

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Dr. Fernando Betancourt C.

Ingeniero Supervisor
Rodrigo Barrera E.

**EFFECTOS DEL PRE-CHANCADO
EN OPERACIÓN DE MOLIENDA SAG,
CÍA. CONTRACTUAL MINERA CANDELARIA**

IGNACIA PINO CARRIL

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniera Civil Metalúrgica

Abril 2018

AGRADECIMIENTOS

En este espacio agradezco a todos quienes hicieron posible (o ayudaron de alguna forma) el que yo pudiera estudiar esta carrera y realizar esta memoria de título con éxito.

En primer lugar a mis padres, Roxana y Pepe, por haberme inculcado desde pequeña la importancia del conocimiento, la opinión y la autonomía y enseñarme de que lo único que nunca nos podrán quitar en la vida son los estudios. A mis hermanos Francisca, Karen, Natalia, Pablo y Catalina, por el apoyo incondicional que existe entre nosotros, por la complicidad que conlleva el ser hermanos, por la ayuda económica cuando ha sido necesaria y por ser grandes personas todos. Agradezco a mi compañero de vida, Ignacio, quien fue un apoyo fundamental mis últimos años de carrera, quien estuvo ahí cuando pensé que no lo podía lograr y por el amor en cada mate de estudio.

Gracias a Minera Candelaria por haberme dado la oportunidad de realizar mi Práctica y Memoria de Título, a mi tutor Rodrigo Barrera por el apoyo y la comprensión en todo momento, sobre todo en los difíciles, a todos mis compañeros de la Superintendencia de Metalurgia, Susana, Víctor, Danilo, Adrián, José, Gonzalo, Rodrigo P, Mario, Dina, Ivar y Rudy, por haberme integrado al equipo y hacerme sentir parte de él, por compartir conmigo sus conocimientos y ayudarme cada vez que lo necesité.

Agradezco a mis profesores por su sencillez, a pesar de ser personas reconocidas e ilustradas y al DIMET, por la buena disposición en cada actividad que realizamos como CEEDIMET. A mis compañeras y compañeros, en especial Mati, Pedro, Pillex, Dano, Ariel, Claudita, Lore y Catita, por haber estado conmigo en distintos períodos de la carrera, por las noches de estudio, por el descontrol y los choriponche.

Finalmente agradezco a la expresidenta Michelle Bachelet J., gracias a usted desde el año 2016 yo y mis hermanos (y miles de estudiantes en Chile) estudiamos gratis, lo que es un apoyo no menor en una familia de seis hermanos. Muchas gracias por ser un ejemplo de mujer.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar el impacto de la instalación de un pre-chancado en la operación de la molienda SAG de Minera Candelaria, esta modificación del circuito de conminución se enmarca dentro de “*Candelaria Consolidation Project*”, que actualmente está en evaluación y es uno más de los esfuerzos por aumentar la capacidad de procesamiento de la planta concentradora y mitigar la disminución de la ley de mena.

Con este pre-chancado se busca incrementar el porcentaje de finos de la alimentación SAG y así disminuir el consumo específico de energía y aumentar el rendimiento horario de la planta. Para comprobar esta hipótesis, se realizaron parametrizaciones de molienda SAG para dos condiciones en Moly-Cop Tools, se compararon las Curvas de Selección Específica y se escogió una de las parametrizaciones para la cual se simuló el pre-chancado en JKSimMet.

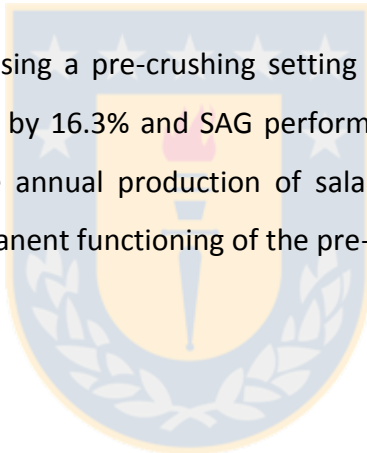
Se demostró que con la instalación del pre-chancado de 50 mm de *setting* aumenta un 7.6% los finos de la alimentación, disminuye un 16.3% el CEE y aumenta un 19.5% el rendimiento SAG, lo que se traduce en un aumento de la producción anual de libras de Cu vendibles cercano al 19%, con respecto a la proyección, para un funcionamiento permanente del pre-chancado.

ABSTRACT

The present study has as its main objective to evaluate pre-crushing installation impact on the SAG mill operation of Minera Candelaria. This comminution circuit modification is part of the “Candelaria Consolidation Project”, which is currently being evaluated and its one of the efforts made to raise the processability of the concentrator plant and to mitigate ore grade decline.

Using this pre-crushing process is meant to raise the percentage of fine particles on the SAG mill feed, therefore diminishing the specific energy consumption and raising the plant’s time performance. To test this hypothesis, SAG milling parameterizations for two conditions on Moly-Cop Tools were made, Specific Selection Curves were compared and one of the parameterizations was chosen to simulate pre-crushing on JKSimMet.

It was proven that installation using a pre-crushing setting of 50mm increases the feed fine particles by 7.6%, CEE decreases by 16.3% and SAG performance is raised by 19.5%, which is translated as an increase in the annual production of salable copper pounds close to 19% regarding projections, for a permanent functioning of the pre-crushing process.



ÍNDICE

NOMENCLATURA	xv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Metodología.....	2
1.2 valiObjetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	4
2.1 Descripción Minera Candelaria.....	4
2.1.1 Geología del Yacimiento	6
2.1.2 Planta Concentradora	7
2.2 Fundamentos de la Conminución	9
2.2.1 Conceptos Básicos.....	9
2.2.1.1 Tamaño de Partícula.....	9
2.2.1.2 Distribución Granulométrica	9
2.2.1.3 Consumo Específico de Energía.....	10
2.2.2 Mecanismos de Fractura.....	10
2.2.2.1 Fractura por Abrasión.....	12
2.2.2.2 Fractura por Compresión (o clivaje)	12
2.2.2.3 Fractura por Impacto (o desintegración)	12
2.2.3 Teoría Moderna de la Conminución	13
2.2.3.1 Modelo Cinético de Molienda Batch.....	13
2.2.3.2 Modelo de Herbst y Fuerstenau	15
2.2.3.3 Parámetros de Fractura.....	16
Función Selección Específica (S_i^E).....	16
Función Fractura Acumulada (B_{ij})	17
2.2.3.4 Función Selección Específica para Molienda SAG	17
2.3 Molienda SAG	18
2.3.1 Circuitos de Molienda SAG	20
2.3.2 Demanda de Potencia del Molino	21

2.3.3	Movimiento de Carga	23
2.3.4	Nivel de Carga Total	24
2.4	Factores que Influyen en La Operación de un Molino SAG	25
2.4.1	Flujo de Alimentación Fresca	25
2.4.2	Distribución Granulométrica de Alimentación	26
2.4.3	Dureza del Mineral.....	27
2.4.4	Nivel de Llenado de Bolas	28
2.4.5	Tamaño de los Medios de Molienda	29
2.4.6	Parrillas de Descarga.....	30
CAPÍTULO 3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	32
3.1	Modelo de Producción Minera Candelaria.....	32
3.1.1	Proyección Producción	33
3.2	Candelaria Consolidation Proje.....	34
3.2.1	Flowsheet CCP.....	35
3.3	Caracterización Muestras	37
3.3.1	Condiciones Operacionales.....	37
3.3.2	Balace de Masa	38
3.3.3	Perfiles Granulométricos	39
3.4	Estimación de Parámetros de la molienda SAG.....	40
3.5	Simulación de Pre-chancado.....	43
3.5.1	Parámetros de Fractura	43
3.5.2	Equipos y Flujos.....	44
3.5.3	Ajuste de Parámetros y Simulación	45
3.6	Simulación SAG	46
3.6.1	Simulación SAG con Nuevo Perfil de Alimentación	47
3.6.2	Nuevo Sobretamaño y Bajotamaño SAG	48
3.6.3	Optimización de Variables	49
CAPÍTULO 4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	50
4.1	Función Selección Específica.....	50
4.1.1	Parámetros SAG	50
4.1.2	Validación de Parámetros.....	51

4.1.3	Comparación Curvas Si ^E	53
4.2	Circuito de Pre-chancado.....	54
4.2.1	Validación de Ajuste y Simulación	55
4.2.2	Nuevo Perfil Granulométrico Alimentación SAG	55
4.3	Efectos del Pre-chancado en la Molienda SAG.....	57
4.3.1	Distribución Granulométrica de Descarga SAG	57
4.3.1.1	Sobretamaño y Bajotamaño Harnero SAG	58
4.3.2	Rendimiento SAG	59
4.4	Optimización de Parámetros SAG con Pre-chancado.....	60
4.4.1	Diámetro de Bola	61
4.4.2	Nivel de Bola	61
4.4.3	Flujo de Alimentación y Nivel de Carga	64
4.5	Proyección de Producción	66
4.5.1	Rendimiento SAG con Pre-chancado y Variables Optimizadas	66
4.5.2	Proyección a Cinco Años de Producción de Cu Fino.....	67
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		70
BIBLIOGRAFÍA.....		72
ANEXOS		73
Anexo A.	Efecto de Parámetros en la Función Selección Específica SAG	73
Anexo B.	Manual de Procedimiento Muestras Correas 2 y 3	76
Anexo C.	PI Server	80
Anexo D.	Datos PI SAG-1	81
Anexo E.	Distribución Granulométrica SAG, Muestras 2011 y 2015.....	82
Anexo F.	Utilities_Mixer Moly-Cop Tools	84
Anexo G.	SAGSim_Open Moly-Cop Tools.....	86
Anexo H.	ScreenSim_Single Moly-Cop Tools.....	88
Anexo I.	Diferencias Perfil de Descarga	91
Anexo J.	Distribución Granulométrica SAG con Pre-chancado.....	92
Anexo K.	Efecto Nivel de Bola en Potencia Consumida	93
Anexo L.	Efecto Nivel de Bola en Rendimiento Horario	94
Anexo M.	Efecto Flujo de Alimentación en Nivel de Carga	96

