero. El dispositivo de caída de peso estándar está acondicionado con una masa de 20kg, la cual puede aumentarse hasta 50kg. El rango de alturas de caída efectivo es 0,005 a 1,0 metros, lo que representa un amplio rango de energías operativas, de 0,01 a 50 kWh/t (basado en partículas de 10 a 50mm). Estas masas fueron diseñadas para probar minerales de roca dura, cuyos pesos específicos varían entre 2,8 y 4 g/cc.

*Figura N° 2.36: Dispositivo de prueba por caída de peso JKMRC.*



Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).

Un concepto clave en el análisis de datos provenientes de la caída de peso, es que las distribuciones de tamaño de producto son una función de la reducción de tamaño o energía de trituración específica,  $E_{cs}$  (kWh/t). Para modelar este proceso de rotura, se utiliza una manera simple de relacionar la energía con la reducción geométrica de tamaño. Como muestra en la Ecuación siguiente.

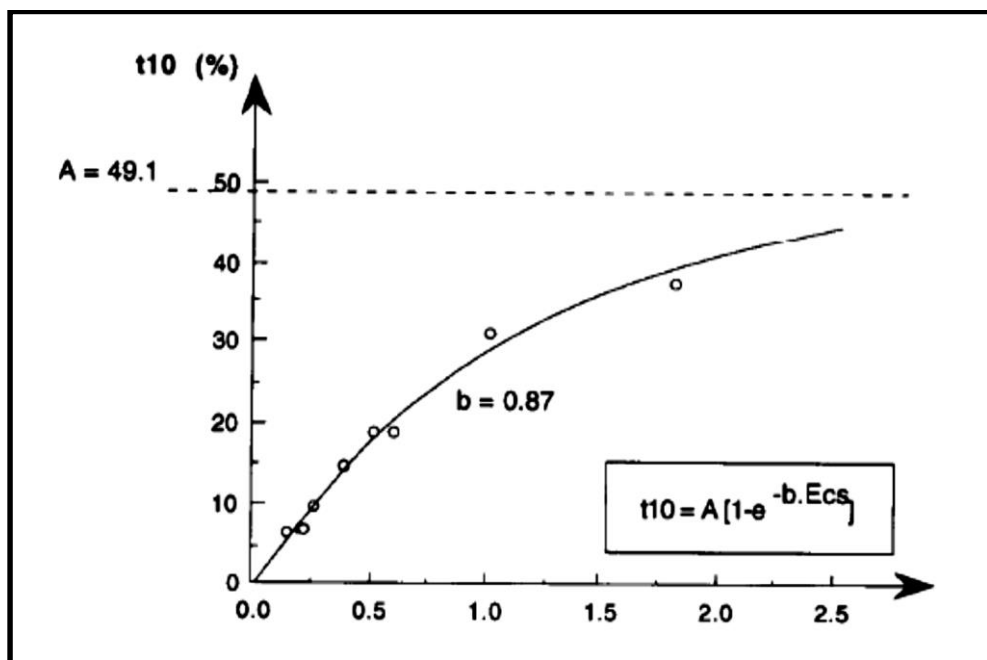
$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}})$$

Donde el  $t_{10}$  es porcentaje acumulativo que pasa de la décima parte del tamaño de partícula original,  $E_{cs}$  es la energía de trituración específica (kWh/t),  $A$  y  $b$  son los parámetros de rotura por impacto del mineral.

Luego, las relaciones entre los parámetros de rotura se muestran gráficamente en la Figura N° 2.37 y descrita por la siguiente ecuación:

$$Axb = \left. \frac{dt_{10}}{dE_{cs}} \right|_{E_{cs}=0}$$

Figura N° 2.37: Efecto de energía de trituración específica sobre el índice de rotura,  $t_{10}$ .



Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).

El Axb representa el valor de la pendiente cuando la energía de entrada es cero y es una forma de medición de la dureza, donde una pendiente pronunciada en la curva t10 - Ecs, representa un mineral blando, es decir, que hay alta fragmentación a una baja energía aplicada, en contraste con pendiente de curvas bajas que hace referencia a una roca dura.

**Tabla N° 2.2: Resistencia a la rotura Axb**

<i>Intervalo A x b</i>		<i>Resistencia a la rotura de impacto</i>
<i>De</i>	<i>Hasta</i>	
<i>10</i>	<i>19,9</i>	<i>Extremadamente duro</i>
<i>20</i>	<i>29,9</i>	<i>Muy duro</i>
<i>30</i>	<i>39,9</i>	<i>Duro</i>
<i>40</i>	<i>49,9</i>	<i>Duro moderado</i>
<i>50</i>	<i>59,9</i>	<i>Medio</i>
<i>60</i>	<i>69,9</i>	<i>Blando moderado</i>
<i>70</i>	<i>89,9</i>	<i>Blando</i>
<i>90</i>	<i>149,9</i>	<i>Muy blando</i>
<i>&gt;</i>	<i>150</i>	<i>Extremadamente blando</i>

**Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).**

#### 2.2.14.2. Pruebas de carga puntual, (PLT).

La prueba de carga puntual, también conocida como prueba de índice de resistencia de carga puntual, se utiliza para calcular el índice de resistencia de una muestra de roca. A partir del índice de resistencia de la roca, se pueden estimar otros parámetros de la roca, como la resistencia a la compresión uniaxial. Se requiere bloques de muestra con características únicas, sin embargo, la muestra no debe tener irregularidades abruptas que puedan generar concentraciones de estrés. Si hay irregularidades abruptas, deben eliminarse con una sierra de roca o un cincel. No hay especificaciones para la forma de la muestra, ya que se pueden usar formas diametrales, axiales. El procedimiento de PLT ha sido estandarizado por la International

Society of Rock Mechanincs (ISMR 1985). En una prueba de carga puntual, se monta una muestra de roca entre dos placas puntiagudas y se aplica presión hasta que se produce el fallo de la muestra. Se registra la carga máxima aplicada, en la figura N° 2.38, se puede apreciar el equipo para realizar la prueba de carga puntual.

*Figura N° 2.38: Equipo usado en la prueba PLT*



**Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).**

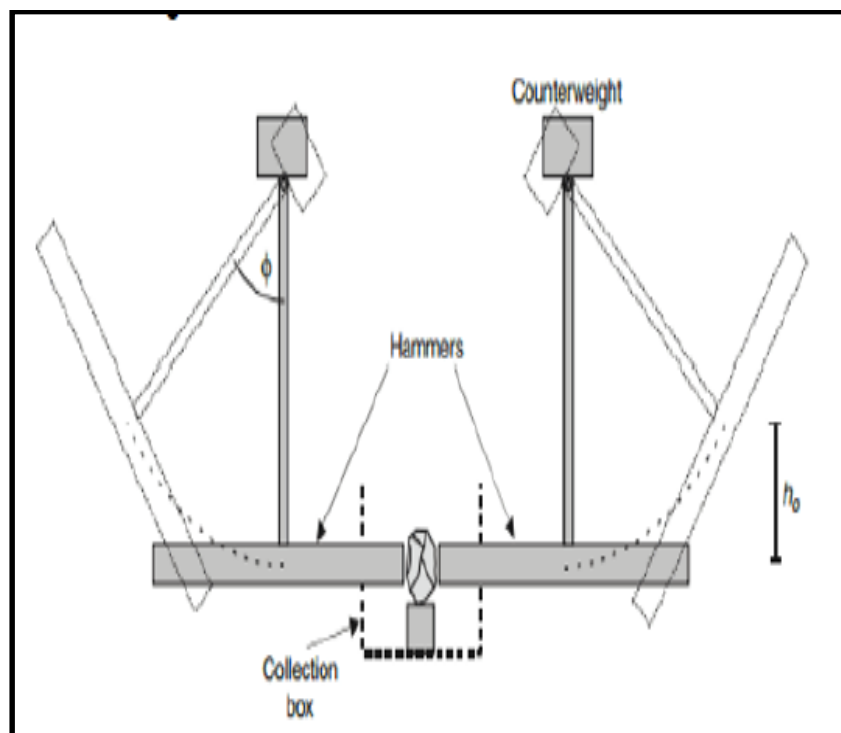
#### 2.2.14.3. Prueba de impacto de baja energía bond, (LEIT).

La prueba permite determinar el índice de trabajo de chancado (CWi) del mineral. Este índice se emplea en la Tercera Ley de la Conminución para estimar requerimientos energéticos necesarios para dimensionar diversos equipos de chancado para alcanzar un tamaño P80 determinado.

La prueba se realiza impactando 20 rocas de una muestra, en el rango de tamaño  $-3'' +2''$ , las que son medidas inicialmente para determinar su espesor promedio. A continuación, a través de un equipo de impacto que consta de dos martillos tipo “péndulo”, la muestra es inicialmente impactada con un nivel bajo de energía, el que se incrementa progresivamente, aumentando la elevación de los martillos, hasta que la roca se fractura, Figura N° 2.39.

La energía medida en el momento de la ruptura de la roca, en conjunto con el espesor y la gravedad específica de la roca.

*Figura N° 2.39: Esquema del Equipo LEIT*



Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).

Permite determinar un índice de chancabilidad o Índice de trabajo de chancado (kWh/ton), Figura N° 2.40.



*Figura N° 2.40: Equipo utilizado para realizar la prueba LEIT*



**Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).**

#### 2.2.14.4. Pruebas de sag mill comminution, (SMC).

El Test SMC es una prueba resumida de la prueba JKDWT y cuenta con 2 etapas:

- **Impacto:** Mide la resistencia a la fractura por impacto de partículas finas para una fracción.
- **Densidad de Roca:** Mide la densidad a 30 partículas de mineral.

El resultado del test es un índice Drop Weight (DW) expresado en kWh/t, además de los índices de impacto “A” y “b”.

El resultado es empleado como medida de la variabilidad de dureza en el yacimiento (zona mineral / tipo mineral). Los índices “A” y “b” pueden ser usados directamente en JKSimMet para el diseño, expansión y optimización de plantas de molienda AG/SAG. La Tabla N° 2.3. Muestra el tamaño y cantidad de partículas que se requiere para esta prueba.

**Tabla N° 2.3: Tamaño y Número de Partículas**

Prueba	Ítem	Tamaño de partícula (mm)	N° de partículas
SMC	1	31,5 + 26,5	150

**Fuente: Resultado de evaluación.**

#### 2.2.14.5. Índice de abrasión de bond, AI.

La prueba determina el Índice de Abrasión que puede usarse para determinar el desgaste de componentes de acero y del revestimiento en las trituradoras, molinos de rodillos y molinos de bolas. Bond desarrolló las siguientes correlaciones dando la tasa de desgaste en libras de desgaste de metal/kWh de energía usada en el proceso de trituración.

Aparentemente no hay una correlación que pueda usarse para la molienda autógena. El equipo está formado por un tambor rotatorio el cual gira a una velocidad de 70 rpm y un eje principal el cual gira a una velocidad de 620 rpm; ambos en la misma dirección. En este último se coloca la paleta fabricada con una aleación de acero estándar templado a 500 Brinell. Se utiliza 4 cargas de mineral de 400 gramos, a una granulometría de  $-3/4'' + 1/2''$ . Cada carga es colocada dentro del cilindro y sellada con la tapa. Luego se hace girar la paleta, previamente pesada en una balanza de 4 dígitos, durante un intervalo de 15 minutos. Luego el material es retirado y almacenado en una bandeja. El mismo procedimiento se repite con las siguientes 3 cargas, en donde el material final de las 4 cargas es juntado, homogenizado y sometido a un análisis granulométrico. Finalmente, la paleta es retirada, se limpia en alcohol para remover partículas finas u otros materiales y es pesada nuevamente en una balanza de 4 dígitos. La diferencia de pesos es considerada como el índice de abrasión (Ai). Este

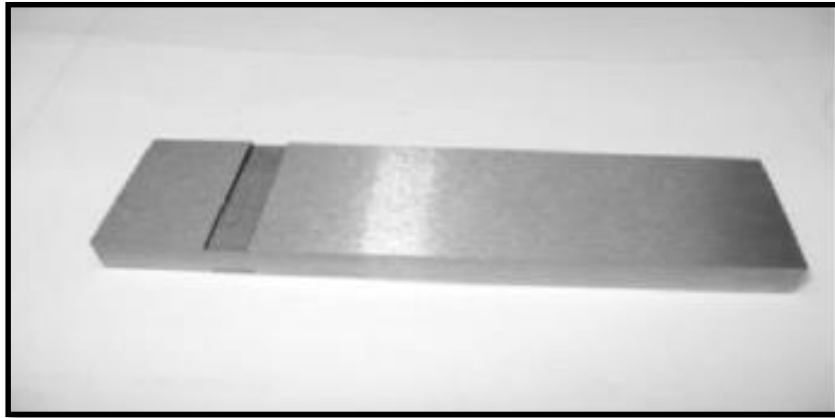
índice puede ser empleado para determinar el desgaste de componentes de acero y del revestimiento en las chancadoras, molinos de rodillos y molinos de bolas. La Figura N° 2.41, muestra la paleta utilizado en la prueba de abrasión respectivamente y la tabla N° 2.41 muestra la composición de la paleta de abrasión.

**Figura N° 2.41: Equipo de Abrasión**



**Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).**

**Figura N° 2.42: Paleta de Abrasión**



**Fuente: JKTech Pty Ltd (2018).**

#### 2.2.14.6. Pruebas de índice de trabajo para molinos de bolas, (BBWi)

Esta prueba permite determinar el Índice de Trabajo de Bond en molino de bolas para el mineral. Este parámetro puede ser utilizado en la Tercera Ley de Conminución de Bond para estimar los requerimientos energéticos netos del circuito de molienda, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$W = W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)$$

Donde:

W = Consumo de Energía del circuito de molienda industrial

Wi = Índice de Trabajo de laboratorio, corregido por seis factores definidos por Bond

F80, P80 = Tamaños donde se encuentran el 80 % pasante de la alimentación y el producto

**Figura N° 2.43: Molino de Bolas**



**Fuente: Elaboración propia**

La prueba corresponde a un circuito cerrado en seco con un molino de bolas estándar que opera con clasificación.

La malla de corte usada para las pruebas fue de 100 mallas ASTM (150  $\mu\text{m}$ ).

La Figura N° 2.43, presenta el equipo de Bond utilizado para la ejecución de las pruebas.

La Tabla N° 2.4, presenta el collar de bolas del molino bond utilizado para la ejecución de las pruebas:

**Tabla N° 2.4: Collar de Bolas Para Molino Bond**

Diámetro (pulg)	N° de Bolas	Peso (g)
1 ½	25	5572,5
1 ¼	39	5044
1	60	3960,9
7/8	68	3000,2
¾	93	2547,1
Total	285	20124,7

**Fuente: Manual JKTech Pty Ltd (2018).**

Asimismo, el volumen interno del molino es de 22,1 L. y la rotación del molino es de 70 RPM.

### **2.2.15. Modelamiento de procesos metalúrgicos**

Los modelos matemáticos para la predicción del comportamiento de las operaciones metalúrgicas han sido estudiados desde muchos años atrás pero no fue hasta 1960 cuando aparecieron las computadoras digitales que se realizaron serios esfuerzos para que la simulación de circuitos pueda ser realizada. Desde entonces la simulación de procesos ha crecido rápidamente hasta el punto en que hoy en día la mayoría de procesos pueden ser simulados con razonable precisión para propósitos de diseño y optimización.

La simulación de procesos por computadora está íntimamente ligado con el modelamiento matemático de las operaciones reales.

La clave para obtener resultados adecuados cae directamente en la necesidad de modelos precisos.

#### **2.2.15.1. Modelos teóricos:**

Son los más efectivos debido a que son válidos sobre un rango completo de condiciones, siendo desarrollados a partir de principios científicos.

Requieren de un amplio conocimiento del proceso.

Los modelos de procesamiento de minerales son raramente de este tipo, principalmente debido a las complejidades de la fisicoquímica de los procesos.

#### **2.2.15.2. Modelos empíricos:**

Son los más simples y se generan a partir de data adquirida del proceso. Resultan simples y rápidos de desarrollar que los modelos teóricos. Frecuentemente expresan el rendimiento del proceso en términos de las variables del proceso haciendo uso de técnicas de regresión lineal. A pesar de que los modelos empíricos no son bien aceptados por los académicos, los modelos empíricos son los más empleados en el campo operacional.

Un ejemplo típico para de modelo empírico que se emplea comúnmente, es la curva de partición, la cual es usada para evaluar la eficiencia de clasificación y otros procesos de separación.

#### 2.2.15.3. Modelos fenomenológicos

Se desarrollan a partir de la combinación de los modelos teóricos con los empíricos. Son desarrollados a partir de la descripción mecanicista del proceso en unión con parámetros del proceso de alto significado físico, determinados por medio de experimentos en vez que de la ciencia básica. Estos modelos dan representaciones más realistas de los procesos que los modelos empíricos y son capaces de extrapolarse. Un ejemplo de este tipo es el modelo de Balance Poblacional usado para simular procesos de conminución.