Anexo N. Efecto Nivel de Carga en Potencia Consumida 97

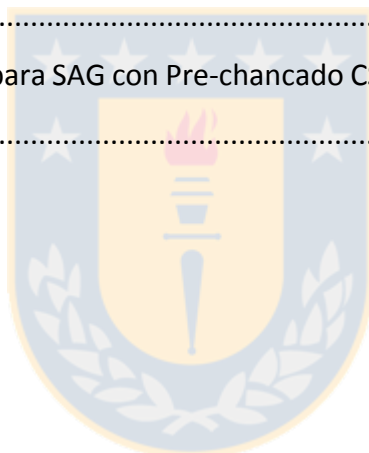


ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción Histórica de Cu fino, Minera Candelaria.....	1
Figura 2. Ubicación Minera Candelaria.....	4
Figura 3. Franja Metalogénica del Norte de Chile	5
Figura 4. Unidades Litoestratigráficas y Geológicas, Minera Candelaria	6
Figura 5. Flowsheet Planta Concentradora y Planta Desalinizadora Minera Candelaria	8
Figura 6. Ilustración del estado de esfuerzo en un sólido desde el punto de vista molecular	11
Figura 7. Propagación de una grieta por ruptura de uniones químicas bajo esfuerzo externo...	11
Figura 8. Representación de los mecanismos de fractura de las partículas	13
Figura 9. Representación esquemática de los eventos de fractura y generación de fragmentos durante un instante Δt , en un molino batch	14
Figura 10. Representación esquemática del comportamiento de la Función Selección	16
Figura 11. Forma típica para la suma de velocidades específicas de molienda en un molino SAG	18
Figura 12. Vista en corte de un Molino SAG típico de gran razón D/L	19
Figura 13. Molienda en una etapa (SAG).....	20
Figura 14. Molienda en dos etapas (SAG).....	20
Figura 15. Molienda en dos etapas con chancado de pebbles (SABC-A)	20
Figura 16. Molienda en dos etapas con chancado de pebbles (SABC-B).....	20
Figura 17. Molienda en dos etapas con chancado de pebbles y prechancado (SABC-B).....	21
Figura 18. Representación esquemática de la carga del Molino para calcular el Consumo Teórico de Potencia	22
Figura 19. Movimiento de la carga en un molino rotatorio	24
Figura 20. Movimiento de carga para diferentes niveles de carga	25
Figura 21. Zonas de operación de un molino	26
Figura 22. Curvas de Potencia SAG, para diferentes niveles de carga y de bolas	29
Figura 23. Velocidad de Ruptura en Función del Tamaño de Bola.....	30
Figura 24. Variación de abertura de parrilla en una campaña de revestimiento SAG	31

Figura 25. Capacidad de evacuación según abertura de parrillas	31
Figura 26. Histórico de Producción de Finos de cobre y Rendimiento Horario, Minera Candelaria	32
Figura 27. Histórico de Producción de Finos de cobre y Ley de Cabeza, Minera Candelaria.....	33
Figura 28. Flowsheet Candelaria Consolidation Project	35
Figura 29. Perfiles Granulométricos Chancador MP 1250 para distintos settings.....	37
Figura 30. Perfil granulométrico de alimentación y descarga SAG-1, Muestreo 2011	39
Figura 31. Perfil granulométrico de alimentación y descarga SAG-1, Muestreo 2015	40
Figura 32. Estimación de Parámetros SAG a partir de datos Muestreo 2011, SAGParam Moly-Cop Tools.....	42
Figura 33. Estimación de Parámetros SAG a partir de datos Muestreo 2015, SAGParam Moly-Cop Tools.....	42
Figura 34. Simulación Circuito de Pre-chancado de CSS 50 mm, JKSimMet	46
Figura 35. Flowsheet Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm, SAGSIM_Open MolyCop Tools.....	48
Figura 36. Curvas Función Selección Específica SAG-1, Muestreos 2011 y 2015.....	53
Figura 37. Perfiles Granulométricos de Alimentación SAG con Pre-chancado de distintos setting	56
Figura 38. Perfiles Granulométricos de Descarga SAG con Pre-chancado de distintos setting ...	57
Figura 39. Sobretamaño y Bajotamaño Harnero SAG, con Pre-chancado y sin Pre-chancado	58
Figura 40. Efecto del Nivel de Bola en la Potencia Consumida SAG.....	62
Figura 41. Efecto del Nivel de Llenado de Bola en el Rendimiento SAG con Pre-chancado de CSS 44mm	63
Figura 42. Efecto del Nivel de Llenado de Bola en el Rendimiento SAG con Pre-chancado de CSS 50mm	63
Figura 43. Efecto del Nivel de Llenado de Bola en el Rendimiento SAG con Pre-chancado de CSS 56mm	63
Figura 44. Efecto de Flujo de Alimentación en Nivel de Carga para SAG con Pre-chancado de CSS 50mm	64
Figura 45. Efecto del Nivel de Carga en la Potencia Consumida SAG.....	65

Figura 46. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 44 mm	68
Figura 47. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 50 mm	69
Figura 48. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 56 mm	69
Figura 49. Efecto del % de acero sobre la función selección específica	73
Figura 50. Efecto de la granulometría de alimentación sobre la función selección específica....	74
Figura 51. Efecto del diámetro de las bolas sobre la función selección específica	75
Figura 52. PI Server Circuito Molienda Línea 1	80
Figura 53. Flowsheet Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm, SAGSIM_Open MolyCop Tools	86
Figura 54. Flowsheet Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm, SAGSIM_Open MolyCop Tools	87



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyección Anual de Libras de Cu Vendibles, Minera Candelaria.	33
Tabla 2. Resultados de Candelaria Consolidation Project Esperados.....	35
Tabla 3. Características de Principales Equipos CCP.....	36
Tabla 4. Condiciones Operacionales, Muestreos 2011 y 2015.....	38
Tabla 5. Flujos Alimentación y Descarga del SAG-1 para los Muestreos 2011 y 2015.....	39
Tabla 6. Parámetros Función Fractura para Chancadores, JKTech Drop Weight.....	43
Tabla 7. Parámetros de Consumo Específico de Energía para Chancadores, JKTech Drop Weight.	44
Tabla 8. Equipos circuito de Pre-chancado, JKSimMet.....	44
Tabla 9. Parámetros Función Selección Específica SAG-1, Muestreo 2011.....	51
Tabla 10. Parámetros Función Selección Específica SAG-1, Muestreo 2015.	51
Tabla 11. Parámetros Función Fractura SAG-1, Muestreos 2011 y 2015.....	51
Tabla 12. Datos Operacionales y Datos Ajustados SAG-1, Muestreos 2011 y 2015.	52
Tabla 13. P80 de Catálogo y Simulado para Chancador MP1250.....	55
Tabla 14. Porcentaje de Finos y F80 en Alimentación SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.	56
Tabla 15. Porcentaje de Finos y P80 en Descarga SAG con Pre-chancado de Distintos Settings. 58	
Tabla 16. Porcentaje de finos y P80 para SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.....	59
Tabla 17. Generación de Pebbles en SAG con Pre-chancado de Distintos Setting.	59
Tabla 18. Resultados Simulaciones SAG con Pre-chancado de Distintos Setting.....	60
<i>Tabla 19. Variaciones Simulaciones SAG con Pre-chancado de Distintos Setting.</i>	<i>60</i>
Tabla 20. Nivel de Bola para un Consumir Máxima Potencia Instalada.	62
Tabla 21. Jb y Jc Optimizados, Muestreo 2011.....	65
Tabla 22. Resultados Simulaciones para SAG con Pre-chancado y Variables Optimizadas.	66
Tabla 23. Variaciones Simulaciones para SAG con Pre-chancado y Variables Optimizadas.	66
Tabla 24. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 44 mm.	67

Tabla 25. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 50 mm.	67
Tabla 26. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 56 mm.	68
Tabla 27. Códigos PI y Flujos de Descarga y Sobretamaño SAG-1, Muestreo 2011.	81
Tabla 28. Códigos PI y Flujos de Descarga y Sobretamaño SAG-1, Muestreo 2015.	81
Tabla 29. Distribución Granulométrica SAG-1 Muestreo 2011.	82
Tabla 30. Distribución Granulométrica SAG-1 Muestreo 2015.	83
Tabla 31. Planilla Mixer para descarga SAG-1, muestreo 2011.	84
Tabla 32. Planilla Mixer para Descarga SAG-1 Muestreo 2015.	85
<i>Tabla 33. Simulación Harnero Vibratorio para SAG con Pre-chancado CSS 44 mm.</i>	<i>88</i>
Tabla 34. Simulación Harnero Vibratorio para SAG con Pre-chancado CSS 50 mm.	89
Tabla 35. Simulación Harnero Vibratorio para SAG con Pre-chancado CSS 56 mm.	90
Tabla 36. Perfil de Descarga Operacional y Ajustado SAG-1 Muestreo 2011.	91
Tabla 37. Distribución Granulométrica para SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.	92
Tabla 38. Efecto de Bola en la Potencia Consumida SAG para distintos Niveles de Carga.	93
Tabla 39. Efecto del Nivel de Bola en Rendimiento Horario SAG con Pre-chancado de Distintos Dettings.	94
Tabla 40. Efecto de Flujo de Alimentación en Nivel de Carga SAG con Pre-chancado de distintos Settings.	96
Tabla 41. Efecto del Nivel de Carga en la Potencia Consumida SAG.	97

NOMENCLATURA

CEE	:	Consumo específico de energía
Cu	:	Cobre
F	:	Flujo
F80	:	Tamaño del 80% acumulado pasante en la alimentación
J _b	:	Nivel de bola
J _c	:	Nivel de carga
km	:	Kilómetros
kt	:	Kilotoneladas
kW	:	Kilowatt
kWh/t	:	Kilowatt-hora por tonelada
lb	:	libras
mm	:	Milímetros
P	:	Potencia
PIB	:	Producto interno bruto
pie, '	:	Pies
pulg, "	:	Pulgadas
P80	:	Tamaño del 80% acumulado pasante en el producto
rpm	:	Revoluciones por minuto
SAG	:	Semiautógeno
S _i ^E	:	Selección específica
t/h	:	Toneladas por hora
t	:	Tonelada
UG	:	Unidad geológica
#	:	Malla
μm	:	Micrones
%	:	Porcentaje



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

En la Tercera Región de Atacama el sector minero es la actividad productiva más importante, significa aproximadamente el 90% de las exportaciones, el 42% del PIB y genera 10.000 empleos directos. Esta región posee recursos metálicos de cobre, hierro, oro y molibdeno; y no metálicos de baritina y mármol. Hacia el año 1995 comenzó su funcionamiento la Cía. Contractual Minera Candelaria, que se ha constituido en el principal yacimiento cuprífero de la zona y que tiene como producto final concentrado de cobre.

Al igual que otros yacimientos cupríferos del país, Candelaria ha sufrido una fuerte disminución en sus leyes de mena. Se estima que en Chile desde 1992 a la fecha las leyes de cobre han disminuido en un 46% (de 1,61 a 0,87%), un 20% más que en el resto del mundo debido a que el desarrollo minero aquí comenzó años antes, lo que ha obligado a las compañías a destinar una mayor cantidad de recursos para mantener los niveles de productividad. Con la implementación de distintos proyectos, Candelaria ha logrado aumentar su capacidad de procesamiento desde 2900 a 3700 t/h, desde el año 2000 a la fecha, pese a este significativo aumento la producción anual de libras de cobre fino contenido ha seguido disminuyendo (Figura 1), lo que demuestra el fuerte impacto que genera la disminución de leyes de mena.

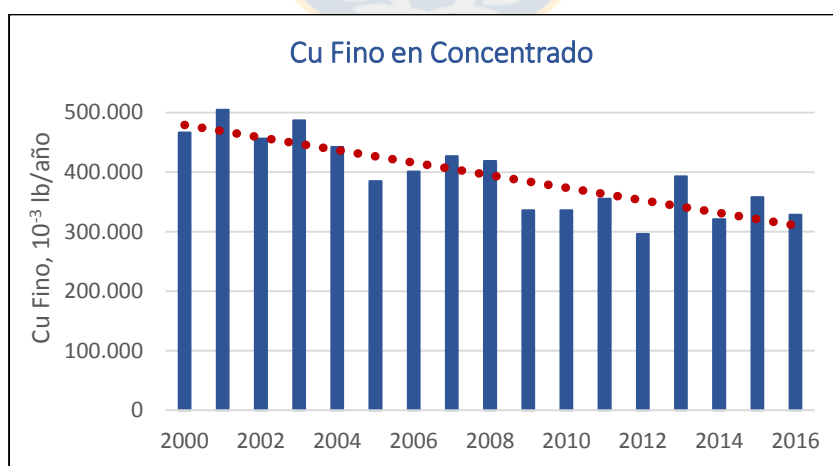


Figura 1. Producción Histórica de Cu fino, Minera Candelaria

Para frenar esta desfavorable situación, surge la necesidad de seguir aumentando la capacidad de procesamiento de la planta concentradora, la que se encuentra limitada por el rendimiento

horario de la molienda semiautógena (SAG). El rendimiento se define como el cociente entre la potencia y el consumo de específico de energía (CEE) del molino, en la actualidad cada SAG de Candelaria trabaja con una potencia de 12500 kW/h, que es la Potencia Máxima Instalada y un CEE de 6.4 kWh/t. De esta forma, para lograr el aumento requerido existen dos alternativas:

- La instalación de un nuevo SAG (y una línea de molienda convencional) o
- una disminución en el consumo específico de energía.

Disminuir el CEE resulta una alternativa mucho más viable, dado que la construcción de una nueva línea de molienda significaría un gran montaje y gigantescos costos de capital. El CEE es una función entre la unidad geológica explotada (UG) y la granulometría de alimentación. La experiencia ha demostrado que al aumentar el porcentaje de finos en la alimentación SAG existe una disminución en el CEE, otras plantas concentradoras del país, que también cuentan con molinos SAG, han aumentado el porcentaje de finos a través de la instalación de una planta de pre-chancado, tal es el caso de Centinela, Sierra Gorda, Teniente, Andina, Doña Inés, Pelambres, Los Bronces y Confluencia.

Por su parte, Candelaria se encuentra evaluando la implementación de “*Candelaria Consolidation Project*”, proyecto que busca aumentar el porcentaje de finos en la alimentación SAG a través de la instalación de una planta de pre-chancado, lo que significaría una disminución del CEE y un aumento en el rendimiento horario SAG, con el fin de (al menos) mantener la producción actual de cobre.

1.1 Metodología

Utilizando el *software* Moly-Cop Tools se obtuvo parámetros de molienda SAG para dos condiciones (muestreos), se compararon y se escogió uno para efectuar la simulación del pre-chancado. En JKSimMet se realizó la simulación del circuito de pre-chancado y se obtuvo un nuevo perfil granulométrico de alimentación SAG. Con la parametrización y perfil obtenido se realizaron simulaciones en Moly-Cop Tools, las que permitieron determinar el impacto del pre-chancado en la producción y nuevas condiciones óptimas de funcionamiento.

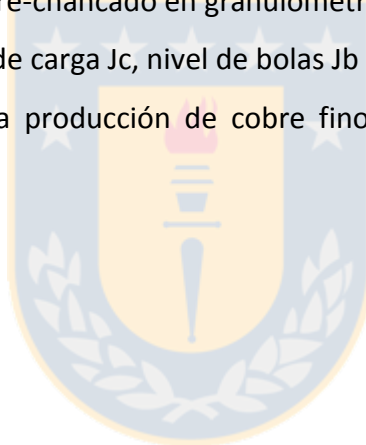
1.2 valiObjetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar el impacto de la instalación de una planta de pre-chancado en la operación de la molienda SAG de Minera Candelaria, utilizando los *softwares* (simuladores) Moly-Cop Tools y JKSimMet.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obtener y validar parametrización de molienda SAG utilizando Moly-Cop Tools y analizar curvas de selección específica.
- Simular y validar simulación de circuito de pre-chancado en JKSimMet.
- Cuantificar el efecto del pre-chancado en granulometría y rendimiento SAG.
- Optimizar variables nivel de carga J_c , nivel de bolas J_b y diámetro de bolas.
- Proyectar a cinco años la producción de cobre fino con la implementación del pre-chancado.



CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2.1 Descripción Minera Candelaria

El depósito de Minera Candelaria se localiza en la comuna de Tierra Amarilla, provincia de Copiapó, Región de Atacama (III), Chile. A 650 metros sobre el nivel del mar, 15 km al sureste de la capital regional Copiapó y 650 km al norte de Santiago, como lo muestra la Figura 2.

La mina fue descubierta en 1987, pero su construcción comenzó en 1993 y se encuentra en funcionamiento desde 1995, en aquel entonces la concentradora procesaba 56000 ton/día de mineral.



Figura 2. Ubicación Minera Candelaria

A 100 kilómetros de la mina se encuentra el Puerto Punta Padrones, en la ciudad de Caldera, puerto que también pertenece a Minera Candelaria y es el punto de embarque del concentrado de cobre a los destinos finales y donde además se encuentra la planta desalinizadora que abastece el 65% del agua fresca utilizada en la planta, el otro 35% son aguas servidas tratadas provenientes de Aguas Chañar.

El yacimiento se encuentra dentro del llamado Cinturón Férrico Chileno (Figura 3) y es de tipo IOCG, óxidos de hierro con cobre y oro. Su sistema de explotación es mixto, a rajo abierto y

subterráneo. Posee reservas minerales de 35 millones de toneladas aproximadamente, con una ley promedio 0,6% de cobre y una vida útil hasta el año 2030. El mineral extraído se trata en la Planta Concentradora que tiene una capacidad de 84.000 TPD procesadas (promedio 2016).

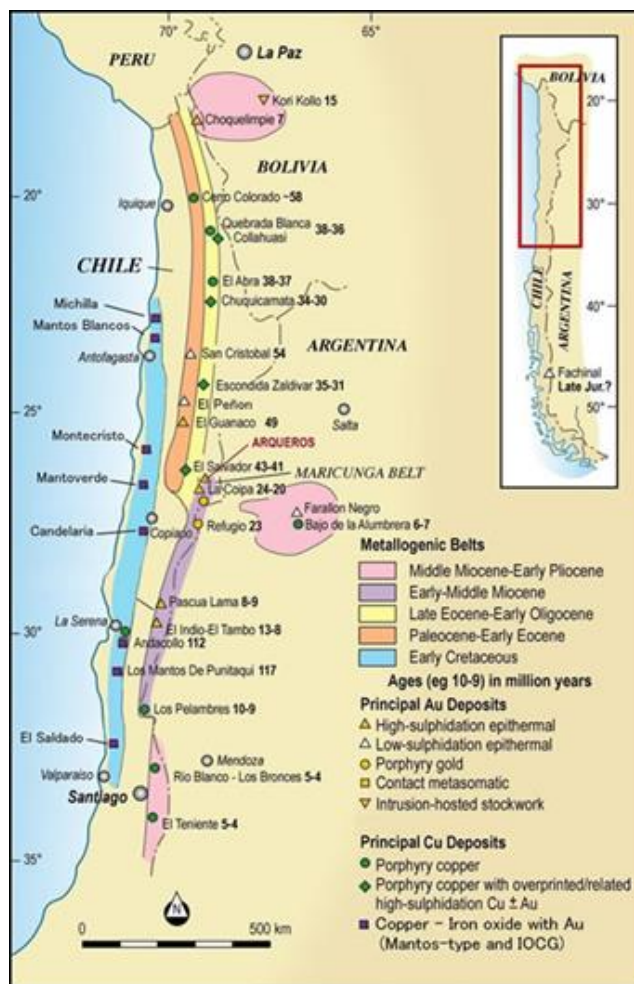


Figura 3. Franja Metalogénica del Norte de Chile

Hasta octubre del 2014 la compañía estuvo controlada en un 80% por la estadounidense Freeport-McMoRan Copper & Gold y en un 20% por el consorcio japonés Sumitomo. En noviembre del 2014 Lundin Mining Corporation compró la participación de Freeport-McMoRan Copper & Gold, mientras que el 20% restante sigue perteneciendo a Sumitomo. Lundin Mining es una compañía minera canadiense con un portafolio diversificado y que tiene operaciones y proyectos, además de Chile, en Portugal, Suecia, España, Estados Unidos y República Democrática del Congo.

Candelaria posee certificación en Sistema de Gestión Ambiental ISO 14.001 y en Gestión de la Seguridad y Salud Laboral OHSAS 18.001. Además de promover la seguridad como un valor fundamental a través del slogan “0 Daño Cada día Cada turno”.

2.1.1 Geología del Yacimiento

El depósito Candelaria corresponde a uno de tipo IOCG, óxidos de hierro con cobre y oro. Son cuatro las unidades litoestratigráficas que se pueden distinguir en este yacimiento: tobas (o sedimentitas volcánoclasticas), andesitas superiores-inferiores, metasedimentitas y sedimentos cuaternarios, las que se muestran en la Figura 4.