#### **2.2.16. Simulador metalúrgico.**

Debido a los altos costos de capital y de operación que se presentan en los circuitos de procesamiento y con el objetivo de reducir los costos hasta el mínimo posible sin alterar el rendimiento metalúrgico, el ingeniero

Metalurgista deberá ser capaz de predecir el rendimiento metalúrgico de cada circuito que será considerado en el diseño final. De esta manera equilibrando costos y rendimientos se podrá seleccionar la mejor alternativa para el diseño final.

La simulación de procesos se ha convertido en una herramienta poderosa para el diseño y optimización de plantas de procesamiento de minerales.

Económicos: El empleo de la simulación tiene un menor costo que realizar modificaciones en plantas o construir diferentes tamaños de plantas pilotos para evaluar alternativas de procesamiento.

Operativos: Es más fácil desarrollar y probar estrategias de operación alternativas por medio de modelos matemáticos que por medios experimentales (seguro y en menor tiempo).

- Herramienta para el aprendizaje del comportamiento de los circuitos.
- Proporciona un método rápido, seguro y eficaz para la realización de estudios.
- Entrega de manera clara y transparente los resultados de manera que sirve como documento que sustente los cambios.

En la actualidad existen diversas herramientas informáticas (software) para la simulación de la mayoría de procesos que se encuentran en una planta de concentración de minerales.

Software para Simulación de Procesos Metalúrgicos:



- JKSimMet, JKSimFloat
- CEET / FLEET
- USimPac
- Modsim
- Limn: The Flowsheet Processor
- Moly-Cop Tools.
- Metsim

#### 2.2.16.1. JKSIMMET:

Para la obtención del rendimiento de la planta es necesario resolver el balance de masa. Para ello, se necesita conocer la tasa de fractura de un mineral, definida como fracción de material roto por unidad de tiempo, la función de distribución de fractura, que es la distribución de tamaños de un mineral por algún evento de rotura y la tasa de descarga, que es la velocidad con que las partículas salen del molino por unidad de tiempo.

Actualmente se emplea el simulador JKSimMet, software que facilita la simulación de operaciones de planta en los procesamientos de minerales y ha sido desarrollada en base a décadas de experiencia en el centro de Investigación Minero Australiano JKMRC de la Universidad de Queensland en Australia (Marquina,s.f). Sus principales objetivos son:

- Simular procesos de chancado y molienda.
- Simular procesos de clasificación.
- A través del ajuste de modelo, permitir la caracterización de plantas de procesamiento de minerales.

- Llevar a cabo la optimización de circuitos existentes.
- Realizar estudios de diseño conceptuales.
- Evaluar la idoneidad de distintos diagramas de flujo, para alcanzar los objetivos de funcionamiento deseados.
- Ser una herramienta de ayuda para el ingeniero, en el análisis de circuitos.

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Mineral.** Es aquella sustancia sólida, natural, homogénea, de origen inorgánico, de composición química definida.

**Mena.** Minerales de valor económico, Corresponden a minerales sulfurados y oxidados, que contienen el elemento de interés, por ejemplo, cobre, molibdeno, zinc, etc.

**Proceso Metalúrgico.** Obtención del metal a partir del mineral que lo contiene en estado natural, separándolo de la ganga.

**Throughput.** Tasa de procesamiento diario.

**Dureza del mineral.** Entendiendo por “dureza” la dificultad o facilidad para reducir de tamaño un mineral.

**Molienda.** La molienda es un proceso que se refiere a la pulverización y a la dispersión del material sólido, ya sean granos de piedras o cualquier otro material sólido.

**Molino.** Es todo ingenio, artefacto o maquinaria que sirve para moler utilizando una energía.

**Molino de bolas.** Es un tipo de molino utilizado para moler y mezclar materiales por uso en procesos de mezclado de minerales. Funciona por el principio de impacto y fricción: la reducción de medida se obtiene por impacto al caer las bolas desde arriba del cilindro.

**Molino SAG.** Molino semiautógeno, son equipos de mayores dimensiones y más eficientes que los molinos de bolas. Gracias a su sistema y gran capacidad acortan, no solo el proceso de molienda, sino también el chancado, ya que el mineral que muelen proviene directamente de la chancadora primaria.

**Simulación:** Es el proceso de solucionar numéricamente un modelo de un sistema real (modelamiento) para identificar y entender los factores que controlan el sistema y/o predecir el comportamiento del sistema frente a cambios operativos o perturbaciones del proceso (ahora y en el tiempo).

**Modelo:** ecuación o conjunto de ecuaciones que correlacionan las variables de respuesta (variables dependientes) con las variables de interés manipulables en el proceso (variables independientes).

**Simulador de Procesos:** Herramienta informática (software) que facilita la simulación de procesos mediante el uso de modelos pre-configurados.

**DEM.** Simulación de flujo de partículas aplicado a procesos, equipos de transporte y comportamiento de material particulado mediante el método de Elementos Discretos.

**Operación Planta Concentradora.** Las operaciones de las Plantas Concentradora de minerales requieren en la mayoría de los casos de una preparación previa de los minerales que conllevan a la liberación de las partículas valiosas de su ganga acompañante. Con las diversas etapas de trituración, molienda, flotación,

espesamiento y filtrado se conseguirá completar el grado de liberación necesario para el concentrado de Minerales.

## **2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Si incrementamos el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG, entonces podemos realizar la optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.

### **2.4.2. Hipótesis específicos**

- Si identificamos los parámetros de cálculo de la función selección y fractura del molino SAG entonces podemos hacer la optimización de la molienda SAG.
- Si determinamos el impacto en el tonelaje, distribución granulometría y desempeño del molino al usar como medio moledor bolas de acero de 5,5 pulgadas entonces podemos incrementar el throughput.
- Si determinamos el uso del software JKSimMet, entonces podemos realizar los cálculos de balance de masa, modelamiento y simulación del molino SAG.

## 2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

### 2.5.1. Variable dependiente

- Optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.

### 2.5.2. Variable independiente

- Incrementamos el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG.

## 2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES

VARIABLES	Definición Conceptual	Definición operacional	Unidad	Indicadores
Incrementamos el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG.	Valorar el incremento de la apertura de salida del mineral	Realizar pruebas de molienda en un molino SAG	Tamaño de partícula	Mayor superficie
Optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.	Hacer una evaluación de las variables con la finalidad de mejorar los resultados	Verificar el incremento de las variables en estudio	Incremento de partículas libres	Conteo de partículas libre

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

Los estudios exploratorios se efectúan, normalmente, cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que únicamente hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio.

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado, para el desarrollo del presente estudio se empleó el tipo de Investigación “**cuasi experimental**”, porque permite responder a los problemas planteados, de acuerdo a la caracterización sobre el incremento de THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG.

### 3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación se inicia luego de haber realizado la formulación del estudio de investigación que comienza primordialmente con el planteamiento del problema, el cual es analizado más adelante desde un punto de vista teórico, se procede con el **método aplicada** con la finalidad de demostrar la hipótesis lo que permite plantear las estrategias de experimentación a nivel laboratorio, donde se define los materiales y equipos necesarios.

### 3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El Diseño empleado en la presenta Investigación es el de carácter **experimental**; metodología que permite establecer la relación existente entre la aplicación de la variable independiente en el proceso y el resultado obtenido, considerado como variable dependiente, teniendo en cuenta para ello el problema principal planteado, y que será desarrollado dentro del contexto de la investigación como **experimental – condicionada**.

### 3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA.

#### 3.4.1. Población.

El gerente de Operaciones Mina de Compañía Minera Antamina S.A., Jorge Gherzi Parodi reveló que cuentan con reservas de 822 millones de toneladas de mineral, entre probadas y probables, lo que les permite estimar una vida

útil hasta el 2028. “Actualmente, Antamina mueve aproximadamente 560 mil toneladas de material por día. la planta concentradora, con capacidad para procesar hasta ocho diferentes tipos de mineral en campañas, beneficia en promedio 165 mil toneladas por día y nuestra producción anual alcanza el millón y medio de toneladas combinadas de cobre y zinc”.

### **3.4.2. Muestra.**

La muestra considerada es el tratamiento de mineral de tipo M4B procedente de la fase VIII, en el molino SAG durante 24 horas de operación, para ello se realizará varias campañas de muestreo de la alimentación, puntos intermedios y descarga; el mineral ingresa en estado sólido y el producto final es evacuado como pulpa.

## **3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

### **3.5.1. Muestreo realizado al circuito de molienda.**

El circuito estuvo funcionando de manera constante durante 60 minutos antes de que comience el muestreo y continuó funcionando de manera constante durante la campaña. Para garantizar la estabilidad, todas las entradas del circuito, es decir, la tasa de alimentación del mineral, las tasas de adición de agua, el tipo de mineral y la distribución del tamaño de la alimentación y todas las variables medidas, como las tasas y los niveles de flujo, fueron estables.



**a) Secuencia y duración del muestreo.**

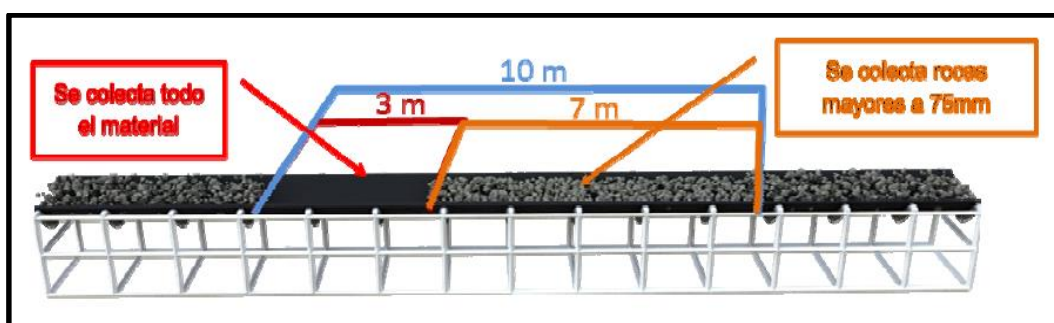
Para coleccionar las muestras de las fajas transportadoras, no es posible tomar muestras adecuadas sin detener la faja y esto causaría una perturbación importante. Por lo tanto, la carga de alimentación del molino primario (SAG), debe muestrearse inmediatamente finalice el muestreo de las corrientes de pulpa.

*Figura 3.1: Punto para toma de muestras de mineral*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 3.2 – Trabajo de toma de imágenes y muestreo en fajas transportadoras*



Fuente: Elaboración propia

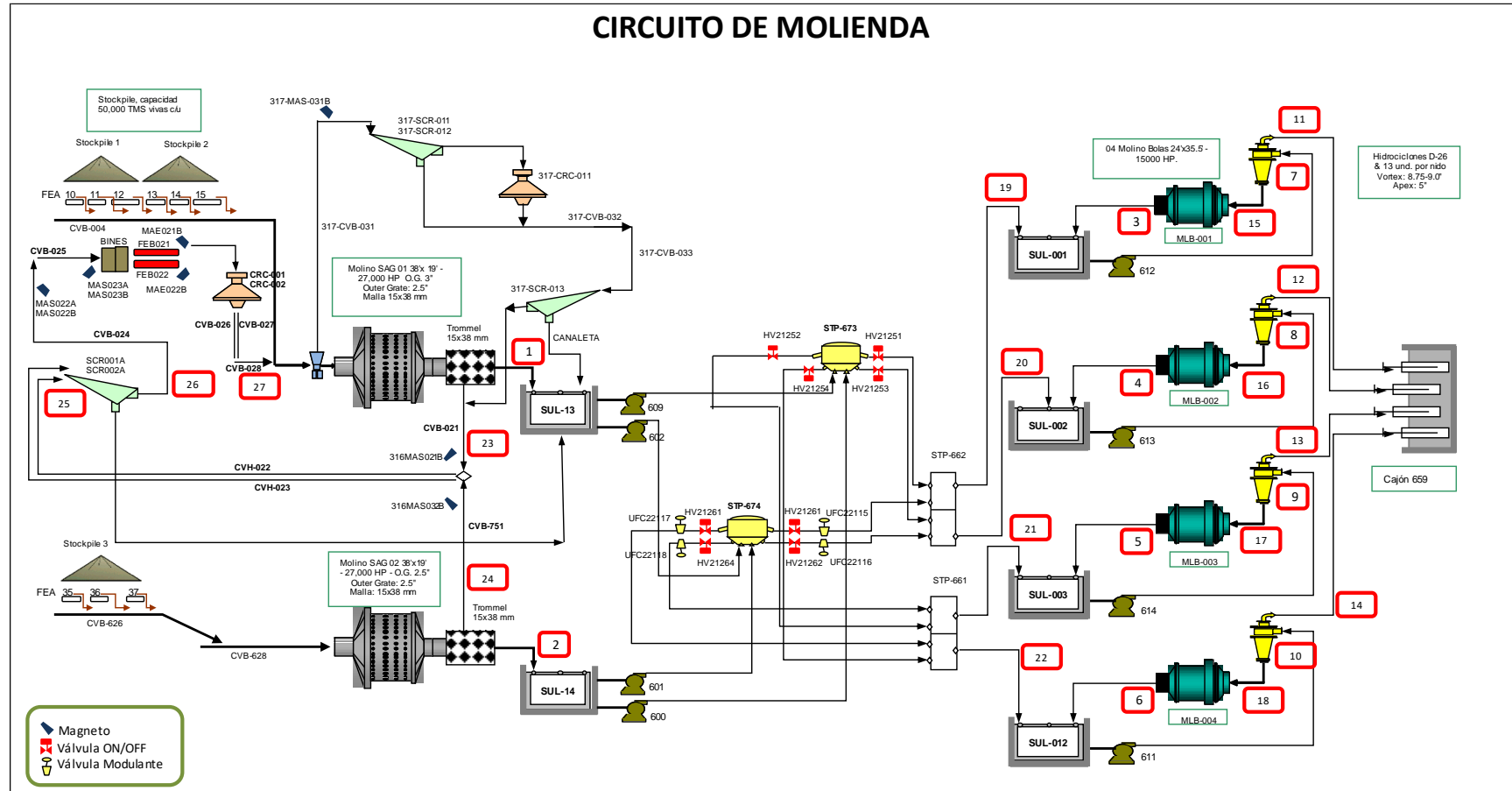
Para las corrientes de pulpa, se debe cortar una muestra a su vez, preferiblemente siguiendo el flujo de mineral a través del circuito. La secuencia se repite alrededor del circuito como mínimo dos veces, cada muestra se combina con la muestra anterior en cada punto. Este procedimiento debe lograrse lo más rápido posible sin prisa excesiva y tuvo un tiempo de aproximadamente una hora.

*Tabla N°3.1: Puntos de muestreo.*

<b>LEYENDA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO</b>	
Descarga de los SAG 1	1
Descarga de los SAG 2	2
Descarga Molinos de Bolas 1	3
Descarga Molinos de Bolas 2	4
Descarga Molinos de Bolas 3	5
Descarga Molinos de Bolas 4	6
Alimentación Nido de Ciclones 1	7
Alimentación Nido de Ciclones 2	8
Alimentación Nido de Ciclones 3	9
Alimentación Nido de Ciclones 4	10
Overflow Nido de Ciclones 1	11
Overflow Nido de Ciclones 2	12
Overflow Nido de Ciclones 3	13
Overflow Nido de Ciclones 4	14
Underflow Nido de Ciclones 1	15
Underflow Nido de Ciclones 2	16
Underflow Nido de Ciclones 3	17
Underflow Nido de Ciclones 4	18
Alimentación al SUL 1	19
Alimentación al SUL 2	20
Alimentación al SUL 3	21
Alimentación al SUL 4	22
Descarga del Trommel del SAG 1	23
Descarga del Trommel del SAG 2	24
Feed Zaranda de Pebbles	25
O/S Zaranda Pebbles	26
Faja-28	27

**Fuente: Elaboración propia.**

Figura 3.3 – Diagrama de flujo del circuito de molienda.



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2. Inventario y preparación

En la Tabla N° 3.2, se detalla el inventario de las muestras enviadas a un laboratorio especializado en análisis de dureza. En la Figura 3.1, se puede visualizar las condiciones y la recepción de las mismas.

*Tabla N° 3.2: Inventario de Muestras*

Ítem	ID MUESTRA (Cliente)	GRANULOMETRÍA/ SONDAJE	ASPECTO FÍSICO MUESTRA	PESO RECEPCIÓN DE LA MUESTRA
				Kg
1	M4B 3metros	3 metros(<8")	Aparentemente seco	1171,36
2	M4B 7metros	7 metros(<8")	Aparentemente seco	883,21
3	M2A3metros	3 metros(<8")	Aparentemente seco	1128,69
4	M2A7metros	7 metros(<8")	Aparentemente seco	546,94
6	M4B	(<8")	Aparentemente seco	255,83
9	M4B II	(<8")	Aparentemente seco	346,80

*Fuente: Elaboración propia*

*Figura N° 3.4: Recepción de muestras*



**Fuente: Elaboración propia**

### **3.5.3. Origen y características de las muestras**

Se realizó la toma de muestras de la faja transportadora procedente de la chancadora primaria. El muestreo se realizó en la faja transportadora conteniendo muestras de mineral producto de la chancadora primaria, para realizar el trabajo, se detuvo la faja para delimitar un tramo de 10 metros.