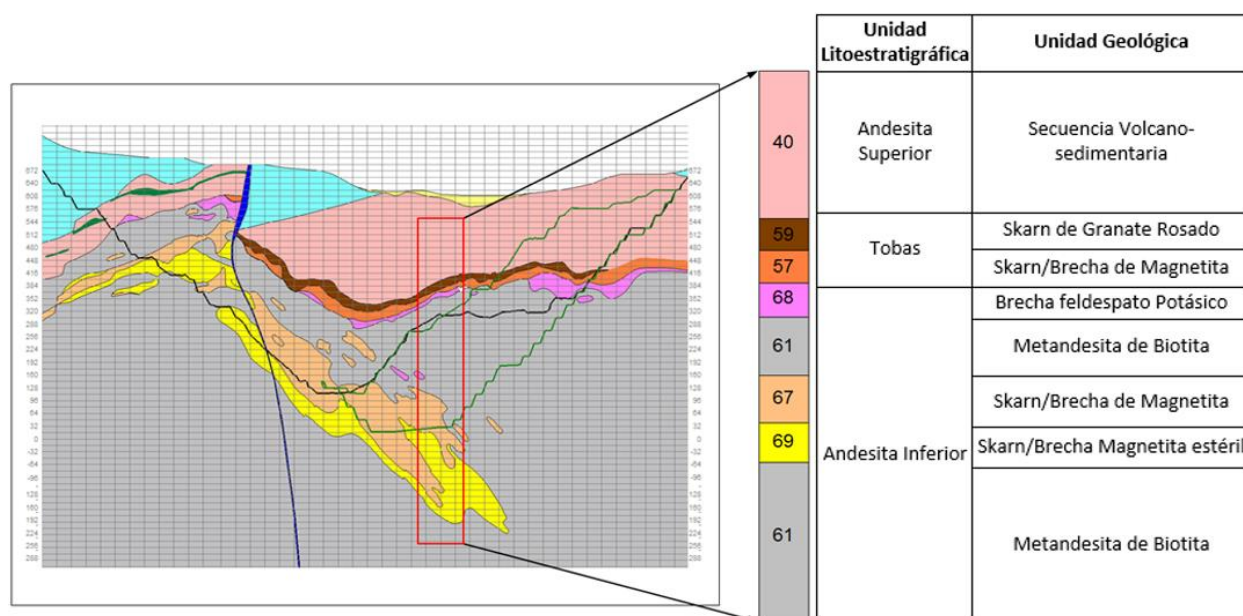


Figura 4. Unidades Litoestratigráficas y Geológicas, Minera Candelaria

En la Figura 4 también se detallan las unidades geológicas del yacimiento, de las cuales sólo cuatro (57+59, 68, 61 y 67) son las explotadas actualmente debido a sus características.

La mineralización consiste principalmente en magnetita (Fe_3O_4), calcopirita (FeCuS_2), pirita (FeS_2) y minerales cuarcíferos como ganga. Existe presencia de oro contenida en la estructura interna de la calcopirita y en menor medida en la pirita.

2.1.2 Planta Concentradora

El mineral proveniente de la mina es descargado y triturado en un chancador primario de tipo giratorio, de éste se obtiene un producto con una granulometría bajo 6". El producto es trasladado mediante una correa transportadora de 457 metros de largo y depositado en una pila de almacenamiento que cuenta con una capacidad de 220.000 toneladas.

Luego, mediante un circuito de correas el mineral es llevado hacia la etapa de molienda que consta de dos circuitos en paralelo, cada uno con un molino SAG y dos molinos de bolas, con el fin de liberar la partícula y obtener un tamaño adecuado de ésta bajo 3/8". El material de la molienda SAG es clasificado en harneros y el sobre tamaño es enviado hacia los chancadores de *pebbles*, realizando nuevamente una reducción de tamaño hasta obtener un producto de 9 mm de dimensión. El circuito de *pebbles* alimenta el área de Fase 3, donde el mineral es clasificado en harneros, triturado en un molino de bolas y enviado directamente hacia la cuba de molienda con el fin de aumentar el tonelaje fresco de molienda.

El mineral con bajo tamaño, obtenido de la segunda etapa de conminución, es enviado como pulpa al proceso de flotación colectiva, provisto de dos circuitos de celdas Rougher, Scavenger y Cleaning, donde se recupera y obtiene el concentrado de cobre.

El concentrado es espesado y filtrado, para posteriormente ser almacenado en el edificio de concentrado y trasladado al Puerto Punta Padrones, donde es embarcado hacia su destino final. El relave producido durante el proceso es espesado para la recuperación de agua y bombeado hacia el tranque de relaves. El agua recuperada es reutilizada en un 88% y almacenada en un estanque de agua de proceso.

El *flowsheet* o diagrama de proceso se ilustra de manera completa en la página siguiente (Figura 5).

DIAGRAMA DE PROCESO

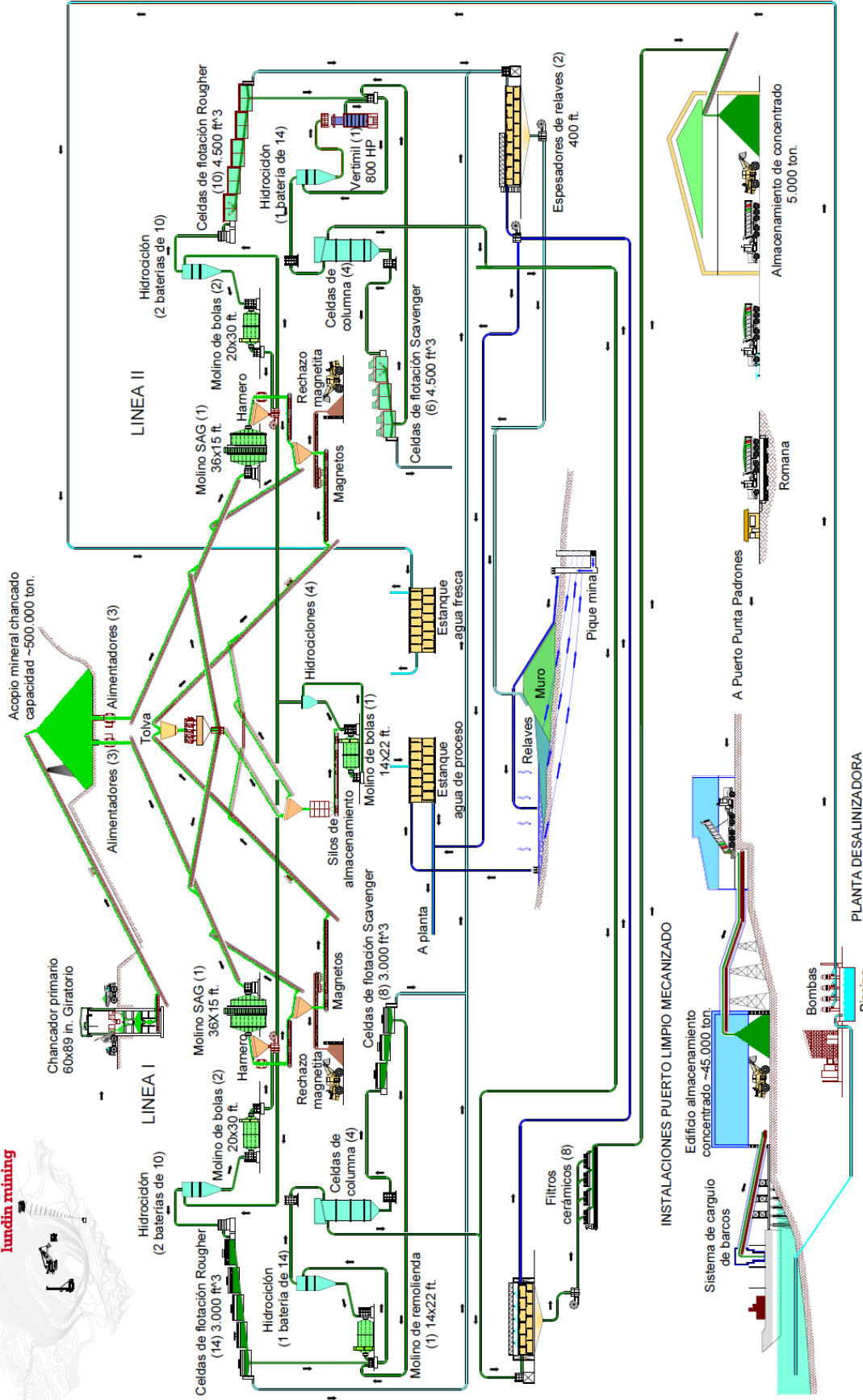


Figura 5. Flowsheet Planta Concentradora y Planta Desalinizadora Minera Candelaria

2.2 Fundamentos de la Conminución

La reducción de tamaño de partículas minerales, también conocida como conminución, es generalmente la primera etapa de tratamiento de una mena, posterior a la extracción. Ésta ocurre a través de los procesos de molienda o trituración con el objetivo de:

- Obtener partículas con tamaño y forma controlados y apropiados para su utilización.
- Liberar especies diseminadas en la ganga, para luego ser concentrados.
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química y facilitar ésta ^[5].

2.2.1 Conceptos Básicos

2.2.1.1 Tamaño de Partícula

En las distintas etapas de conminución la caracterización del comportamiento del mineral depende en gran medida del tamaño de las partículas tratadas y es una de las variables de mayor relevancia operacional.

El tamaño de una partícula es una dimensión representativa de su extensión en el espacio. Ésta puede ser caracterizada por una dimensión lineal, por ejemplo, el largo de la cuerda que cruza la sección proyectada de la partícula desde una posición predeterminada. Dependiendo de la técnica de medición utilizada, también es posible caracterizar el tamaño de una partícula sobre la base de su área superficial, su volumen o su peso.

En las faenas mineras, la técnica predominante utilizada consiste en el uso de mallas o tamices de abertura estándar calibrada. En este caso, el tamaño de la partícula queda caracterizado por la máxima abertura de malla sobre la cual la partícula es retenida ^[7].

2.2.1.2 Distribución Granulométrica

Por efecto de las distintas etapas de conminución se producen partículas de variados tamaños. A fin de caracterizar el comportamiento metalúrgico de cada operación individual, surge la necesidad de cuantificar el contenido de partículas de un tamaño dado relativo al total de partículas en la muestra, propiedad normalmente referida como “Distribución Granulométrica”, o simplemente “Granulometría”.

La metodología normalmente consiste en hacer pasar la muestra de mineral, que se desea caracterizar, por una serie de tamices ordenados secuencialmente de mayor a menor abertura. Esta distribución puede ser representada, ya sea en una tabla de datos, o bien en un gráfico de porcentaje pasante acumulado versus la abertura de la malla en micrones (en escala logarítmica), lo que se conoce como “Perfil Granulométrico” [7].

2.2.1.3 Consumo Específico de Energía

El CEE se define como la energía necesaria a consumir para provocar la fractura de una tonelada del mineral que se procesa, y se mide en kWh/t [7]. En forma práctica, se calcula con la siguiente ecuación:

$$CEE = \frac{P}{F}, kWh/t \quad (1)$$

donde P es la potencia consumida por el equipo de reducción de tamaños en kW y F es el flujo de alimentación fresca al circuito en t/h.

2.2.2 Mecanismos de Fractura

En un proceso de conminución de escala industrial la fragmentación de cualquier partícula estará íntimamente relacionada con la fragmentación de muchas otras partículas de forma simultánea, sin la posibilidad de distinguir el comportamiento de cada una de estas. A pesar de esto, cada una de estas partículas se romperá como resultado de los esfuerzos aplicados a ella individualmente y de ahí la importancia de caracterizar la fractura de una partícula de forma individual [6].

Los minerales se componen de granos de diversas especies mineralógicas, cada una de estas posee una determinada estructura cristalina la que se configura gracias a los diferentes tipos de enlaces químicos o físicos que participan en la unión de los átomos. Los enlaces interatómicos sólo son efectivos a corta distancia, debido a la presencia de defectos en la estructura y pueden ser separados por la aplicación de esfuerzos de tensión, compresión o cizalle, ilustrados en la Figura 6.

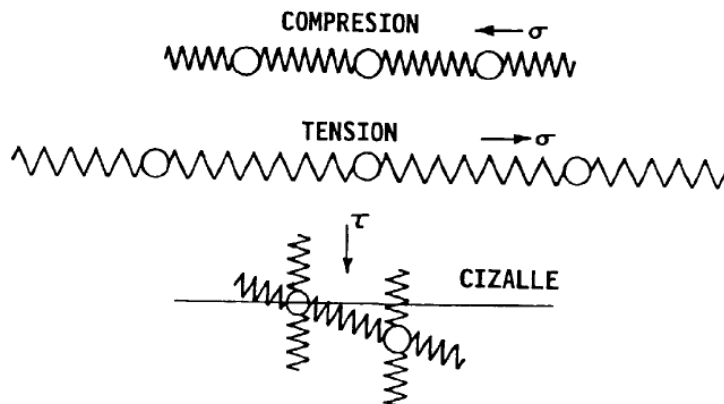


Figura 6. Ilustración del estado de esfuerzo en un sólido desde el punto de vista molecular ^[1]

El análisis del comportamiento de materiales durante su ruptura fue iniciado por Griffith en 1920, quien mostró que una partícula de mineral puede considerarse un material frágil y elástico, conteniendo un gran número de grietas a nivel macroscópico, pero también a nivel microscópico conocidas como Fallas de Griffith ^[1]. Cuando la energía de deformación en la punta de la grieta es lo suficientemente alta, implica que los enlaces químicos en la punta se rompan y la grieta se propaga produciendo la fractura del material. Este comportamiento se ilustra en la Figura 7.

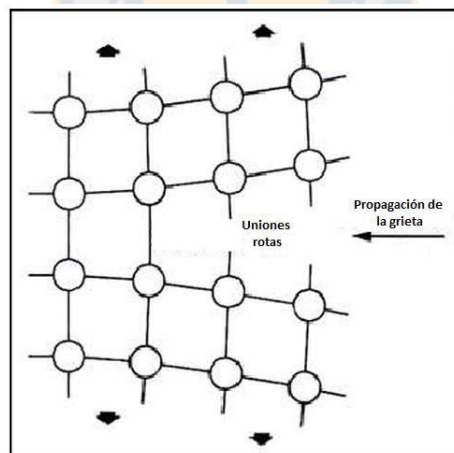


Figura 7. Propagación de una grieta por ruptura de uniones químicas bajo esfuerzo externo ^[6]

La forma en la cual se fractura la partícula depende de su naturaleza y de la manera en que se aplique la fuerza. En el caso específico de la reducción de tamaño en un molino SAG se debe a la acción de tres tipos de mecanismos que pueden actuar simultáneamente. Estos mecanismos son los siguientes:

2.2.2.1 Fractura por Abrasión

La fractura por abrasión se produce normalmente por roce de las partículas entre sí, contra el medio de molienda o contra el revestimiento, generando una concentración de esfuerzos en la superficie de la partícula. El resultado es la fractura de una pequeña área de la partícula, produciendo una distribución de partículas de tamaño cercano al de las partículas originales y gran cantidad de finos (Figura 8 a). En las partículas pequeñas las grietas tienden a desaparecer quedando solamente las fallas del material, lo que las torna más duras siendo esto un efecto indeseable.

2.2.2.2 Fractura por Compresión (o clivaje)

La fractura por compresión ocurre cuando la energía aplicada es la suficiente de forma que pocas regiones de la partícula alcanzan el punto de fractura y se tiene como resultado sólo unas pocas partículas cuyo tamaño es cercano al tamaño original (Figura 8 b). Esta situación se produce, por ejemplo, por la acción de las bolas y de rocas de gran tamaño que al rodar hacia el pie de la carga impactan sobre partículas de tamaño intermedio y fino.

2.2.2.3 Fractura por Impacto (o desintegración)

La fractura por impacto (Figura 8 c) ocurre cuando la energía aplicada excede bastante la energía necesaria para fracturar, por lo tanto, muchas áreas en la partícula quedan sobrecargadas y dando como resultado un gran número de partículas con un amplio rango de tamaños. Esto sucede, por ejemplo, cuando las bolas de gran tamaño (>5") son levantadas con suficiente energía como para que se separen de la carga y caigan golpeando violentamente el mineral que se encuentra al pie del molino.

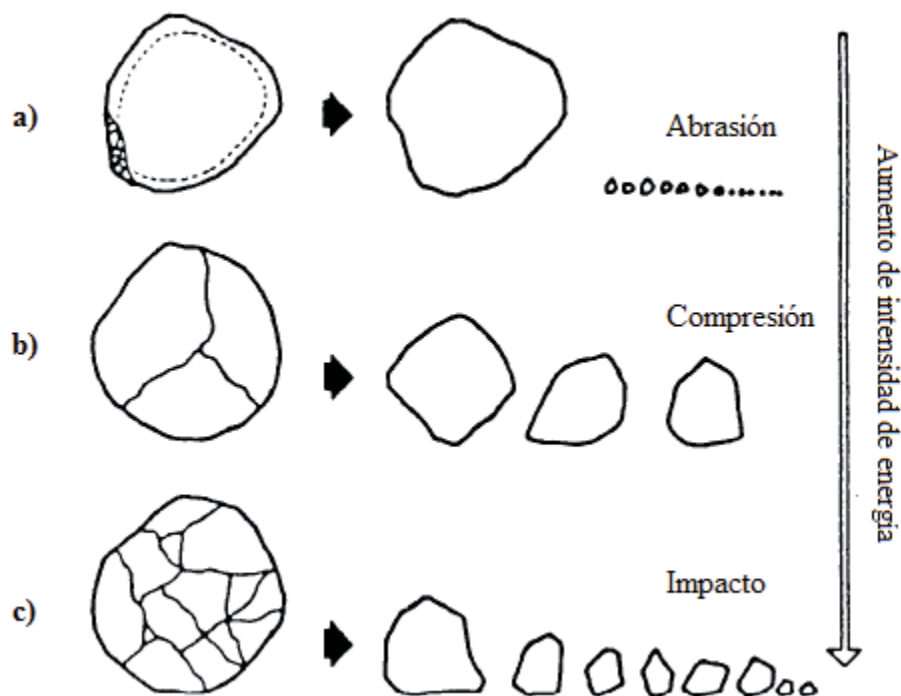


Figura 8. Representación de los mecanismos de fractura de las partículas ^[6]

2.2.3 Teoría Moderna de la Conminución

2.2.3.1 Modelo Cinético de Molienda Batch

Este modelo, basado en la ecuación general de balance poblacional, se diferencia de las teorías clásicas de la conminución al incorporar nuevos conceptos para llegar a la ecuación que representa la distribución de tamaño en el producto de un evento de conminución:

Función Selección S_i : Fracción de partículas de un determinado tamaño presentes en la carga del molino que se fracturarán en la siguiente unidad de tiempo.

Función Fractura b_{ij} : Define la distribución granulométrica de los productos obtenidos al realizarse un evento de molienda.

El balance diferencial de masa se entiende fácilmente mediante la Figura 9, que representa la situación de un molino *batch* en un instante t y un instante posterior $t + dt$.

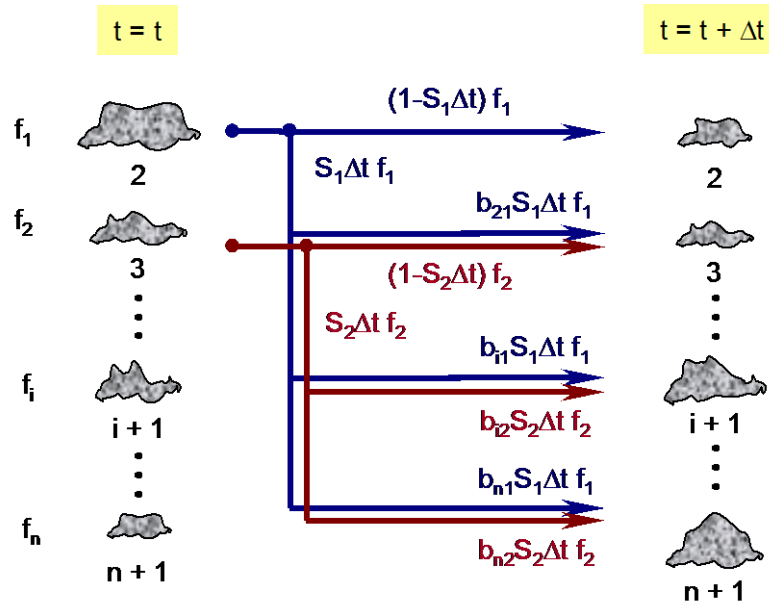


Figura 9. Representación esquemática de los eventos de fractura y generación de fragmentos durante un instante Δt , en un molino batch ^[7]

Matemáticamente:

$$\frac{df_i(t)}{dt} = -S_i f_i(t) + \sum_{j=1}^i b_{ij} s_j f_j(t) \quad (2)$$

donde $f_i(t)$ y $f_j(t)$ representa la fracción de masa del tamaño de abertura "i" y "j" presentes en el molino en un tiempo "t" respectivamente; b_{ij} es la función fractura y S_i es la función selección del material en el intervalo "i".

Actualmente se conoce la solución analítica de este complejo sistema de ecuaciones diferenciales, el cual puede ser expresado en su forma matricial como:

$$f = T \cdot J \cdot T^{-1} \cdot f^0 \quad (3)$$

donde T es una matriz triangular inferior (n x n), cuyos elementos T_{ij} están dados por:

$$T_{ij} = \begin{cases} 0 & , si i < j \\ 1 & , si i = j \\ \sum_{k=j}^{i-1} \frac{b_{ik} \cdot S_k}{S_i - S_j} \cdot T_{kj} & , si i > j \end{cases} \quad (4)$$

Mientras que J es una matriz diagonal (n x n), cuyos elementos J_{ij} están dado por:

$$T_{ij} = \begin{cases} 0 & , si i \neq j \\ \exp(-S_i \cdot t) & , si i = j \end{cases} \quad (5)$$

2.2.3.2 Modelo de Herbst y Fuerstenau

El modelo propuesto por Herbst y Fuerstenau plantea que, según lo observado en la práctica, los valores de la Función Selección presentan relaciones de proporcionalidad con la potencia absorbida por el molino en forma de la ecuación:

$$S_i = S_i^E \cdot \frac{P}{H} \quad (6)$$

donde H es la masa de material contenida en el molino y P es la potencia neta consumida.