El mineral contenido en los 10 metros de la faja transportadora, se dividió en dos partes, muestreo de 3 metros de mineral y muestreo de 7 metros de mineral. Muestreo 3 metros, se colectó toda la muestra contenida sobre la faja transportadora indistintamente de la granulometría (muestras finas y gruesas). Muestreo 7 metros, Se seleccionó todas las partículas mayores a 3 pulgadas de manera manual. La toma de muestras de los desmontes, se realizó de la manera siguiente. El muestreo se realizó de manera manual y distintos puntos para asegurar que la muestra sea representativa de la fuente de origen. Todas estas muestras fueron almacenadas en cilindros de 200 litros de volumen, colocadas sobre parihuelas y enzunchadas para su posterior traslado a SGS Callao.

## **3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

### **3.6.1. Preparación mecánica**

Posterior a la recepción e identificación de las muestras, se procedió al secado de estas a una temperatura de 60 °C, por un periodo de 24 horas, con la

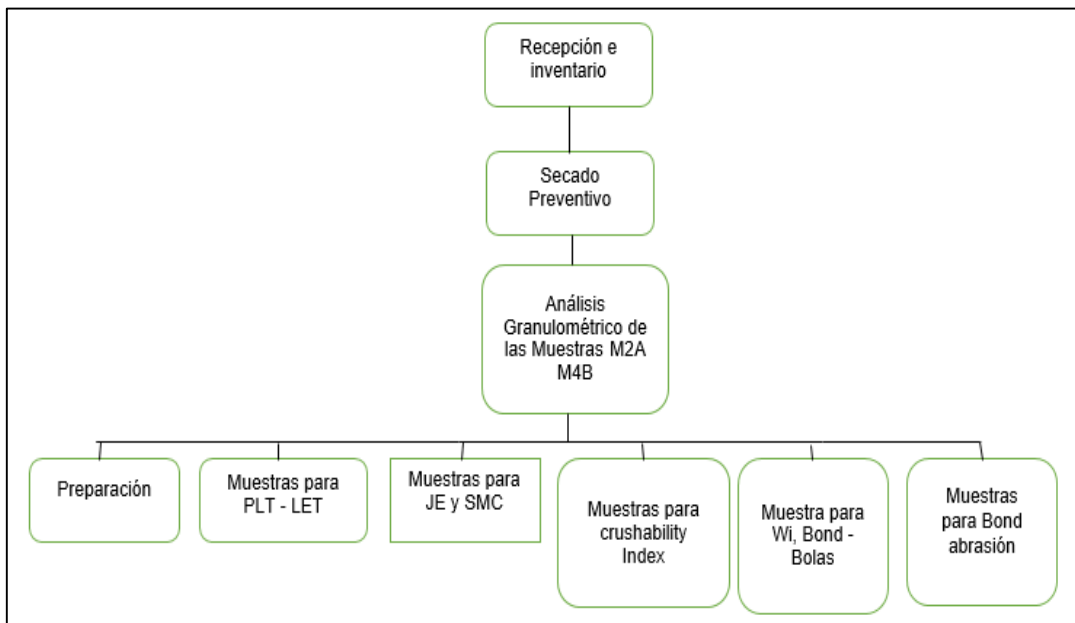
finalidad de eliminar la humedad, hasta obtener un peso constante confirmando el secado total. La preparación continuó de acuerdo al esquema de la Figura N° 3.5.

### 3.6.2. Análisis granulométrico

Posterior al secado, se procedió con la distribución del mineral por fracciones de tamaño.

Para realizar el análisis granulométrico de las muestras M4B (3m), M4B (7m), se procedió de la siguiente manera.

**Figura N° 3.5: Esquema de preparación de muestras**



**Fuente: Elaboración propia**

a) Muestra M4B (7m).

El perfil granulométrico para estas muestras se realizó empleando las siguientes mallas ASTM N° 8", 7", 6", 5", 4", 3" y 2", se utilizó el peso total de las muestras.

b) Muestras M4B (3m).

El perfil granulométrico de estas muestras se realizó en dos etapas.

➤ **Perfil granulométrico, de minerales mayores a malla 3/8”.**

Todas las muestras del mineral procedente de secado, pasa a la etapa de distribución granulométrica por tamaño para obtener el perfil granulométrico. Se usó las mallas N° 8", 7", 6", 5", 4", 3", 2", 1", 3/4", 1/2" y 3/8".

➤ **Perfil granulométrico, de minerales menores a malla 3/8”.**

Todo el material pasante a la malla 3/8”, se junta para formar un compuesto y posterior homogenizado, para luego ser divididas en cargas de 1 kilogramo haciendo uso del divisor rotatorio, obteniendo cargas representativas con respecto a toda la muestra. El análisis granulométrico se realizó por triplicado con masas de 1 kg de mineral previamente homogenizado.

### **3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO**

En la investigación realizada no se hizo uso de la estadística diferencial y/o inferencial, se ha desarrollado trabajo netamente técnico.

### **3.8. SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN**

Al realizar la investigación se ha obtenido datos directamente del proceso metalúrgico que se realiza en la planta concentradora, teniendo en cuenta el tener que optimizar el tamaño de partícula en la descarte del molino SAG en Antamina.

### **3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA**

El presente trabajo está orientado a incrementar el throughput en la etapa de molienda SAG, analizando cada uno de las variables que gobierna la molienda, para su respectiva discusión es con el análisis de tablas y figuras de los parámetros involucrados en el trabajo de investigación. En Antamina contamos con una Línea Ética para recibir todas las denuncias relacionadas a posibles vulneraciones al Código de Conducta y a asuntos relacionados con la integridad de la Compañía. Asimismo, si una denuncia es recibida por otro medio, como por ejemplo vía correo electrónico o llamada a un vicepresidente, gerente o directamente al área de Cumplimiento, se le da el mismo tratamiento que una denuncia recibida por la Línea Ética. Actualmente, nuestra área de Cumplimiento, a través del Especialista de Cumplimiento, es el encargado de revisar todas las denuncias recibidas. Cabe indicar que la Línea Ética es administrada por un tercero y que contamos con un Protocolo de Comunicación entre el operador y nosotros. La existencia y uso de la Línea Ética y otros mecanismos para hacer denuncias ha sido informada a nuestros empleados a través de una campaña de difusión (e-mail, material gráfico), en las capacitaciones (tanto presenciales como por E-learning) así como publicando un acceso a la misma a través de la intranet corporativa y en la página web institucional.



## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO**

El trabajo que se ha realizado es en Antamina donde tiene como objetivo el de mejorar la gestión pública y la participación comprometida de los gobiernos locales, líderes de organizaciones sociales, comunidades e instituciones de los distritos de nuestro ámbito de intervención, a través de capacitaciones y asistencias técnicas. Esta iniciativa está permitiendo crear espacios de diálogo con agendas consensuadas y actividades coordinadas priorizando el desarrollo de cada localidad.

La experiencia del proyecto Fogel ha permitido que durante sus 2 años de intervención se promuevan 13 espacios de participación orientados al

desarrollo. Anteriormente, estos espacios eran principalmente mesas de negociaciones bilaterales generadas en situaciones de conflicto.

En la actualidad, participan municipios, organizaciones sociales e instituciones privadas y públicas con mejores herramientas de planificación, gestión y mayores capacidades de diálogo para coordinar e implementar proyectos y actividades concretas.

Finalizado el análisis granulométrico de los muestreos realizados en la molienda primaria, se inició con la toma de muestras (selección de material), seguido de la preparación de muestras, para cada una de las siguientes pruebas PLT, JK-DWT, SMC, Ai. Terminada la selección y preparación de muestras, se junta todo el material remanente generado en las anteriores pruebas. Este material pasa por una etapa de chancado controlado (Chancado secuencial), con la finalidad de evitar la generación de fino para realizar las pruebas de BBWi. A continuación, se detalla los resultados obtenidos.

## 4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.2.1. Caracterización del mineral.

Se muestra los resultados de análisis granulométrico obtenido para cada una de las muestras.

*Tabla 4.1: Resumen de las pruebas de conminución realizadas*

Muestra	PLT	JKDWT	SMC	BBWi	Ai
M2A	X	X	X	X	X
M4A	X	X	X	X	X
Desmonte C	X	*	X	*	*
Desmonte Duro	X	*	X	*	*
Desmote Fino	X	*	X	*	*
M4B II	X	X	X	X	*

x	Solo Preparación
X	Pruebas Realizadas
*	Pruebas no Realizadas

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2. Resultados de la prueba JK dropweight test - JKDWT.

Se muestra la tendencia histórica de los valores de A y b del mineral M4B:

- Axb Alto = Mineral suave (Menos resistente a la fractura por impacto).
- AxB Bajo = Mineral duro (más resistencia a la fractura por impacto).

*Tabla N° 4.2: Resultados Parámetros de Fractura por Impacto*

Año	Tipo Mineral	A	b	A*b
2003	M1	65.2	1.59	104
	M4B	59.6	1.34	80
	M4B	60.3	1.14	69
2006	M1	61.3	2.97	182
	M4A	66.5	1.26	84
	M4A	62.4	1.17	73
2014	M1	68.5	1.49	102
	M4B	65.6	1.00	66
2018	M4B	80.2	0.56	45

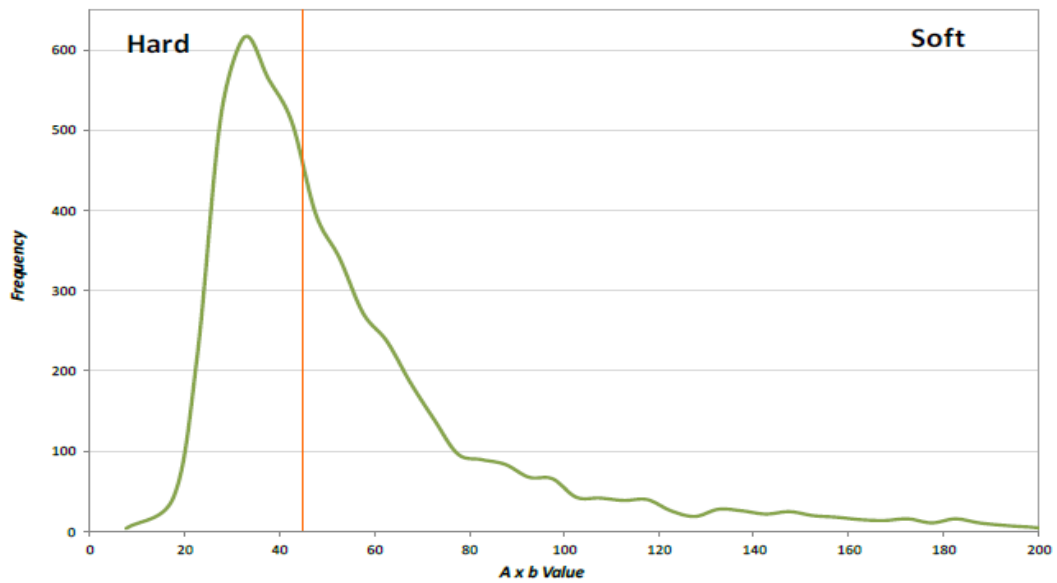
Fuente: Elaboración propia

*Tabla 4.3: Parámetros de la Prueba JKDW*

Muestras	A	b	A*b	t <sub>a</sub>	SCSE (kWh/t)	SG
M1	58,6	1,73	101,4	1,92	6,8	2,65
M2A	75	0,58	43,5	0,37	9,46	2,68
M4B	74,4	0,53	39,4	0,16	11,05	3,33

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4.1: Frecuencia de distribución de A\*b en la base de datos de JKTech



Fuente: JKTech Pty Ltd (2018)

#### 4.2.3. Resultados de la prueba SMC

Tabla 4.4: Resultados de las Pruebas de SMC

Designación Simple	DWI	DWI	Parametros(kwh/t)			SG
	(kwh/m3)	(%)	Mia	Mih	Mic	
<b>DESMONTE C</b>	6,3	45	18,1	13,2	6,8	2,75
<b>M 1</b>	2,4	7	8,6	5,2	2,7	2,64
<b>M2A</b>	6	41	18	13	6,7	2,67
<b>M4B</b>	8,9	77	19,7	15,4	8	3,34
<b>DESMONTE DURO</b>	7,2	58	20	15	7,8	2,8
<b>DESMONTE FINO</b>	7,7	64	21,4	16,3	8,4	2,75

Fuente: Elaboración propia

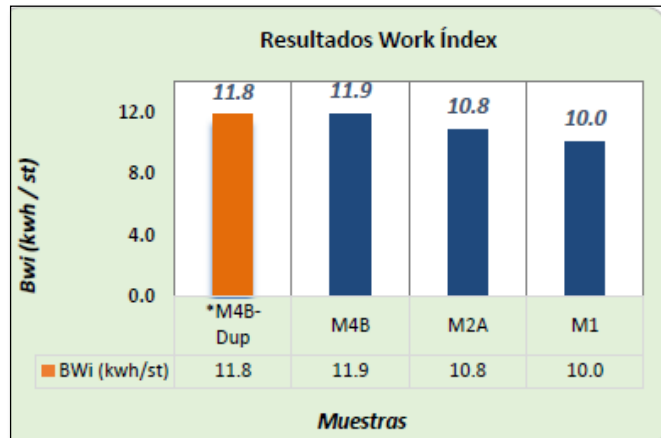
#### 4.2.4. Prueba BBWI (índice de trabajo bond bolas)

Tabla 4.5: Resumen de resultados - Pruebas de BBWi

Muestra	BWi(kwh/st)	BWi (kwh/mt)	Clasificación	Malla de corte	Gbp, (g/rev)	F <sub>80</sub> (µm)	P <sub>80</sub> (µm)
M1	10,0	11,1	Mediano-blando	150	2,3	1978,6	112,6
M2A	10,8	11,9	Mediano-blando	150	2,1	2315,2	117,6
M4B	11,9	13,1	Mediano-blando	150	1,8	2343,7	110,2
*M4B- Dup	11,8	13,0	Mediano-blando	150	1,8	2335,5	113,6

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2: Resultados de Work Index



Fuente: Elaboración propia

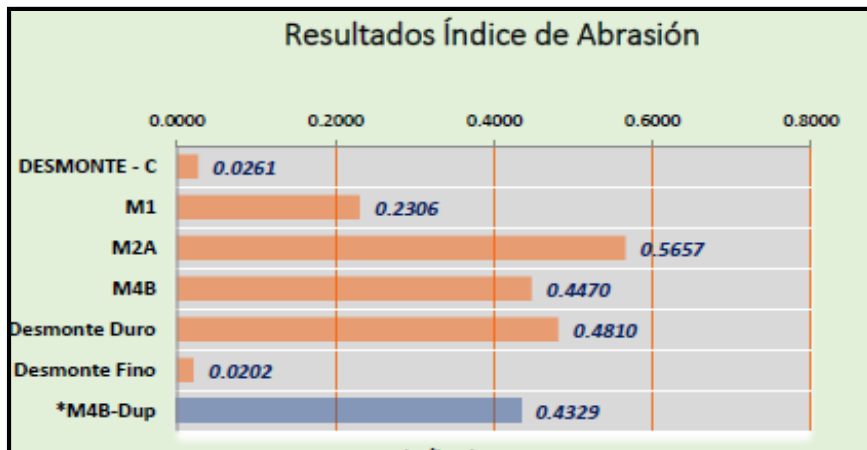
#### 4.2.5. Prueba Ai (índice de abrasión).

Tabla 4.6: Resumen de Resultados - Pruebas de Abrasión

Muestra	Índice de abrasión. Ai	Clasificación	Molienda de bolas en Húmedo Desgaste de bolas	Molienda con bolas en Húmedo Desgaste de chaquetas	Molienda con bolas en Seco Desgaste de bolas	Molienda con bolas en Seco Desgaste de chaquetas	Chancadora Desgaste de revestimiento
M4B	0,2306	Baja abrasión	0,0957	0,0074	0,0109	0,0011	0,0186
	0,5657	Media abrasión	0,1304	0,0099	0,0171	0,0017	0,0324
	0,4470	Media abrasión	0,1204	0,0092	0,0152	0,0015	0,0275
	0,0261	Baja abrasión	0,0359	0,0031	0,0037	0,0004	0,0101
	0,4810	Media abrasión	0,1234	0,0094	0,0157	0,0016	0,289
	0,0202	Baja abrasión	0,0289	0,0025	0,0033	0,0003	0,0099
	0,4329	Media abrasión	0,1190	0,0091	0,0149	0,0015	0,0269

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3: Resultados de Abrasión



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.6. Análisis de velocidad óptima de molino SAG.

Se realizó un análisis comparativo respecto a la variación de la eficiencia operacional para diferentes velocidades de rotación (RPM) del Molino SAG, considerando además diferentes niveles de desgaste en los Shell Liners y diferentes porcentajes de carga de bolas. El objetivo de la presente evaluación fue determinar la velocidad de rotación óptima referencial para operar el molino en diferentes condiciones operacionales, y diferentes niveles de desgaste de los Shell Liners. El análisis se ha realizado mediante un software que utiliza el Método de Elementos Discretos (DEM) para la realización de cálculos y simulaciones. Para ello, se realizaron 48 simulaciones, las cuales consideraron las siguientes condiciones operacionales diferentes:

- **Diferentes Velocidades:** [8,0 ; 8,3 ; 8,5 ; 8,8, 9,0 y 9,2] RPM, siendo [7,0 ; 8,5 y 9,2] RPM, las velocidades mínima, nominal y máxima según Datasheet entregado por Cliente.
- **Diferentes % de Carga:** [13% de Bolas y 10% Mineral (= 23% de Carga Total)] correspondiente a valores nominales de carga según Datasheet entregado por Cliente, y [15% de Bolas y 10% Mineral (= 25% de Carga Total)] según solicitud de Cliente.
- **Diferentes Niveles de Desgaste,** para Shell Liners recientemente instalados (nuevos), y para 4, 7 y 9 meses de operación.

Adicionalmente, se consideraron en todos los casos las propiedades de densidad y tamaño de las bolas y partículas, dureza del mineral, etc. según lo indicado en las evaluaciones realizadas. En la Tabla 4.8 a continuación,

Tabla N° 4.8: Condiciones operacionales del molino SAG.

# Simulación	Nivel de Desgaste	% Bolas	% Mineral	% Total	RPM	% Vel. Crítica
1	Nuevo, Recién Instalado	13,0%	10,0%	23,0%	8,0	64,0%
2	Nuevo, Recién Instalado	13,0%	10,0%	23,0%	8,3	66,0%
3	Nuevo, Recién Instalado	13,0%	10,0%	23,0%	8,5	68,0%
4	Nuevo, Recién Instalado	13,0%	10,0%	23,0%	8,8	70,0%
5	Nuevo, Recién Instalado	13,0%	10,0%	23,0%	9,0	72,0%
6	Nuevo, Recién Instalado	13,0%	10,0%	23,0%	9,2	73,0%
7	4 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,0	64,0%
8	4 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,3	66,0%
9	4 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,5	68,0%
10	4 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,8	70,0%
11	4 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	9,0	72,0%
12	4 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	9,2	73,0%
13	7 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,0	64,0%
14	7 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,3	66,0%
15	7 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,5	68,0%
16	7 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,8	70,0%
17	7 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	9,0	72,0%
18	7 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	9,2	73,0%
19	9 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,0	64,0%
20	9 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,3	66,0%
21	9 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,5	68,0%
22	9 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	8,8	70,0%
23	9 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	9,0	72,0%
24	9 meses de operación	13,0%	10,0%	23,0%	9,2	73,0%
25	Nuevo, Recién Instalado	15,0%	10,0%	25,0%	8,0	73,0%
26	Nuevo, Recién Instalado	15,0%	10,0%	25,0%	8,3	66,0%
27	Nuevo, Recién Instalado	15,0%	10,0%	25,0%	8,5	68,0%
28	Nuevo, Recién Instalado	15,0%	10,0%	25,0%	8,8	70,0%
29	Nuevo, Recién Instalado	15,0%	10,0%	25,0%	9,0	70,0%
30	Nuevo, Recién Instalado	15,0%	10,0%	25,0%	9,2	73,0%
31	4 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,0	64,0%
32	4 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,3	66,0%
33	4 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,5	68,0%
34	4 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,8	70,0%
35	4 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	9,0	72,0%
36	4 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	9,2	73,0%
37	7 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,0	64,0%
38	7 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,3	66,0%
39	7 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,5	68,0%
40	7 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,8	70,0%
41	7 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	9,0	72,0%
42	7 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	9,2	73,0%
43	9 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,0	64,0%
44	9 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,3	66,0%
45	9 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,5	68,0%
46	9 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	8,8	70,0%
47	9 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	9,0	72,0%
48	9 meses de operación	15,0%	10,0%	25,0%	9,2	73,0%

Fuente: Elaboración propia

se resumen entonces todas las combinaciones de situaciones operacionales que serán analizadas y comparadas en el presente informe, y posteriormente, las ilustraciones de las simulaciones de trayectorias de partículas (mediante DEM) para cada caso.

#### 4.2.7. Simulación del circuito de molienda primaria.

La presente evaluación se realiza para determinar las condiciones de operación necesarias y poder incrementar el throughput en la etapa de molienda en campañas de mineral M4B procedente de la Fase VIII.

a) Molino SAG, datos de diseño:

**Tabla N° 4.9: Datos de diseño del molino SAG**

Fabricante	:	FFE Minerals
Tipo	:	Molienda húmeda, descarga por rebose
Tamaño	:	38 pies D x 21 pies L
Capacidad (diseño)	:	3,240.7 TPH
Carga de Bolas	:	15% del volumen (máx.)
Carga de Mineral	:	25% del volumen (máx.)
Velocidad de Giro	:	9.78 RPM variable (78% veloc. critica)
Pulpa de Alimentación	:	80% pasante 150 mm
Pulpa de Descarga	:	80% pasante 4,200/1,500 micrones
<i>Sistema de Accionamiento</i>		
Tipo	:	Motor de anillo síncrono
Modelo	:	WAZ 1,440/120/72
Potencia (nom.)	:	20,142 kW
Tensión (nom.)	:	4,950 V
Intensidad (nom.)	:	2,470 A
Numero de polos/fases	:	72 polos / 3 fases
Velocidad (nom.)	:	9.23 RPM
Tipo de Ventilación	:	Forzada en circuito cerrado
Flujo de Aire	:	39.5 m <sup>3</sup> /s
Temperatura de salida	:	35 °C
<i>Sistema de Lubricación</i>		
Capacidad del Depósito	:	10,334 L (3 compartimientos)
Bombas de Baja Presión		
Tipo	:	De tornillo
Capacidad/Potencia	:	1,166 LPM / 22 kW
Bombas de Alta Presión		

Fuente: Elaboración propia

b) Datos Operativos:



Tabla N° 4.10: Datos de campo (M4B) ./ Fuente: Elaboración propia

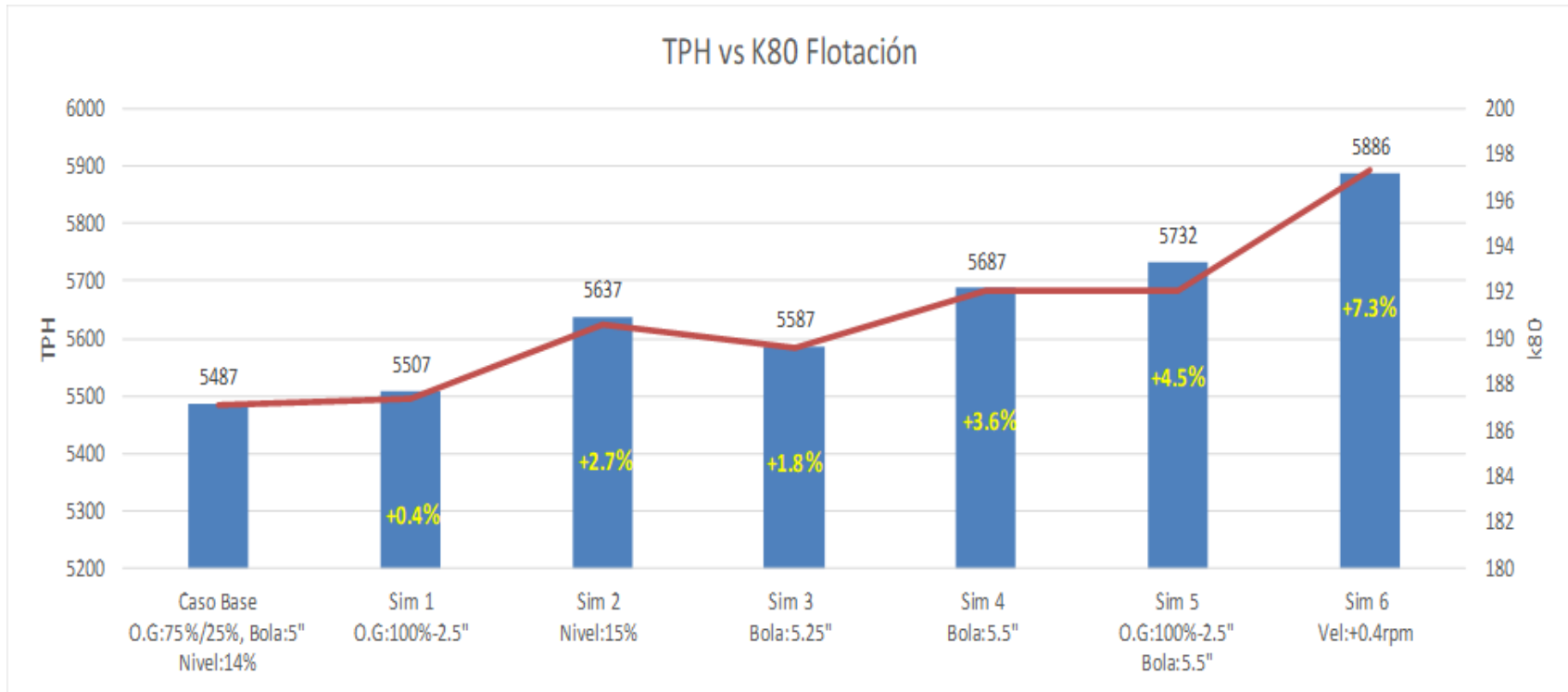
Mineral M4B: Datos de Molinos			SAG N°1	SAG N°2
Flujo descarga		m3/h	<b>2376.53</b>	<b>2129.16</b>
Tph descarga		tph	<b>4003.29</b>	<b>3586.60</b>
Flujo Máximo Diseño		m3/h	<b>6167.31</b>	<b>6374.16</b>
Capacidad Máxima Molino		m3/h	<b>3789.89</b>	<b>3208.17</b>
Densidad		Kg/m3	<b>2160.00</b>	<b>2160.00</b>
Granulometria			<b>P80 variable (18 – 50 mm) max. 184</b>	<b>P80 variable (18 – 50 mm) max. 180</b>
F80:		mm	<b>mm</b>	<b>mm</b>
P80:		mm	<b>P80 variable (1.81 – 2.0) mm</b>	<b>P80 variable (1.20 – 1.8) mm</b>
Potencia		Kw	<b>10036 – 18181 Kw (Ave. 14,405 Kw)</b>	<b>8625 – 18008 Kw (Ave. 13,006 Kw)</b>
Potencia Instalada		kw	<b>20,142 kW</b>	<b>20,142 kW</b>
Velocidad Máximo		rpm	<b>11.30</b>	<b>11.30</b>
Velocidad Mínimo		rpm	<b>8.00</b>	<b>8.00</b>
Trommel	Largo	mm	<b>38.00</b>	<b>38.00</b>
	Ancho	mm	<b>15.00</b>	<b>15.00</b>
	Altura	mm	<b>60.00</b>	<b>60.00</b>
	Area total	m2	<b>84.51</b>	<b>84.51</b>
	Area Mojada	m2	<b>66.45</b>	<b>66.45</b>
	Area libre	%	<b>21.36</b>	<b>21.36</b>
	Distribución Pulpa	O/S	%	<b>4.55</b>
	U/S	%	<b>95.45</b>	<b>98.69</b>
Sistema Lavado interior	Quenas			
	Flujo Máximo	m3/h	<b>329.37</b>	<b>442.27</b>
	Presión	Kpa		

c) Comentarios:

A continuación, se muestran las tendencias que resultan favorables para incrementar el tonelaje de procesamiento. Los porcentajes de incrementos que se indican son con respecto a la condición actual de operación del SAG (Caso base):

- Incrementar la abertura de los slots a 100% (2,5") resulta en un incremento de solo +0,4% en el tonelaje de procesamiento.
- El incremento de 1,0% en el nivel de bolas resulta en un incremento de +2,7% en el tonelaje de procesamiento.
- Modificar el tamaño de bolas a 5,25" resulta en un incremento de +1,8% en el tonelaje de procesamiento.
- Modificar el tamaño de bolas a 5,5" resulta en un incremento de +3,6% en el tonelaje de procesamiento.
- Incrementar la abertura de los slots a 100% (2,5") y usar bolas de 5,5" resulta en un incremento de +4,5% en el tonelaje de procesamiento.
- Trabajar a una mayor velocidad en el SAG (+0,4 rpm) resulta en un incremento de +7,3% en el tonelaje de procesamiento.