Ahora, si el consumo específico de energía está dado por la expresión:

$$E = \frac{P \cdot t}{H} \quad (7)$$

Al reemplazar la Ecuación 7 en la Ecuación 8, se obtiene:

$$S_i = S_i^E \cdot \frac{P}{H} = S_i^E \cdot \frac{E}{t} \quad (8)$$

de donde:

$$S_i \cdot t = S_i^E \cdot E \quad (9)$$

lo que constituye la relación clave para expresar el modelo cinético de molienda Batch en función de la Selección Específica (S_i^E), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{df_i(E)}{dt} = -S_i^E f_i(E) + \sum_{j=1}^i b_{ij} S_j^E f_j(E) \quad (10)$$

De manera análoga, también se puede expresar la forma matricial del modelo Batch (Ecuación 3, 4 y 5) en función de la Selección Específica.

2.2.3.3 Parámetros de Fractura

Las ecuaciones del modelo *batch*, y también del modelo continuo, son expresables en función del parámetro controlante del proceso: la energía específica consumida. “En procesos de molienda, el transcurso del tiempo no debe expresarse en minutos, sino en kWh/TMS [7].”

Función Selección Específica (S_i^E)

Se define como la velocidad de producción de finos con respecto a la Energía Específica consumida y corresponde a la fracción de partículas de tamaño “*i*” presentes en el molino, que serán fracturadas durante el siguiente incremento marginal de Energía Específica (Figura 9).

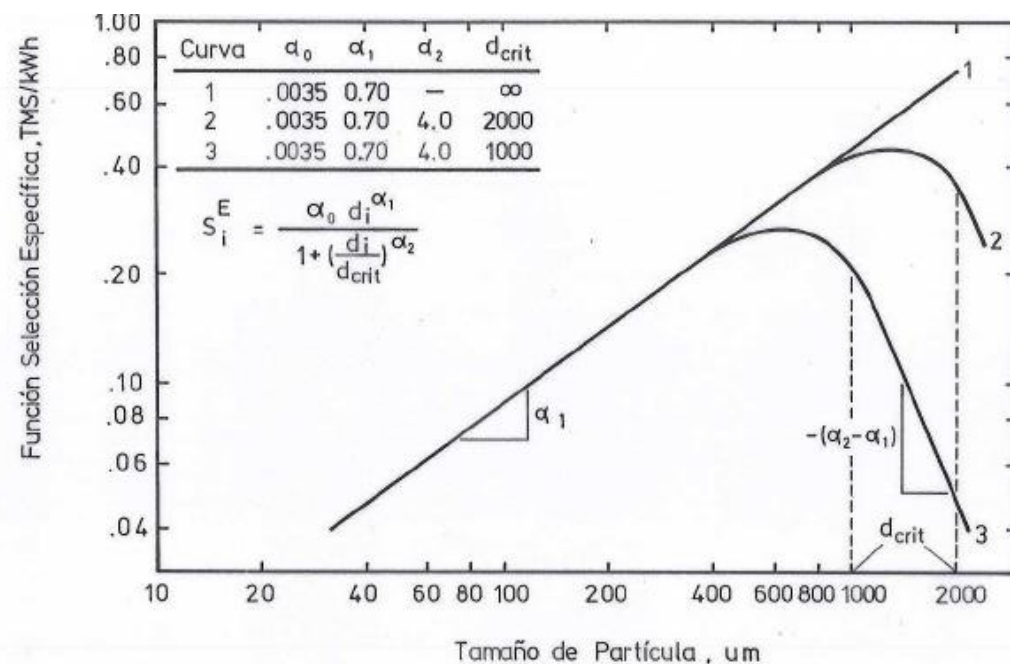


Figura 10. Representación esquemática del comportamiento de la Función Selección [7]

Esta función depende fundamentalmente de las características propias del mineral y muy poco de las condiciones operacionales del proceso de molienda, y se define como:

$$S_i^E = \alpha_0 d_i^{\alpha_1} \quad ; i = 1, \dots, n \quad (11)$$

donde d_i es el tamaño representativo de la fracción granulométrica “*i*” y α_0 y α_1 son parámetros cuyos valores dependen del mineral ensayado y de algunas condiciones de operación,

especialmente la distribución de tamaños de la carga de bolas en el molino. Para aquellos casos en la razón diámetro de bola/diámetro de partícula no es suficientemente alta, se aplica:

$$S_i^E = \frac{\alpha_0 d_i^{\alpha_1}}{1 + (d_i/d_{crit})^{\alpha_2}} \quad (12)$$

donde d_{crit} es un parámetro cuyo valor dependerá de dicha razón. Esta ecuación indica, que el $\ln(S_i^E)$ aumenta linealmente con la pendiente α_1 en la medida que el $\ln(d_i)$ también aumenta, hasta alcanzar un máximo:

$$d_{m\acute{a}x} = d_{crit} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right)^{1/\alpha_2} \quad (13)$$

que disminuye en forma lineal con pendiente $(\alpha_1 - \alpha_2)$ [7].

Función Fractura Acumulada (B_{ij})

Fracción acumulada (en peso) de fragmentos pasantes en la malla "i", provenientes de la fractura de las partículas retenidas en la malla "j". Queda representada por la siguiente ecuación:

$$\beta_{ij} = \beta_0 \left(\frac{d_i}{d_{j+i}} \right)^{\beta_1} + (1 - \beta_0) \left(\frac{d_i}{d_{j+i}} \right)^{\beta_2} \quad (14)$$

Los parámetros α_0 , α_1 , α_2 , β_0 , β_1 y d_{crit} se calculan a partir de datos experimentales.

2.2.3.4 Función Selección Específica para Molienda SAG

En la molienda SAG (definida en la Sección 2.3) Son al menos tres los mecanismos de fractura que interactúan en el funcionamiento.

- Impactos de bolas sobre partículas, similar a la molienda convencional.
- Impactos de rocas sobre partículas, donde las rocas sirven como medio moedor autógeno
- Auto-fractura de las rocas más grandes, como resultado de su propia acción de caída al interior del molino [10].

En este contexto, se postula que en un molino SAG la Función Selección Específica Global se puede derivar como la media ponderada de las tres contribuciones independientes de cada uno de los tres mecanismos, según la expresión:

$$S_i^E \text{ global}^E = S_i^E \text{ bolas} E_{bolas} + S_i^E \text{ rocas} E_{rocas} + S_i^E \text{ auto-fractura} E_{rocas} \quad (15)$$

La curva resultante de esta sumatoria tiene forma que similar a la Figura 11, que ilustra la Función Selección (en función del tiempo) para molienda SAG. El valle de esta curva representa los tamaños críticos o "pebbles".

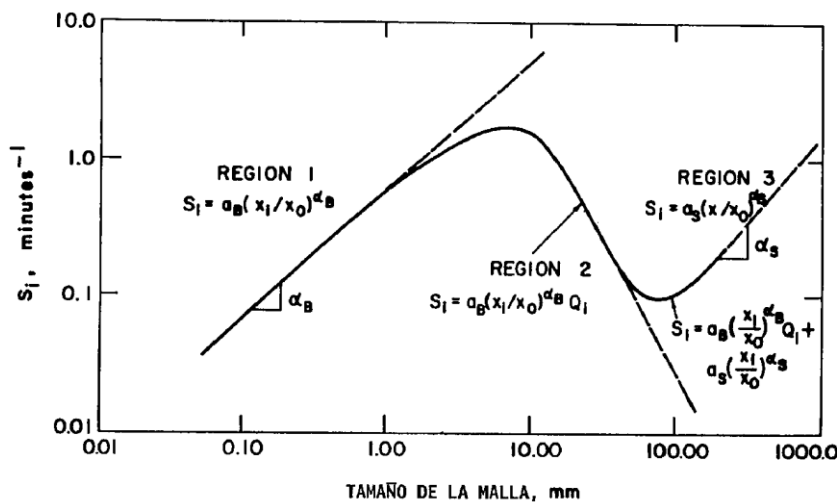


Figura 11. Forma típica para la suma de velocidades específicas de molienda en un molino SAG [1].

El Anexo A incluye tres gráficos que muestran el efecto del porcentaje de bolas, tamaño de bola y granulometría de alimentación en la Función Selección Específica para la molienda SAG.

2.3 Molienda SAG

La molienda semiautógena es una variación del proceso de molienda autógena y es la más frecuente en la práctica. Puede definirse, en forma general, como un método de reducción de tamaño por medio de un molino rotatorio cuya carga corresponde a mineral proveniente de la mina o que ha pasado por un chancado primario, es decir, el Molino Semiautógeno (Figura 11) reemplaza al molino de barras de la molienda convencional, pero además, reemplaza las etapas de chancado secundario y terciario.

A diferencia de un molino de bolas, el diámetro de un SAG es mucho mayor que el largo y se eliminan parcialmente los medios de molienda, donde la cantidad de bolas de acero representa

entre un 5 a 20% del volumen total del molino, las que se agregan para mejorar el proceso y generalmente son de tamaños mayores a 3" de diámetro.

La reducción de tamaño en un molino semiautógeno se debe a la acción de tres tipos de mecanismos que pueden actuar simultáneamente, impacto, compresión y abrasión; son utilizados principalmente para moler minerales de hierro y su operación comúnmente va asociada con un proceso de chancado de *pebbles* (tamaño característico de partícula que actúa como dureza mayor al resto).

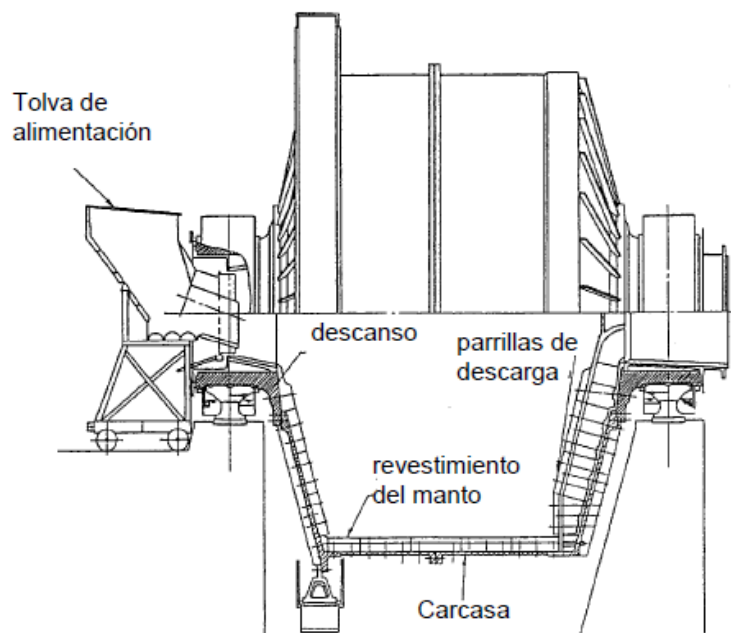


Figura 12. Vista en corte de un Molino SAG típico de gran razón D/L ^[1]

Existe consenso en el sentido de que los molinos SAG seguidos de un molino de bolas, ofrecen ventajas comparativas sobre el esquema convencional. Uno de los aspectos que ha favorecido esta alternativa tecnológica, es la creciente necesidad de procesar mayores cantidades de material, a causa de la baja en las leyes que afecta a gran parte de los yacimientos mineros. Además el desarrollo de este tipo proyectos, particularmente en Chile, indica que requieren de un menor costo de capital en comparación a una línea tradicional. El consumo de energía global en kWh/t tiende a ser mayor para sistemas SAG, pero el costo de operación es menor que el sistema convencional debido principalmente a los menores costos de mantención al contar con menos equipos ^[2].

2.3.1 Circuitos de Molienda SAG

Existen variantes en los circuitos de molienda SAG, algunos se realizan en una sola etapa (Figura 13) y otros comprenden dos etapas de molienda, la primera SAG y la segunda de bolas en circuito cerrado inverso con hidrociclones (Figura 14).

Actualmente, los circuitos más utilizados incorporan una etapa de chancado de *pebbles* al circuito de dos etapas, ya sea con retorno al molino SAG (Figura 15) o a la alimentación del molino de bolas (Figura 16).

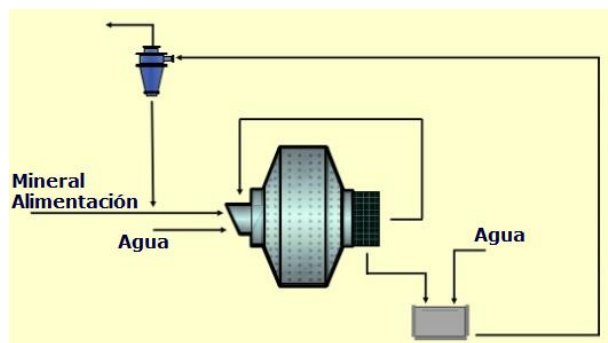


Figura 13. Molienda en una etapa (SAG) ^[3]

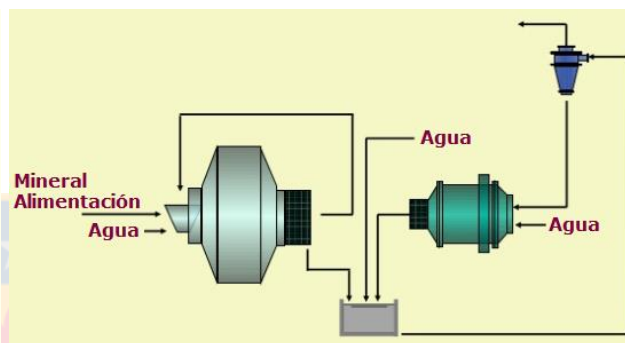


Figura 14. Molienda en dos etapas (SAG) ^[3]

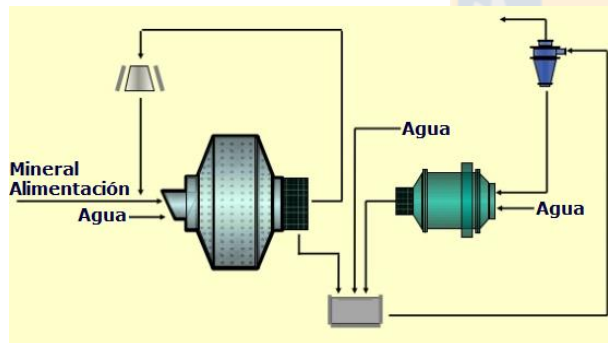


Figura 15. Molienda en dos etapas con chancado de pebbles (SABC-A) ^[3]

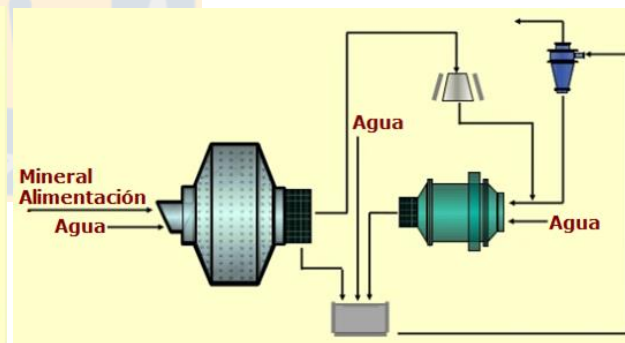


Figura 16. Molienda en dos etapas con chancado de pebbles (SABC-B) ^[3]

Respondiendo a la necesidad de incrementar la fineza de la alimentación fresca al circuito ^[3], surge la última modificación de los circuitos de Molienda SAG que incluye un pre-chancado previa a la alimentación del molino (Figura 17). Cabe destacar que el chancado de mineral y *pebbles* presenta un consumo específico de energía significativamente menor que el de la molienda (SAG y bolas).

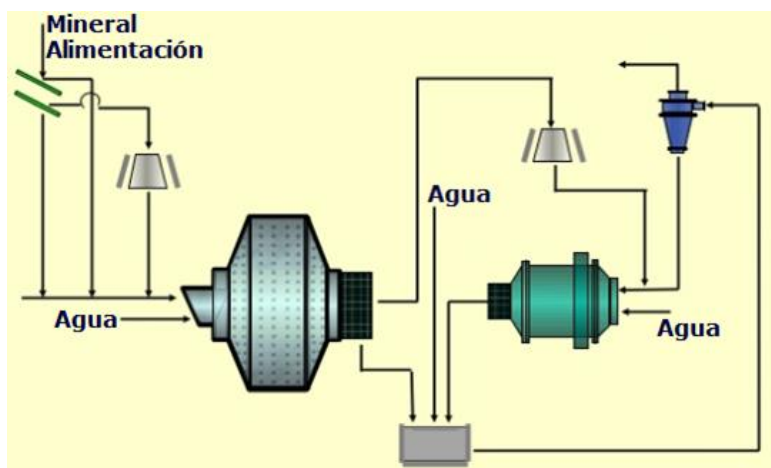


Figura 17. Molienda en dos etapas con chancado de pebbles y prechancado (SABC-B) ^[3]

2.3.2 Demanda de Potencia del Molino

Dada la importancia del consumo específico de energía en el análisis de la molienda SAG, se hace necesario estimar la demanda de potencia del molino en función de otras variables de operación ^[7]. La Potencia Demandada puede ser calculada a partir de:

$$P = \text{Torque} \times \text{Velocidad de Rotación} \quad (16)$$

En la Figura 18 se ilustra esquemáticamente un molino de diámetro interno D rotando a N rpm, en el centro de gravedad de la carga W se ubica a una distancia c del eje central del molino. En estado estacionario el nivel de la carga permanece inclinado con respecto a la horizontal en ángulo α .

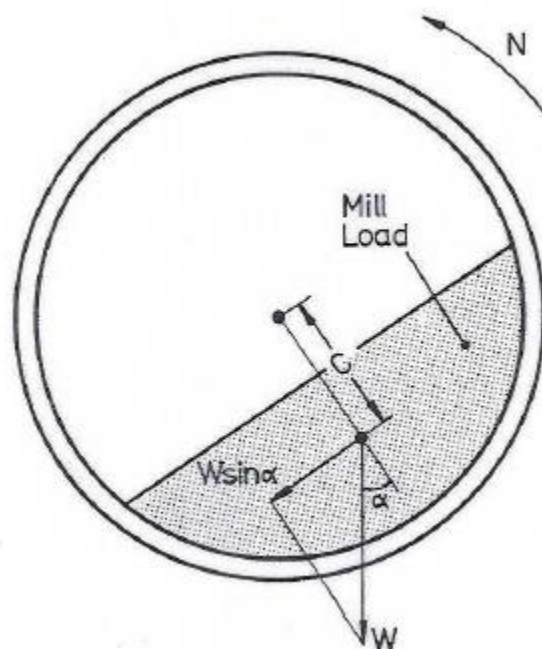


Figura 18. Representación esquemática de la carga del Molino para calcular el Consumo Teórico de Potencia ^[7]

Para la situación idealizada de la Figura 18 se obtiene:

$$\text{Torque} = W \text{sen}(\alpha) \cdot c \quad (17)$$

donde el producto $W \text{sen}(\alpha)$ representa la componente del peso de la carga de bolas contra la dirección de rotación. Por lo tanto:

$$P = 2\pi c N \cdot W \text{sen}(\alpha) \quad (18)$$

Además, el centro de gravedad puede ser definido como:

$$W = \rho_{ap} f \cdot \left(\frac{\pi}{4} D^2 L\right) \quad (19)$$

donde ρ_{ap} es la densidad aparente de la carga, f la fracción aparente de carga y L el largo interior del molino.

Por otra parte, suponiendo que la carga es homogénea en toda su extensión, un análisis trigonométrico de la sección transversal presentada en la Figura 18 permite la estimación de la siguiente relación aproximada:

$$\frac{c}{D} \simeq 0.447 - 0.476 f \quad (20)$$

Al mismo tiempo, la velocidad de rotación N puede definirse como una fracción N_c de la velocidad crítica de centrifugación de la carga:

$$N_{crit} = 76.6/\sqrt{D} \quad (21)$$

De modo que:

$$N = N_c \frac{76.6}{\sqrt{D}} \quad (22)$$

Finalmente, sustituyendo las Ecuaciones 19, 20 y 22 en la Ecuación 18, se obtiene:

$$P = 0.238D^{3.5} \left(\frac{L}{F}\right) N_c \rho_{ap} (f - 1.065f^2) \sin(\alpha) \quad (23)$$

donde P (kW) es la potencia neta demandada por el molino, D (pies) el diámetro interior del molino, L (pies) el largo interior efectivo del molino, N_c la velocidad de rotación expresada como fracción de la velocidad crítica, ρ_{ap} (ton/m³) la densidad aparente de la carga, f el nivel fraccional aparente de llenado y α el ángulo de levante [7].

2.3.3 Movimiento de Carga

El movimiento de la carga de un molino SAG se caracteriza por una acción de volteo [4]. En la Figura 19 se puede ver que gracias a la acción de giro del molino en sentido reloj la carga asciende por el lado izquierdo hasta un punto en que vuelve a caer nuevamente. Dependiendo de la velocidad de giro y la posición de la bola durante el ascenso, la caída puede ocurrir por caída en cascada en donde los medios de molienda caen rodando por la superficie de los otros cuerpos o caída en catarata que es la caída libre de los medios de molienda sobre el pie de la carga.