**Figura N°4.4: Resultados de las Simulaciones (M4B – Fase VIII).**



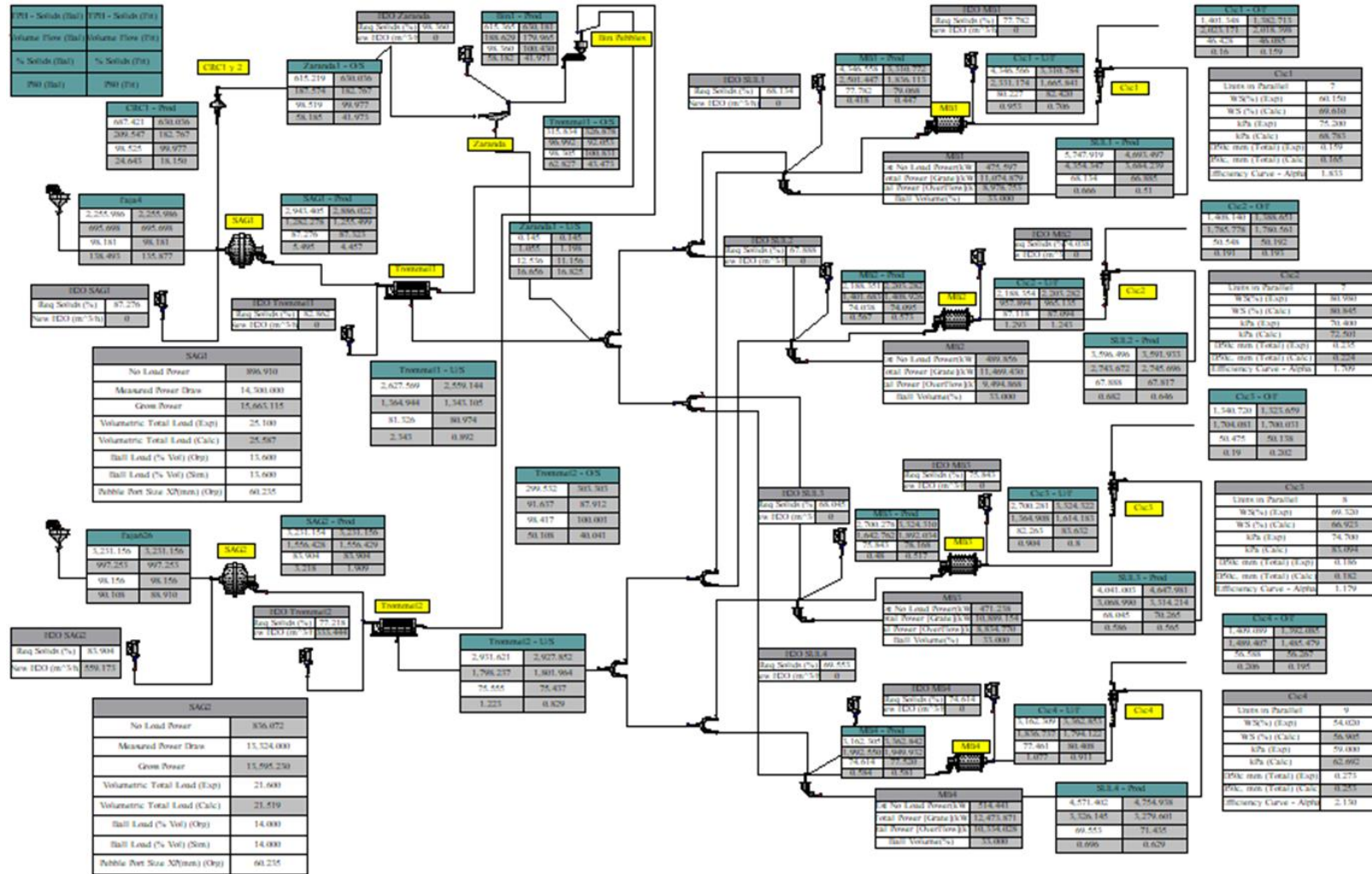
**Fuente: Elaboración propia.**

**Tabla N° 4.11: Resultados de las Simulaciones (M4B).**

Area	Item	Caso Base 1	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4	Simulación 5	Simulación 6 (+0.4 rpm)
Molienda	Variables de control	Tonelaje SAG 01: 2255 TPH Tonelaje SAG 02: 3231 TPH Tonelaje Total: 5487 TPH O. Grate: 75%(2.5")/25%(2") Bola: 5" % Nivel Bolas: 14%	Tonelaje SAG 01: 2251 TPH Tonelaje SAG 02: 3256 TPH Tonelaje Total: 5507 TPH O. Grate: 100%(2.5") Bola: 5" % Nivel Bolas: 14%	Tonelaje SAG 01: 2331 TPH Tonelaje SAG 02: 3306 TPH Tonelaje Total: 5637 TPH O. Grate: 75%(2.5")/25%(2") Bola: 5.0" % Nivel Bolas: 15%	Tonelaje SAG 01: 2305 TPH Tonelaje SAG 02: 3281 TPH Tonelaje Total: 5587 TPH O. Grate: 75%(2.5")/25%(2") Bola: 5.25" % Nivel Bolas: 14%	Tonelaje SAG 01: 2306 TPH Tonelaje SAG 02: 3381 TPH Tonelaje Total: 5687 TPH O. Grate: 75%(2.5")/25%(2") Bola: 5.5" % Nivel Bolas: 14%	Tonelaje SAG 01: 2381 TPH Tonelaje SAG 02: 3351 TPH Tonelaje Total: 5732 TPH O. Grate: 100%(2.5") Bola: 5.5" % Nivel Bolas: 14%	Tonelaje SAG 01: 2355 TPH Tonelaje SAG 02: 3531 TPH Tonelaje Total: 5886 TPH O. Grate: 75%(2.5")/25%(2") Bola: 5" % Nivel Bolas: 14%
		K80 O/F Cic01	159	159	162	161	163	163
K80 (um) Flotación	K80 O/F Cic02	193	194	197	196	198	199	204
	K80 O/F Cic03	202	202	205	204	206	206	212
	K80 O/F Cic04	195	195	199	198	202	201	207
	K80 Average	187	187	191	190	192	192	197
SAG(s)	Pebbles (TPH)	630	685	610	646	664	731	581
	Power SAG 01 (Kw)	15663	15654	15982	15792	15877	15964	15920
	Load SAG 01 (%)	25.6	25.4	25.2	26.3	26.9	27.1	25.41
	Power SAG 02 (Kw)	13595	13598	13973	13668	13785	13748	15666
	Load SAG 02 (%)	21.5	21.5	21.6	21.9	22.4	22.5	20.00
MLBs-CYCs	CC MB 01 (%)	239	239	236	237	235	233	232
	CC MB 02 (%)	159	158	156	157	155	155	154
	CC MB 03 (%)	244	251	247	248	246	245	243
	CC MB 04 (%)	242	241	238	239	237	236	235
	CC Ave (%)	221	222	219	220	218	217	216
	Presión Cic01 (Kpa)	68.8	68.9	69.6	69.5	70.3	70.5	72.06
	Presión Cic02 (Kpa)	72.5	72.7	73.4	73.4	74.2	74.6	76.50
	Presión Cic03 (Kpa)	83.1	83.3	84.1	84.0	84.9	85.3	87.25
	Presión Cic04 (Kpa)	62.7	62.8	63.5	63.4	64.2	64.5	66.23
By pass Finos (%)	31.4	31.4	24.6	31.4	31.3	31.3	31.1	

**Fuente: Elaboración propia.**

Figura N°4.5: Flowsheet de Modelo JKSimMet Integrado de Circuito Molienda Antamina – tipo mineral M4B – Fase VIII



Fuente: Elaboración propia.

### **4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS.**

De acuerdo las simulaciones realizadas con el software JkSimMet, se determinó que hay cuatro variables que impactan de forma directa y optimizan el desempeño del molino SAG, incrementando el throughput y optimizando la función selección y función fractura.

- a) Distribución granulométrica del mineral alimentado.
- b) Velocidad de rotación del molino SAG.
- c) Nivel de llenado de bolas.
- d) Tamaño de las bolas de acero.

#### **4.3.1. Distribución granulométrica del mineral alimentado.**

A continuación, los resultados del análisis granulométrico del mineral alimentado al molino SAG. En comparación con la distribución granulométrica de una muestra de la fase VI (2011) que presenta menor dureza, es evidente el cambio de las características de la roca.

- El Top Size (8"): Se ha incrementado en 0.7% (de 1 a 1.7%)
- El tamaño Grueso (>6"): Se ha incrementado en 3.3% (de 2.1 a 5.3%).
- Intermedio (>4";<6"): La cantidad de tamaño intermedio aumentó en 8% (de 9 a 17%).
- Crítico (>2";<5") : La cantidad de tamaño crítico aumentó en 19.7% (de 12.4 a 32.1%).
- Finos <2.0": La cantidad de finos ha disminuido en 24.9% (de 84.0 a 59.1%)

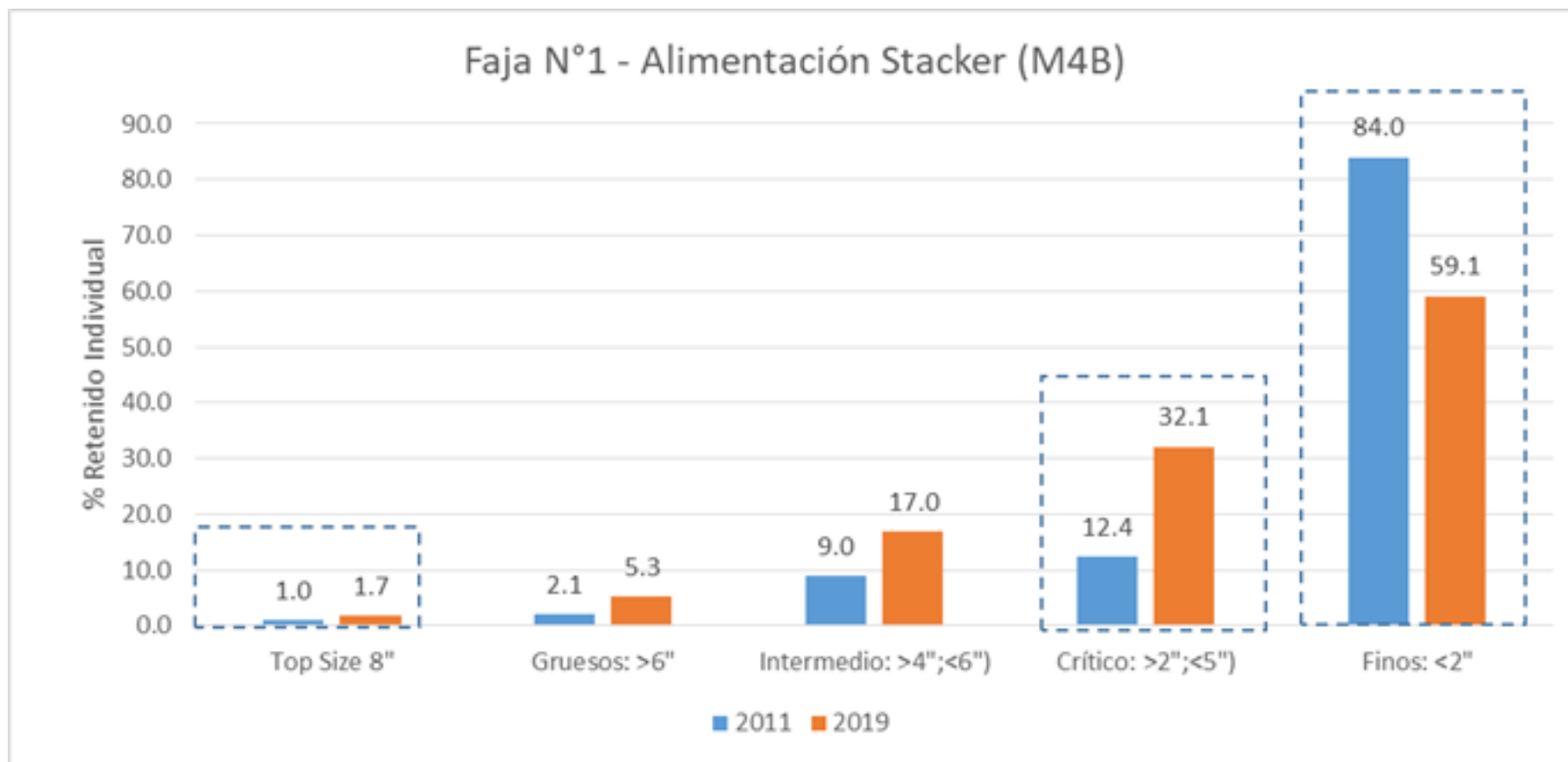
- El F80 se ha incrementado en 90.30 mm (de 21mm a 111mm).

*Tabla N° 4.12: Comparación de la granulometría alimentada al SAG.*

	<b>2011</b>	<b>2019</b>
Top Size 8"	1.0	1.7
Gruesos: >6"	2.1	5.3
Intermedio: >4"; <6"	9.0	17.0
Crítico: >2"; <5")	12.4	32.1
Finos: <2"	84.0	59.1
<b>F80</b>	21	<b>111</b>
<b>Axb</b>	66	<b>39</b>
<b>TPH</b>	6600	<b>4100</b>

**Fuente: Elaboración propia.**

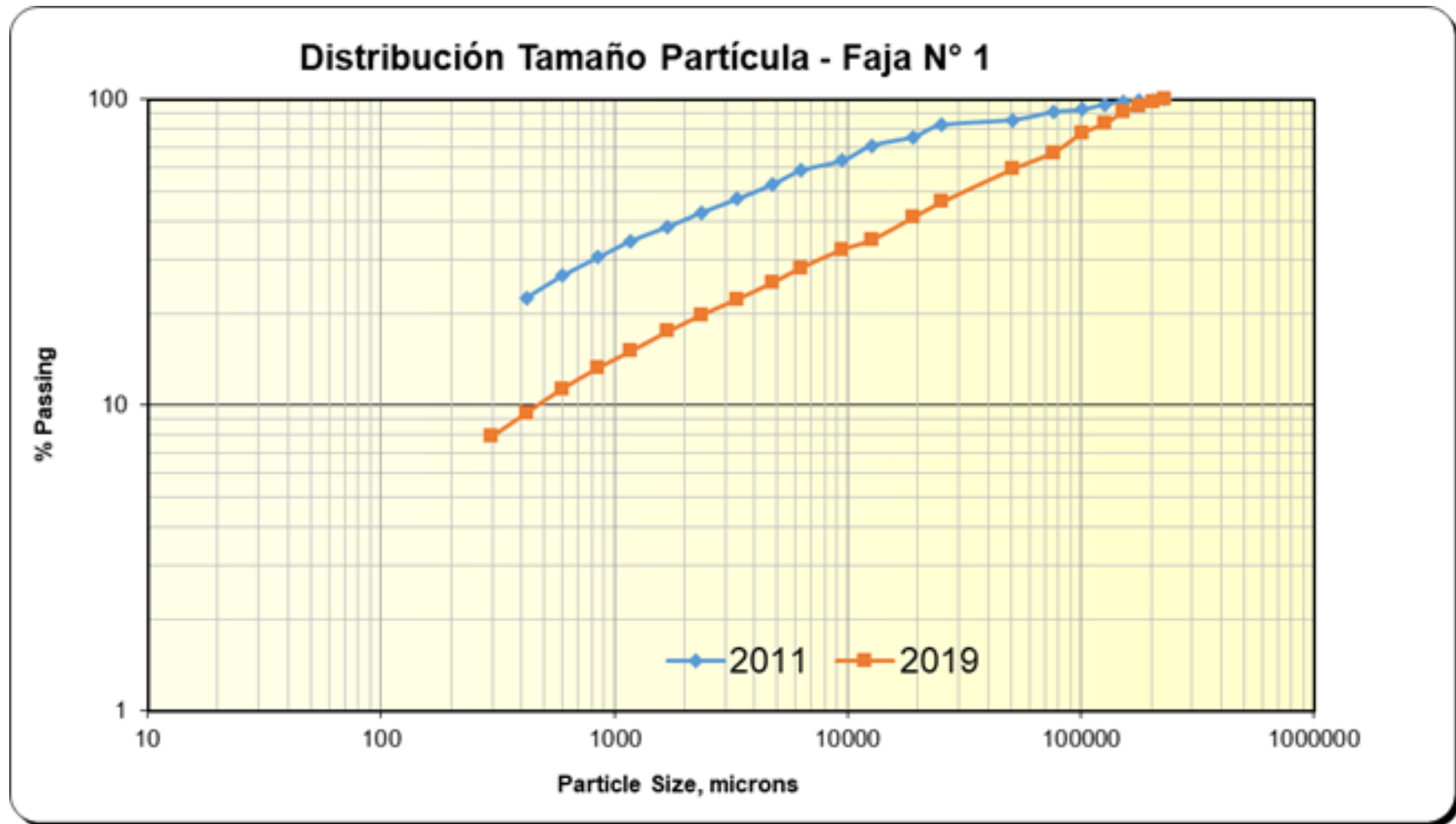
Figura N°4.6: Comparación de la granulometría alimentada al SAG.



Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 4.7: Distribución granulométrica del mineral alimentado.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2. Análisis de la velocidad de rotación del molino SAG.

Observando las simulaciones de trayectorias ilustradas en el capítulo 4.1.6, se pueden destacar las siguientes recomendaciones de velocidades para uso referencial. Estos análisis son válidos para **13% de carga de bolas y para 15% de bolas**. Posteriormente, se realizará la comparación respecto a la eficiencia de molienda para estas dos condiciones operacionales a velocidades óptimas.

Cabe destacar que las velocidades máximas indicadas, son cuando se comienzan a vislumbrar impactos directos Bolas-Revestimientos, por lo que es un valor que se debe evitar operar. Por lo tanto, las velocidades de operación recomendadas son:

- a) Para 0 Meses de Operación (Revestimientos Nuevos)
  - Velocidad Mínima Recomendada: 8,0 RPM
  - Velocidad Óptima Recomendada: 8,3 RPM
  - Velocidad Máxima : 8,5 RPM
  
- b) Para 4 Meses de Operación
  - Velocidad Mínima Recomendada: 8,5 RPM
  - Velocidad Óptima Recomendada: 8,7 RPM
  - Velocidad Máxima : 9,0 RPM
  
- c) Para 7 Meses de Operación y más

- Velocidad Mínima Recomendada: No bajar de 9,0 RPM
- Velocidad Óptima Recomendada: 9,2 RPM
- Velocidad Máxima: 9,2 RPM

Para 7 y 9 meses de operación, el molino requiere en “teoría”, una velocidad de rotación mayor que 9,2 RPM para obtener una eficiencia de molienda óptima, debido al nivel de desgaste de los revestimientos, según los perfiles obtenidos en las últimas campañas anteriores. Como la velocidad máxima del molino es 9,2 RPM se recomienda operar el molino a dicha velocidad después de los 7 meses de operación.

#### **4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

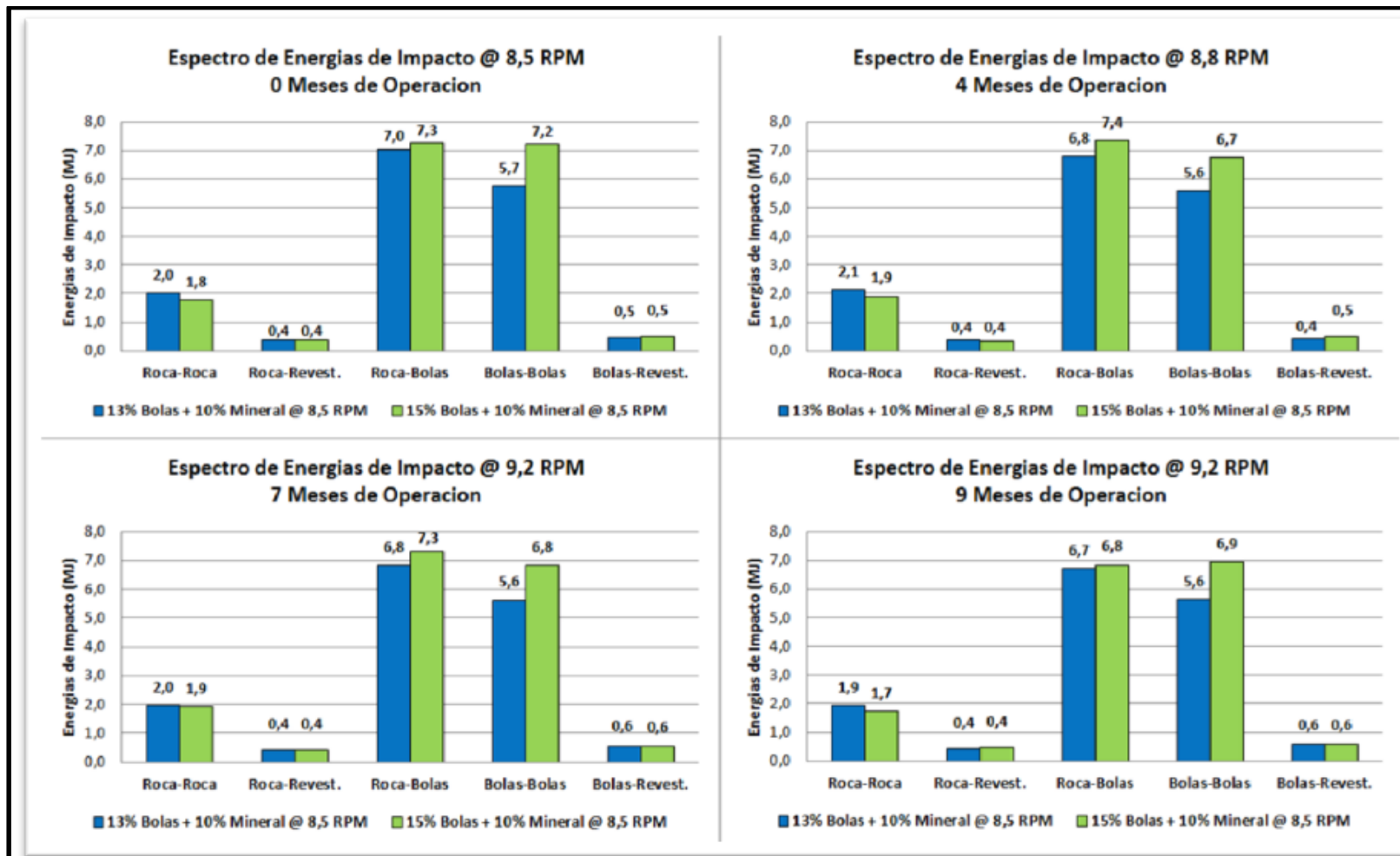
##### **4.4.1. Evaluación del nivel de llenado de bolas.**

Considerando las velocidades óptimas obtenidas en la sección anterior, se realiza un análisis comparativo entre las dos condiciones operacionales simuladas:

- 13% Bolas + 10% Mineral = 23% Carga Total.
- 15% Bolas + 10% Mineral = 25% Carga Total.

Para ello, se utilizará el espectro o distribución de energías de impactos, correspondientes a los resultados numéricos entregados por las simulaciones DEM luego de 45 segundos de simulación, resumidos en los siguientes gráficos de barra comparativos.

Figura N°4.8: Distribución de energías de impactos - DEM



Fuente: Elaboración propia.

Realizando un análisis comparativo, se puede destacar que:

- a) Respecto a la Energía de Impacto Roca-Roca: Para las 4 velocidades analizadas, se obtiene una reducción de un 8,8% promedio al cambiar de 13% a 15% de Carga de Bolas.

Esto se debe que al haber una mayor cantidad de bolas, hay una mayor tendencia de que las rocas colisionen con las bolas que entre ellas. Por lo tanto, se espera que esta disminución se vea compensada en un aumento de impacto Roca-Bolas.

- b) Respecto a la Energía de Impacto Roca-Revestimiento: Para las 4 velocidades analizadas, prácticamente no existe variación entre 13% y 15% de Carga de Bolas.

- c) Respecto a la Energía de Impacto Roca-Bolas: Para las 4 velocidades analizadas, se obtiene un aumento de un 8,5% promedio al cambiar de 13% a 15% de Carga de Bolas.

Debido a que el impacto Roca-Bolas contribuye en una mayor parte a la eficiencia de conminución, este aumento se traduce en una ligera mejora de la eficiencia de molienda.

- d) Respecto a la Energía de Impacto Bolas-Bolas: Para las 4 velocidades analizadas, se obtiene un aumento de un 22,7% promedio al cambiar de 13% a 15% de Carga de Bolas.

Esto se debe que, al haber una mayor cantidad de bolas, hay una mayor tendencia de que colisionen entre ellas. Además, debido a su alta densidad, el aumento de la energía de impacto será mayor.

No obstante, esto también se traduce en un considerable aumento de “pérdida de energía de conminución”. Es decir, gran parte del aumento total de energías de impacto se “desperdicia” en el impacto entre bolas en vez que en impacto con el mineral.

- e) Respecto a la Energía de Impacto Bolas-Revestimiento: Para las 4 velocidades analizadas, prácticamente no existe variación entre 13% y 15% de Carga de Bolas.

Cabe destacar que estos valores corresponden al contacto de bolas con la parte inferior o base del molino, y no debido a colisiones directas de bolas proyectadas en el aire sobre los revestimientos.

#### **4.4.2. Evaluación del tamaño de bola.**

Evaluar en el molino SAG N°1, bolas de 5.5” de diámetro. Actualmente, debido a la competencia del mineral y la evidente mayor producción de pebbles, sobretodo en el SAG N°1, enfrentamos una limitante en el tonelaje de mineral procesado, por ello planeamos incrementar el tamaño de bola para incrementar la energía potencial del elemento moedor y mejorar el

fracturamiento de mineral competente y evitar la sobre carga del molino.  
La evaluación se iniciará con 100% de proporción de bolas 5.5”.

*Figura N° 4.9: Bin de Almacenamiento para Bolas de 5,5”.*



**Fuente: Elaboración propia**

Comentarios:

- La carga total de bolas en el Molino SAG N°1 para un nivel de 13% de llenado es de 392 toneladas y para un nivel de 14% de llenado es de 423 toneladas para llegar a una potencia promedio de 12,3 y 14,0Mw.
- Comparar el delta de variación de tph entre el SAG01 vs SAG02.
- Se consideró las campañas de M4B afectados por mineral competente en donde los SAGs trabajaron al límite de presión y Velocidad. (antes y después).
- Se realizaron muestreos para comparar la granulometría de pebbles (SAG 01 vs SAG 02).
- La evaluación se realizará en paralelo con el molino SAG N°2 (100% Bolas de 5,0”), para ello se realizarán muestreos de ambas líneas de molienda SAG.

Resultados:

- Analizando los resultados mostrados en la Figura N°4.10, La velocidad de fractura (Eje Y) representa que tan rápido se fractura (o reduce, o rompe) cada tamaño (Eje X) de partícula dentro del molino SAG. Tener la forma de ‘S’ más pronunciada, evidencia que efectivamente las velocidades de fractura bajan significativamente en el tamaño crítico (40mm a 60mm). Si la forma de ‘S’ no es tan pronunciada simplemente significa que las velocidades de fractura para el tamaño crítico no son tan bajas, lo que podría sugerir mejor eficiencia.

**Tabla N° 4.13: Datos del muestreo del Molino SAG N°1.**

Descripcion	BR 5"	BR 5.5"	BR 5.5"
Tph Fresco	2255.9	2799.5	2185.5
%Solidos Molienda	87.3	90.6	72.2
tph Pebbles	630	324	351
Potencia Cal.	15663	12940	13900
Nivel JC Cal	25.6	16.4	18.6
Nivel JB Cal.	13.6	12.0	13.5
Ton Bolas	447.1	394.5	445

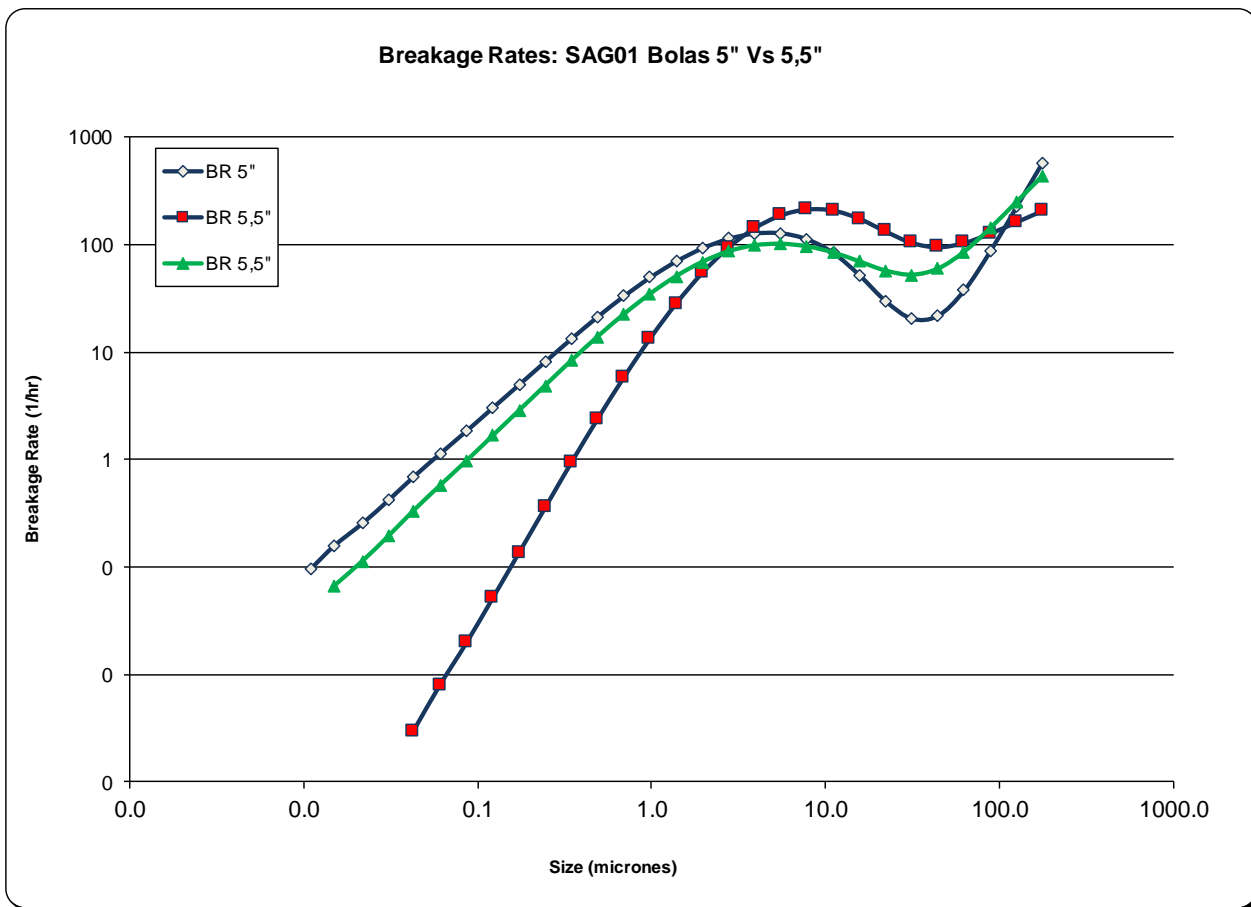
**Fuente: Elaboración propia**



Figura N°4.10: Velocidad de fractura molino SAG N°1.

**COMPARACION DE LA VELOCIDAD DE FRACTURA (Breakage Rates)**

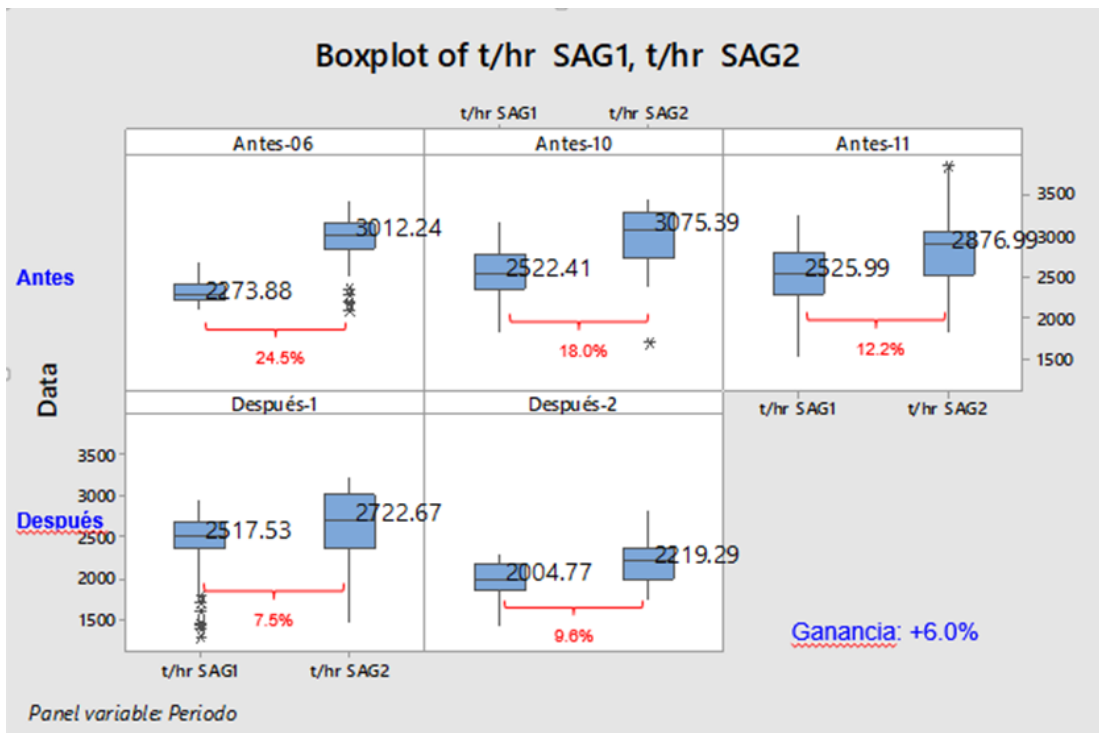
Data JK				
Malla	at size#	BR 5"	BR 5,5"	BR 5,5"
7"	177.8	589.56	209.6	446.5
6"	125.7	226.97	163.9	253.9
5"	88.9	87.85	128.5	144.8
4"	62.9	37.93	105.0	87.0
3"	44.5	22.07	96.1	60.5
2 1/2"	31.4	20.77	105.5	53.1
2"	22.2	30.23	134.7	58.0
1 1/2"	15.7	52.66	176.8	70.6
1"	11.1	84.90	210.8	85.6
3/4"	7.9	113.75	215.6	97.6
1/2"	5.6	129.56	189.7	103.2
3/8"	3.9	128.90	144.2	100.0
1/4"	2.8	115.04	95.2	87.9
4	2.0	93.88	55.1	70.1
6	1.4	70.90	28.6	51.5
8	1.0	50.16	13.4	35.2
10	0.7	33.64	5.9	22.8
14	0.5	21.65	2.4	14.1
20	0.3	13.53	0.9	8.4
28	0.2	8.31	0.4	4.9
35	0.2	5.07	0.1	2.9
48	0.1	3.10	0.1	1.7
65	0.1	1.89	0.0	1.0
100	0.1	1.15	0.0	0.6
150	0.0	0.70	0.0	0.3
200	0.0	0.43	0.0	0.2
270	0.0	0.26	0.0	0.1
325	0.0	0.16	0.0	0.1
400	0.0	0.10	0.0	0.0



Fuente: Elaboración propia

- Los resultados confirman que se tiene un beneficio con el uso de bolas de 5,5”: Ganancia de 6.0% en el tonelaje de procesamiento. (Equivalente a + 8000 tpd cuando ambos SAGs tengan bolas de 5,5”).

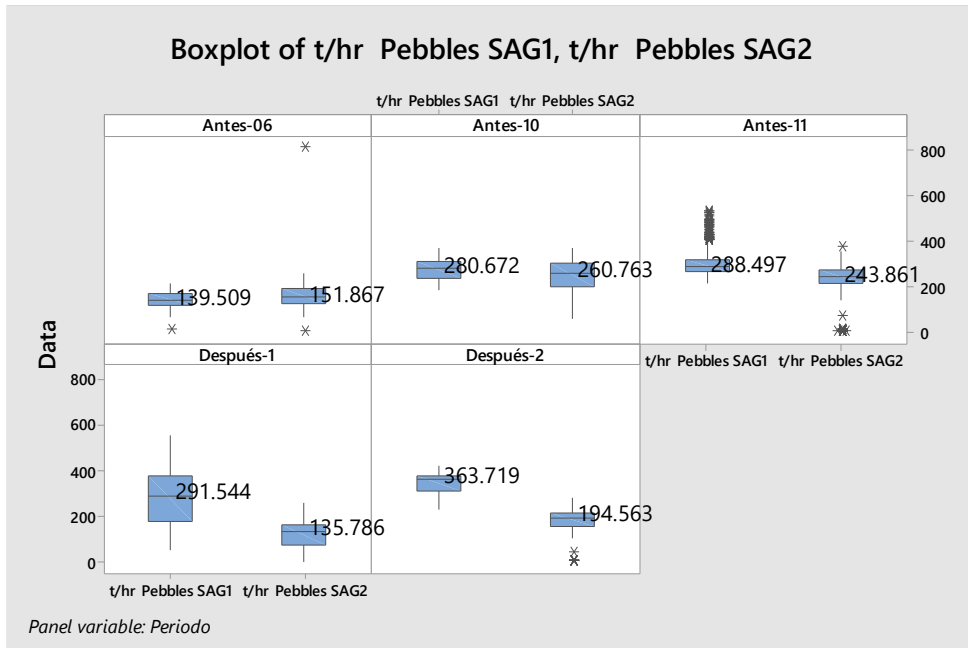
Figura N°4.11: Comparación de tonelaje procesado antes y después de evaluación de bolas 5,5”



Fuente: Elaboración propia

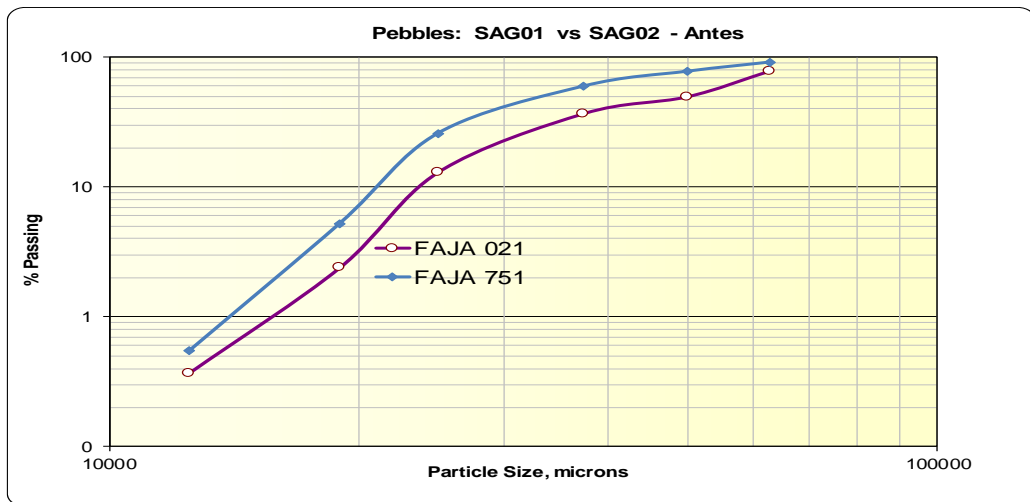
- La granulometría del Pebbles del SAG 01 prácticamente es similar al SAG 02, confirmando de esta forma el efecto del tamaño de bolas.

**Figura N°4.12: Tonelaje procesado en planta pebbles, antes y después del uso de bolas de 5,5”.**



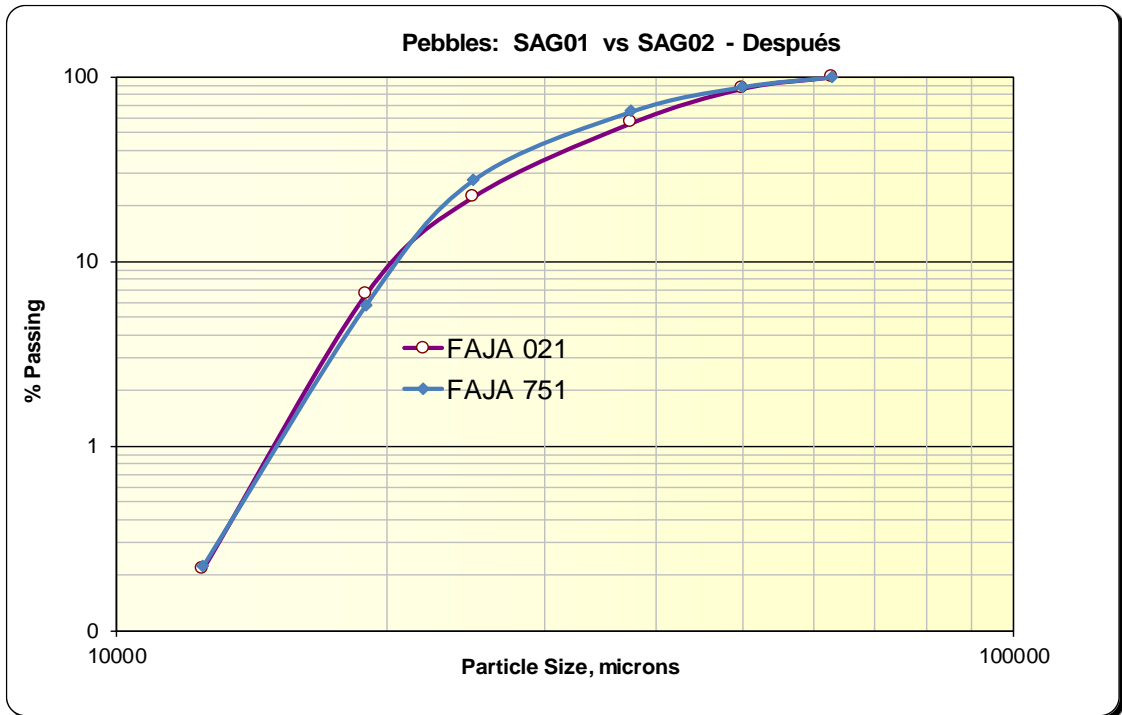
**Fuente: Elaboración propia**

**Figura N°4.13: Granulometría antes de evaluación bola de 5,5”.**



**Fuente: Elaboración propia**

Figura N°4.14: Granulometría después de la evaluación bola de 5,5”.



Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

1. El estudio de caracterización de la dureza del mineral indica que el material proveniente de la fase VIII, ha disminuido el parámetro de fractura  $A_{xb}$  de 66 a 39,4. En la frecuencia de distribución de  $A_{xb}$  de la base de datos de JKTech, este resultado se encuentra en el rango de material duro a duro moderado, confirmando que la roca es más resistente a la fractura por impacto y afecta de forma negativa el throughput.
2. Las simulaciones realizadas indican que es posible incrementar el throughput y optimizar la función selección y función fractura del molino SAG, modificando las variables manipulables del molino SAG:
  - Outer grate con abertura de slots 2,5", incrementa +0,4% el throughput.
  - Aumentar 1.0% el nivel de bolas, incrementa +2,7% el throughput.
  - Modificar el tamaño de bolas a 5,25", incrementa +1,8% el throughput.
  - Modificar el tamaño de bolas a 5,5" incrementa +3,6% el throughput.
  - La interacción de la abertura de los slots a 100% en 2,5" y usar Bolas de 5,5", incrementa +4,5% el throughput.
  - Trabajar a una mayor velocidad en el SAG (+0,4 rpm, incrementa 7,3% el throughput.
3. La evaluación realizada a nivel industrial en el molino SAG N°1, confirma que el uso de bolas de 5,5 pulgadas incrementa el throughput de molienda en 6%.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar una evaluación en planta considerando la interacción de 2 o más variables que incrementaron el throughput en las simulaciones realizadas.
2. Realizar una evaluación integral del circuito de molienda, con el uso de bolas de 5,5" en ambos molinos SAGs.
3. Debido a la alta generación de pebbles, se recomienda realizar un estudio de ingeniería para incrementar la capacidad del circuito Pebbles.
4. Evaluar el uso de outer grate con abertura de slots 2,5" al 100%, en ambos molinos SAGs.
5. Migrar a Shell Liner con mayor ángulo de Lifter (Ejm: 27 o 30°) que nos permita trabajar a mayor velocidad.
6. Continuar con las evaluaciones en Molienda aplicando el JKSimMet; sin embargo, es importante realizar la medición del nivel de carga total del molino SAG (Crash stop), y alimentar este dato al modelo actual de simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AUSTIN, Leonard G. y CONCHA, Fernando A. (1994). Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación. CYTED.
2. JKTech Pty Ltd (2018). Advanced Comminution Circuit Design and Optimization using JKSimMet. Lima.
3. JKTech Pty Ltd (2015). Curso de Simulación y Optimización de Circuitos de Molienda y Chancado. Lima.
4. JONES, S. y FRESKO, M. (2010). Autogenous and Semiautogenous mills. International Conference on Autogenous Grinding, Semiautogenous Grinding and High Pressure Grinding Roll Technology (SAG 2011), 25-28 de Septiembre, Vancouver, BC, pp. 5-7.
5. MAGNE, L. y VALDELAMAR, W. 1999. Molienda Semiautógena: Operación, Mantenimiento y Control. Centro Tecnológico de Molienda SAG y Sistemas Eléctricos, pp. 2-27.
6. MENACHO, Jorge y JOFRE, Javier. (1995). Tópicos Especiales de Conminución de Minerales. CYTED.
7. MENACHO, Jorge. (1988). Diseño y Optimización de Procesos de Conminución, Perú.
8. M. S. Powell. (2001). DEM Modeling of Liner and Lifter Wear in Grinding Mills Proceedings SAG 2001 Conference.
9. Metso Process Technology. (2014). Course Grinding – Circuits.
10. Moly-Cop. (2016). Curso de Molienda de Minerales con Aplicaciones en Ambiente Molycop Tools. Lima.
11. Morrell, S. (2004). Predicting the Specific Energy of Autogenous and Semi-

autogenous Mills from Small Diameter Drill Core Samples. Minerals Engineering, Vol 17.

12. NAPOLEON, Jacinto. (2000). Segundo Curso Internacional de Metalurgia Extractiva y Procesamiento de Minerales. Chile.
13. RIVERA ZEVALLOS, Juan H. (2003). Compendio de Conminución, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. CONCYTEC.
14. SEPULVEDA, J. E. (2004). Methodologies for the Evaluation of Grinding Media Consumption Rates at Full Plant Scale. Minerals Engineering, Chile.
15. SEPULVEDA, J. E. y GUTIERREZ L. (1986). Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras Mediante Técnicas de Modelación Matemática, CIMM, pp1-145.
16. TECSUP. (2010). Actualización en Procesos de Tratamiento de Minerales, Arequipa.
17. WILLS B. A. (2006). Mineral Processing Technology. Seventh Edition.



# ANEXOS

**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

**TITULO**

**“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. – 2019”**

<b>PROBLEMA GENERAL</b>	<b>OBJETIVOS GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLES DEPENDIENTE</b>	<b>MÉTODOLOGÍA MÉTODO</b>
¿Cómo realizar el 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.?	Incrementar el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG, para optimizar las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.	Si incrementamos el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG, entonces podemos realizar la optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.	Optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A.	Científico: Aplicada
<b>ESPECÍFICOS</b>	<b>ESPECÍFICOS</b>	<b>ESPECÍFICOS</b>	<b>INDEPENDIENTE</b>	<b>DISEÑO</b>
1. ¿Cómo identificar los parámetros de cálculo de la Función Selección y Función Fractura del molino SAG?	1. Identificar los parámetros de cálculo de la Función Selección y Función Fractura del molino SAG para optimizar la molienda SAG.	1. Si identificamos los parámetros de cálculo de la Función Selección y Función Fractura del molino SAG entonces podemos hacer la optimización de la molienda SAG.	Incrementamos el THROUGHPUT en la etapa de molienda SAG	Experimental
2. ¿Cuál será la nueva configuración en las parrillas de descarga del molino SAG que permita una mayor evacuación de la pulpa?	2. Determinar la nueva configuración en las parrillas de descarga del molino SAG para que permita una mayor evacuación de la pulpa.	2. Si determinamos la nueva configuración en las parrillas de descarga del molino SAG entonces podemos hacer que se permita una mayor evacuación de la pulpa.	<b>INTERVENIENTES</b> Alimentación de mineral al molino SAG Velocidad de operación Velocidad crítica	<b>TIPO</b> Cuasi-Experimental, Observación.
3. ¿Cuál es el uso del software JKSimMet, realizar los cálculos de balance de masa, modelamiento y simulación del molino SAG?	3. Determinar el uso del software JKSimMet, para realizar los cálculos de balance de masa, modelamiento y simulación del molino SAG.	3. Si determinamos el uso del software JKSimMet, entonces podemos realizar los cálculos de balance de masa, modelamiento y simulación del molino SAG.		

## JKTECH DROP WEIGHT TEST, JKWDT

La prueba de “*JKTech drop-weight*”, *JKWDT*, desarrollada en el Instituto de Investigación en Minerales, Julius Kruttschnitt, se divide en tres componentes:

1. La prueba mide la resistencia al impacto por fractura de partículas gruesas en el rango de 63 a 13.2 mm, (cinco fracciones).
2. Evalúa la resistencia a la fractura por abrasión de partículas en el rango en el rango de 53 a 37.5 mm.
3. La densidad de la roca medida en 30 partículas, para determinar la densidad promedio y su dispersión.

La prueba genera la función apariencia (p. ej. Patrón de Fractura), del mineral bajo condiciones de un rango de fractura por impacto y abrasión, lo cual conduce a la definición de los parámetros:

- $A, b$ , (impacto).
- $t_a$  (abrasión)

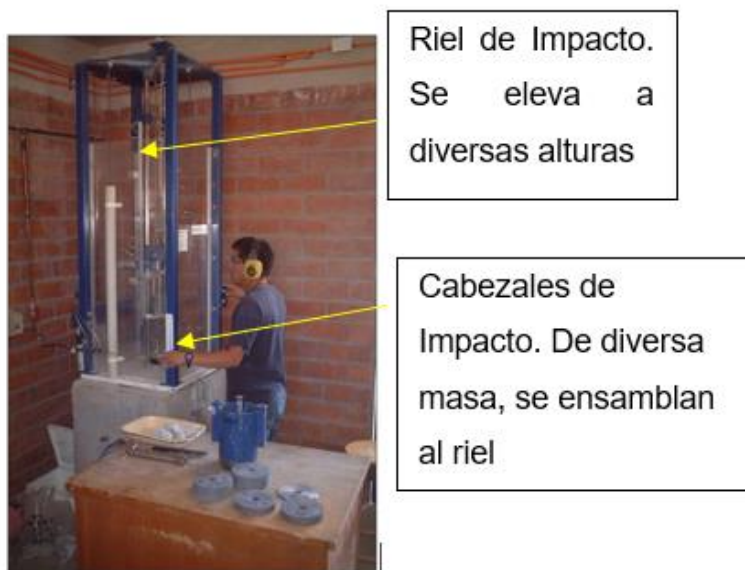
La función apariencia se utiliza en Software de Modelamiento y Simulación *JKSimMet*® que permite predecir la respuesta del mineral al proceso de Comminución. Incluye procesos de:

- Molienda Autógena o Semi Autógena, AG/SAG,
- Chancadora,
- Molino de bolas y
- HPGR

La prueba global requiere de **75 kg de mineral**, el cual se prepara en el laboratorio de ensayo. Básicamente consiste en generar 30 – 90 partículas en **cinco fracciones de tamaño**, en el rango de **13.2 a 63 mm**. En la operación efectiva, de la masa total de 75 kg, se utiliza 25 kg de mineral; todo el material procesado y no utilizado, se puede utilizar para otras pruebas metalúrgicas.

En la prueba de impacto, cada una de las cinco fracciones de tamaño, se someten a tres series de pruebas de impacto en diferentes niveles de energía, haciendo un total de 15 mediciones. En cada una de estas series de pruebas, se utiliza de 10 a 30 partículas de roca, las cuales son sometidas a impacto con un nivel conocido de energía. Esta energía se determina por la altura y peso del cabezal de impacto.

*Figura 1: Equipo de impacto JK Weight Drop*



Todos los fragmentos de cada una las series de pruebas de impacto, se colectan para efectuar análisis granulométrico sobre ellas. De este análisis se obtiene una serie de valores normalizados, “*t*”, que representa la reducción de tamaño.

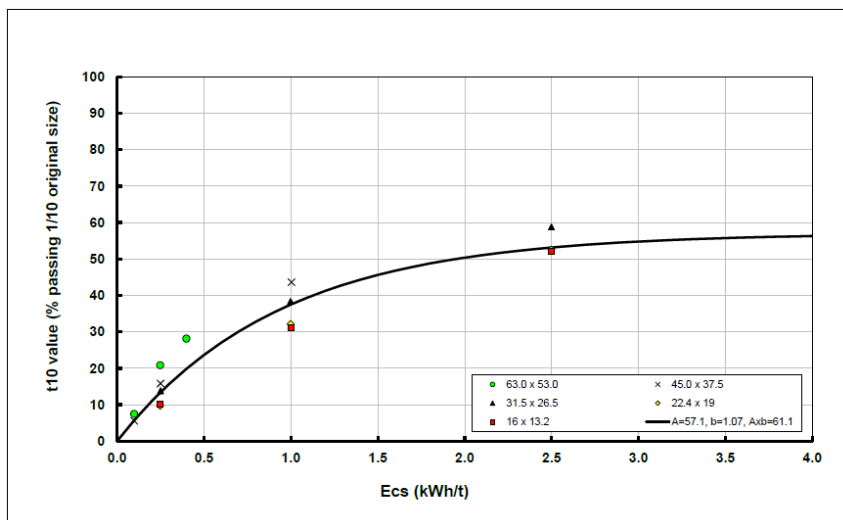
Los valores “ $t$ ”, se definen como el porcentaje en peso de los fragmentos que pasan “ $1/t$ ” de su tamaño original.

Para modelos de molinos AG/SAG, el valor de “ $t_{10}$ ”, se especifica en función de los parámetros “ $A$ ” y “ $b$ ”, según se describe en la siguiente ecuación:

$$t_{10} = A (1 - e^{-bE_{cs}})$$

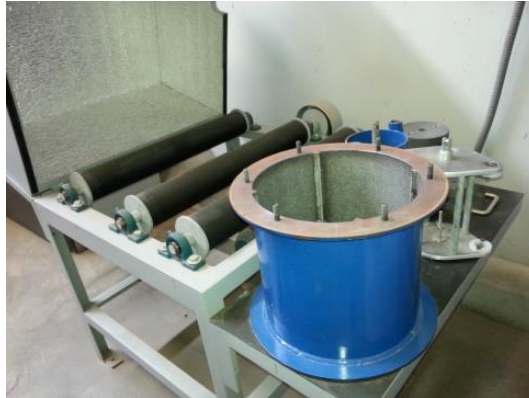
“ $A$ ” y “ $b$ ”, son los parámetros del modelo y “ $E_{cs}$ ” es la energía específica de Comminución, expresada en kWh/t. Un ejemplo se presenta en la Fig. 2. El valor de “ $t_{10}$ ”, se incrementa con valores mayores de energía, hasta que alcanza una constante, (porción casi horizontal de la curva), lo cual corresponde al parámetro “ $A$ ”.

**Figura 2:** Interpretación de la prueba *Weight Drop*.



Para la prueba de abrasión, se requiere una muestra de rocas de 3 kg, de tamaño 53 x 37.5 mm. La muestra se somete a rotación durante 30 minutos en molino cilíndrico de 30 x 30 cm, Figura 3.

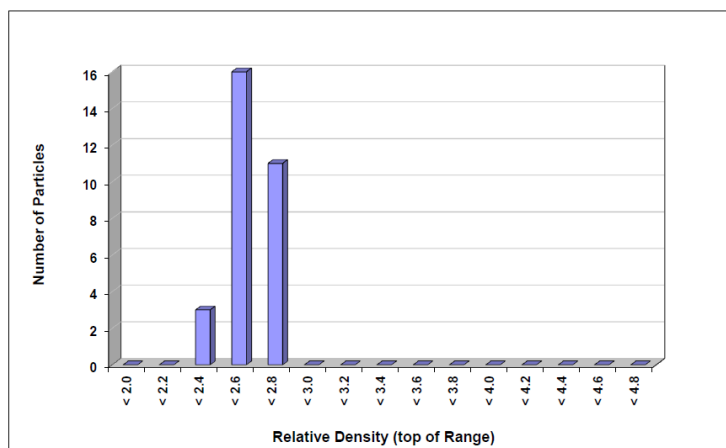
**Figura 3: Molino de abrasión JK.**



Luego de ello, el producto se envía para medición de la distribución granulométrica. Por convención, el parámetro de abrasión ( $t_a$ ) es igual a 1/10 del valor  $t_{10}$  obtenido en la prueba de abrasión.

La determinación de la densidad se ejecuta en 30 especímenes de roca, utilizando la técnica de desplazamiento de agua. Un ejemplo de resultado, se muestra en la figura 4.

**Figura 4: Densidad relativa de partículas de roca.**

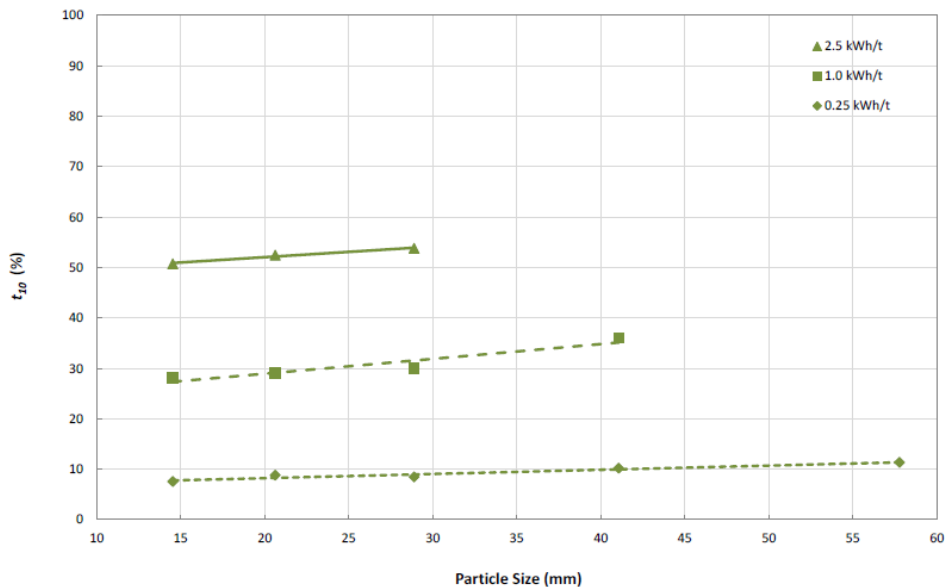


La distribución de densidad del mineral es importante para evaluaciones de molinos AG/SAG, y será muy condicionante para determinar la densidad “bulk” en la carga y potencia del molino. Esta variable definirá la carga “bulk” del molino y la potencia que consumirá. El identificar las variaciones de la densidad del mineral será trascendental

para establecer proyecciones de capacidad de procesamiento. Variaciones muy significativas puede causar que las proyecciones de consumo energético y de capacidad de procesamiento en el molino no se cumplan en la práctica.

Otro aspecto muy interesante de las pruebas JKWDT es que proporciona las variaciones de la dureza de roca, según sus tamaños: de 13.2 a 63 mm. Ejemplo se observa en la Figura 5, para tres diferentes niveles de energía: 0.25; 1.0 y 2.5 kWh/t.

**Figura 5:** Variación de la dureza según el tamaño, en JKWDT.



Típicamente, los valores  $t_{10}$  se incrementan con el tamaño de roca, lo cual significa que la dureza del mineral disminuye, lo cual es efecto del incremento de frecuencia de rotura de rocas gruesas.

Para minerales muy competentes, las líneas de la figura 4 serán casi horizontales; mientras que para minerales no-competentes, la fractura del mineral mostrará alta pendiente de  $t_{10}$  versus el incremento de tamaño. La disminución del  $t_{10}$  con el tamaño, es muy poco frecuente.

Estas curvas pueden ser usadas para inferir o proyectar la competencia del mineral en fracciones gruesas, efectuando pruebas con materiales más finos.

**Requerimiento de Mineral**

Se utiliza 75 kg de muestra mineral, para obtener partículas minerales con la siguiente distribución de e tamaño:

<b>Pulgadas</b>	<b>Milímetros</b>	<b>Número de Partículas</b>
2.5 – 2.125	63.5 – 53.9	45
1.75 – 1.5	44.5 – 38.1	60
<b>1.25 – 1.06</b>	<b>31.8 – 26.9</b>	<b>150</b>
<b>0.875 – 0.75</b>	<b>22.2 – 19.1</b>	<b>120</b>
<b>0.625 – 0.53</b>	<b>15.9 – 13.5</b>	<b>120</b>
0.22 – 0.187	3.5 – 4.8	100

} SMC

Para cada fracción de partículas, entre 10 y 30 partículas se quebrantan a cada uno de tres niveles de energía.

El mineral producto de quebrantado se tamiza y registra peso.

Se determina la abrasión con 1.5 kg de cada una de las fracciones más gruesas.

Se determina la Gravedad Específica con 30 partículas de mineral con peso al aire y peso dentro del agua



## PRUEBAS PARA CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

- ✓ Pruebas de LEIT
- ✓ Pruebas de JK
- ✓ Pruebas de Work Index
- ✓ Pruebas de Abrasión

### Pruebas LEIT. (Low Energy Index Test)

#### BOND IMPACT WORK INDEX TEST CERTIFICATE

Client           SGS Perú  
 Job N            8076  
 SampleDesmonte C  
 Test Date       11-Jul-19  
 Technician     B. Vega

Specimen N°	Thickness mm	Impact Energy Joules	Work Index Kwh/t
1	67	55,6	16,1
2	65	91,9	27,5
3	65	39,7	11,9
4	71	26,0	7,1
5	70	55,6	15,5
6	66	39,7	11,7
7	60	32,6	10,6
8	70	39,7	11,0
9	63	20,1	6,2
10	73	39,7	10,6
11	68	26,0	7,4
12	70	26,0	7,2
13	67	55,6	16,1
14	66	39,7	11,7
15	66	55,6	16,1
16	63	20,1	6,2
17	71	64,2	17,6
18	72	32,6	8,8
19	68	39,7	11,4
20	67	73,2	21,2

#### Testwork statistics

Parameter	Kwh/t
Maximun Impact Work Index	27,5
Minimum Impact Work Index	6,2
Average Impact Work Index	12,6
Standard Deviation	5,5

SG of Specimens	2,75
-----------------	------

<b>AVERAGE BOND IMPACTWORK INDEX</b>	<b>12,6 kwh/t</b>
--------------------------------------	-------------------

## BOND IMPACT WORK INDEX TEST CERTIFICATE

Client           SGS Perú  
Job N            8076  
SampleM1  
Test Date       11-Jul-19  
Technician     S. Baeza

Comments
----------

Specimen N°	Thickness mm	Impact Energy Joules	Work Index Kwh/t
1	61	26,0	7,2
2	56	3,8	1,1
3	59	20,1	5,8
4	53	3,8	1,2
5	65	20,1	5,2
6	62	20,1	5,5
7	63	3,8	1,0
8	56	6,7	2,0
9	51	10,4	3,5
10	56	14,9	12,0
11	52	6,7	3,4
12	51	14,9	5,0
13	57	6,7	2,0
14	56	20,1	6,1
15	52	14,9	4,9
16	52	10,4	3,4
17	54	20,1	6,3
18	51	10,4	3,5
19	64	3,8	1,0
20	62	10,4	2,8

### Testwork statistics

Parameter	Kwh/t
Maximun Impact Work Index	12,0
Minimum Impact Work Index	1,0
Average Impact Work Index	4,1
Standard Deviation	2,7

SG of Specimens	3,16
-----------------	------

<b>AVERAGE BOND IMPACTWORK INDEX</b>	<b>4,1 kwh/t</b>
--------------------------------------	------------------

## Pruebas JKDWT

<b>Client:</b>	Antamina
<b>Deposit:</b>	-
<b>Sample ID:</b>	M 1

<b>Test Date:</b>	43670
<b>Tester:</b>	Jorge Perez
<b>Project Number:</b>	OL-0318-18

Base Data	T10	Ecs	T10	Ecs	T10	Ecs
63x53	28,2	0,40	23,8	0,25	11,1	0,10
45,0 x 37,5	53,7	1,00	21,6	0,25	13,2	0,10
31,5 x 26,5	70,6	2,50	46,8	1,00	21,0	0,25
22,4 x 19	61,8	2,50	42,9	1,00	17,4	0,22
16 x 13,2	59,4	2,50	42,5	1,00	18,2	0,25

### SAG/FAG MILL PARAMETERS

<b>A:</b>	58,6	<b>b:</b>	1,73	<b>A*b:</b>	101,4
-----------	------	-----------	------	-------------	-------

<b>Ta:</b>	1,92	<b>SCSE:</b>	6,8
------------	------	--------------	-----

### CRUSHER PARAMETERS

#### CRUSHER APPEARANCE FUNCTION DATA

t10	t75	t50	t25	t4	t2
<b>10</b>	3,0	3,7	5,5	20,5	48,5
<b>20</b>	6,2	7,6	11,2	40,4	78,7
<b>30</b>	9,5	11,8	17,3	58,7	94,7

### POWER DATA

#### Mean Size (mm)

	14,53	20,63	28,89	41,08	57,78
t10	<b>Ecs (kwh/t)</b>				
10	0,14	0,13	0,12	0,10	0,09
20	0,31	0,28	0,26	0,23	0,21
30	0,53	0,48	0,43	0,39	0,35

Note: The values above have been smoothed using the shi-kojovic model

### DENSITY DATA

<b>Mean</b>	2,65
-------------	------

<b>Std Dev</b>	0,12
----------------	------

<b>Max</b>	2,88
------------	------

<b>Min</b>	2,42
------------	------

### Testing by SGS Perú S. A. C

<b>Client:</b>	Antamina
<b>Deposit:</b>	-
<b>Sample ID:</b>	M2A

<b>Test Date:</b>	43662
<b>Tester:</b>	Jorge Perez
<b>Project Number:</b>	OL-0318-18

Base Data	T10	Ecs	T10	Ecs	T10	Ecs
63x53	20,3	0,40	11,7	0,25	5,8	0,10
45,0 x 37,5	42,9	1,00	11,3	0,25	4,3	0,10
31,5 x 26,5	60,8	2,50	37,9	1,00	9,7	0,25
22,4 x 19	57,4	2,50	33,8	1,00	9,0	0,25
16 x 13,2	52,2	2,50	26,2	1,00	5,3	0,25

### SAG/FAG MILL PARAMETERS

A:	75,0	b:	0,58	A*b:	43,5
----	------	----	------	------	------

Ta:	0,4	SCSE:	9,5
-----	-----	-------	-----

### CRUSHER PARAMETERS

#### CRUSHER APPEARANCE FUNCTION DATA

t10	t75	t50	t25	t4	t2
10	2,8	3,5	5,3	21,2	51,2
20	5,6	7,0	10,6	43,1	81,6
30	8,6	10,6	15,9	83,6	96,4

### POWER DATA

#### Mean Size (mm)

	14,53	20,63	28,89	41,08	57,78
t10	<b>Ecs (kwh/t)</b>				
10	0,34	0,29	0,25	0,21	0,18
20	0,73	0,62	0,53	0,45	0,38
30	1,18	1,00	0,85	0,72	0,61

Note: The values above have been smoothed using the shi-kojovic model

### DENSITY DATA

Mean	2,68
------	------

Std Dev	0,09
---------	------

Max	2,97
-----	------

Min	2,59
-----	------

Testing by SGS Perú S. A. C

<b>Client:</b>	Antamina
<b>Deposit:</b>	-
<b>Sample ID:</b>	M4B

<b>Test Date:</b>	43668
<b>Tester:</b>	Jorge Perez
<b>Project Number:</b>	OL-0318-18

Base Data	T10	Ecs	T10	Ecs	T10	Ecs
63x53	18,7	0,40	10,9	0,25	3,9	0,10
45,0 x 37,5	35,6	1,00	9,6	0,25	5,6	0,10
31,5 x 26,5	58,4	2,50	32,4	1,00	9,2	0,25
22,4 x 19	56,2	2,50	28,4	1,00	6,4	0,25
16 x 13,2	49,6	2,50	27,8	1,00	6,9	0,25

### SAG/FAG MILL PARAMETERS

A:	74,4	b:	0,53	A*b:	39,4
----	------	----	------	------	------

Ta:	0,2	SCSE:	11,1
-----	-----	-------	------

## Pruebas BBWi

Test de moliendabilidad standard de Bond en molino de bolas

Cliente:	Antamina
N° JOB:	-
N° Proyecto:	-
Proyecto:	-
Muestra	
Test N°	1

Fecha:	
Operador:	
Supervisor:	

Proposito: Determinar la moliendabilidad en molino de bolas de la muestra en terminos del indice de trabajo de Bond.

Procedimiento: El equipamiento y procedimiento reproducen el metodo de Bond para determinar los indices de trabajo en molino de bolas

Condiciones: Tamiz de corte: 100 malla

Del Test: Masa de alimentación (700 ml) 1500 gramos

% masa bajo tamaño en la alimentación del molino 21,5 %

Masa del producto bajotamaño para 220% de carga circulante 475 gramos

Resultados: Promedio ultimos 5 ciclos

2,25

Masa, gr 476

% de carga circulante 251

Calculo del índice de trabajo de Bond molino de bolas

$$BWi = \frac{44,5}{P_1^{0,23} * Gbp^{0,82} * \left[ \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]}$$

Donde:

P1 = 100% tamaño pasante del producto 150 micrones

Gbp = Gramos producidos por revolución 2,25 g

P80 = Tamaño pasante al 80% del producto 113 micrones

F80 = Tamaño pasante del 80% de la alimentación 1979 micrones

Índice de trabajo de Bond = 10,0 kwh/at

Índice de trabajo de Bond = 11,1 kwh/mt