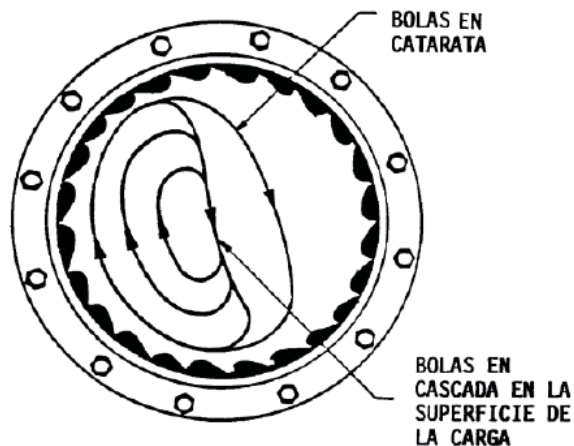


Figura 19. Movimiento de la carga en un molino rotatorio ^[1]

Para que la carga no se resbale, el revestimiento interior del molino se diseña provisto de resaltes (elevadores) o depresiones que evitan que la superficie de contacto sea geoméricamente lisa. La forma de los elevadores tiene una influencia sumamente importante en el movimiento de la carga.

2.3.4 Nivel de Carga Total

Se define como la fracción del volumen efectivo del Molino que es ocupado por la carga interna. En los molinos semiatógenos, el nivel de llenado de carga total está formado por los medios de molienda metálicos (bolas) y el mineral de tamaño grueso (colpas) e intermedios, se considera que el mineral fino y el agua se aloja en los intersticios de las bolas y colpas, siendo un aporte insignificativo en el nivel de carga ^[5].

La fracción del volumen del molino ocupado por bolas J_b se define como:

$$J_b = \frac{m_b / \rho_b}{V_M} \quad (24)$$

donde m_b es la masa de las bolas en el molino, ρ_b es la densidad de las bolas y V_M es el volumen eficiente del molino. Mientras que la fracción del volumen del molino J_m ocupado por el mineral se define:

$$J_m = \frac{m_m / \rho_m}{V_b} \cdot \frac{1}{\varphi} \quad (25)$$

donde m_m es la masa del mineral en el molino, ρ_m es la densidad del mineral, V_b es el volumen de las bolas en el molino y φ es el espacio intersticial.

Entonces, el Nivel de Carga Total o Nivel de Llenado J_c queda definido como:

$$J_c = J_b + J_m = \frac{m_b / \rho_b}{V_M} + \frac{m_m / \rho_m}{V_b} \cdot \frac{1}{\varphi} \quad (26)$$

2.4 Factores que Influyen en La Operación de un Molino SAG

2.4.1 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. A su vez, el movimiento de carga en el molino dependerá del nivel de llenado de este. Si se alimenta poca carga se pierde capacidad de molienda y se gasta inútilmente bolas y revestimiento, por otra parte, si se alimenta demasiada carga se sobrecarga el molino se pierde capacidad de molienda (tonelaje), estos efectos se ilustran en la Figura 20.

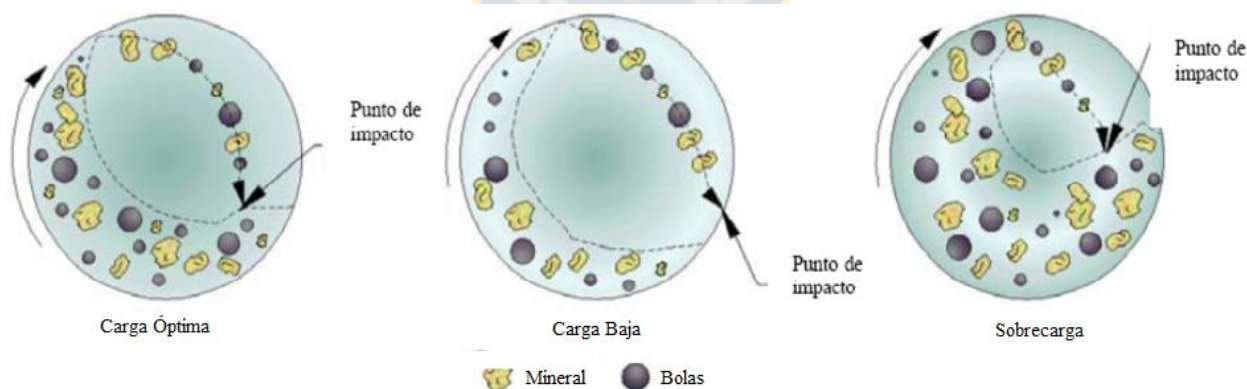


Figura 20. Movimiento de carga para diferentes niveles de carga

Por otra parte, el flujo de alimentación tiene un efecto directo en la potencia. En la Figura 21 se ve que a medida que el flujo de alimentación aumenta, la potencia consumida se incrementa hasta llegar a un valor máximo en donde se puede operar en forma estable.

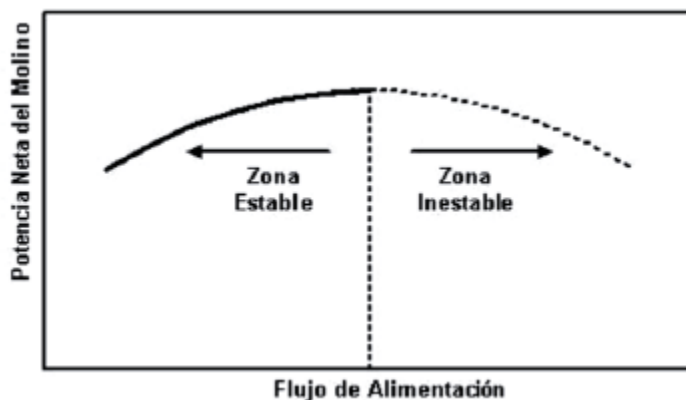


Figura 21. Zonas de operación de un molino

Al aumentar el flujo de alimentación el molino comienza acumular carga y lógicamente la potencia tomada por el motor aumenta. Sin embargo, se llega a una situación tal que cualquier aumento adicional en el flujo de alimentación produce un desbalance en la carga interna del molino, de modo que la velocidad a la que se reduce de tamaño el mineral no logra mantener el molino en equilibrio.

2.4.2 Distribución Granulométrica de Alimentación

Una de las principales características de la molienda semiautógena es el empleo del mineral como medio de molienda y, al mismo tiempo, como medio sometido a la molienda, es por esto que la distribución de tamaños en la alimentación del molino es de gran importancia. Los tamaños mayores son considerados esenciales para producir la fractura de tamaños pequeños y una falta (o ausencia) de estos puede resultar en la acumulación de partículas intermedias, consideradas de tamaño crítico o *pebbles*.

A su vez, diferentes estudios a nivel industrial han demostrado que el consumo específico de energía de un molino SAG es una función entre la unidad geológica y la fracción de partículas bajo un tamaño determinado en el mineral alimentado. Al mismo tiempo, un bajo consumo específico de energía impacta de manera positiva en la capacidad de procesamiento de los molinos SAG, esta relación se demuestra con la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento Horario (t/h)} = \sum_i \left(\frac{P}{CEE_i} \right) \cdot UG_i(\%) \quad (27)$$

donde P es la potencia en kW, CEE el consumo específico de energía en kWh/t y UG la unidad geológica, con i = dura, intermedia, blanda, ultra blanda.

De esta forma, se puede decir que la granulometría de alimentación tiene un efecto relevante sobre la capacidad de procesamiento de un molino SAG, siendo incluso más importante que el concepto de dureza del mineral.

Cabe destacar que el chancado de mineral y de *pebbles* presentan un consumo específico de energía promedio significativamente menor que el de la molienda SAG y la molienda convencional, dando pie a la estrategia utilizada por algunas concentradoras que han incluido un pre-chancado en el circuito de molienda SAG.

2.4.3 Dureza del Mineral

La dureza del mineral que ingresa al molino es una variable sobre la que el operador no tiene control alguno, ya que es una propiedad intrínseca del mineral. Mientras mayor sea la dureza mayor será el tiempo que tomará su reducción de tamaño, por esto, para un flujo de alimentación constante el volumen de la carga aumentará al aumentar la dureza del mineral ^[4]. En este caso, si el molino está siendo operado con un flujo de alimentación menor 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. Sin embargo, si el molino está siendo operado a su máxima capacidad, un aumento de la dureza provocará un sobrellenado que sólo podrá ser compensado con una disminución del flujo de alimentación. Cuando no existen problemas de segregación del mineral de alimentación, las variaciones en la granulometría pueden considerarse indicadoras de la dureza relativa del mineral, correspondiendo al mineral más duro una granulometría con mayor proporción de gruesos.

Cabe mencionar que en un molino SAG la dureza del mineral no es una variable que cumpla un rol tan importante en la capacidad de procesamiento, como en el caso de molinos de bolas. Para la molienda convencional, el Índice de dureza de Bond (Work Index) permite estimar de forma sencilla las variaciones en la capacidad procesamiento, dependiendo de la dureza del mineral de alimentación. Sin embargo, no es válido utilizar este índice para la molienda semiautógena.

2.4.4 Nivel de Llenado de Bolas

El nivel de llenado de las bolas en un molino SAG es uno de los factores que tiene mayor efecto en sus características de operación y corresponde a la fracción del molino ocupado por la carga de bolas, definida en la Ecuación 24.

Se pueden describir dos casos extremos para los cuales se hace necesario agregar bolas a un molino SAG:

- Cuando existe una excesiva acumulación del mineral fino e intermedio, debido a la falta de rocas grandes en la alimentación al molino (lo que impide formar una carga apta para fracturar estas partículas). En este caso, se debe utilizar una pequeña fracción de bolas de tamaño pequeño (3,5 a 4").
- Cuando existe una acumulación de colpas grandes al interior del equipo, debido a la incapacidad de la carga para romper estos tamaños. En este caso, se aconsejan tamaños mayores (5") y fracciones de llenado de bolas altos sobre 12%.

Por otra parte, la cantidad de medios de molienda en la carga interna afecta directamente la densidad aparente de esta. Así, una mayor cantidad de medios de molienda permite obtener mayores potencias en el molino y esto implica un aumento en la capacidad de procesamiento de mineral.

Un aumento de bolas en el molino, para un nivel de llenado constante, implica un aumento de la potencia, siendo una relación entre ambos directamente proporcional. Es por esto que se recomienda una carga máxima de bolas ente un 12 a 14% del volumen del molino, debido por el desgaste excesivo de las bolas y levantadores, y por problemas mecánicos al usar cargas mayores. A pesar de esto, la experiencia nos dice que cada vez son más los molinos SAG que sobrepasan el 14% recomendado, tal es el caso de Candelaria, donde la molienda semiautógena funciona con J_b de 17% aproximadamente.

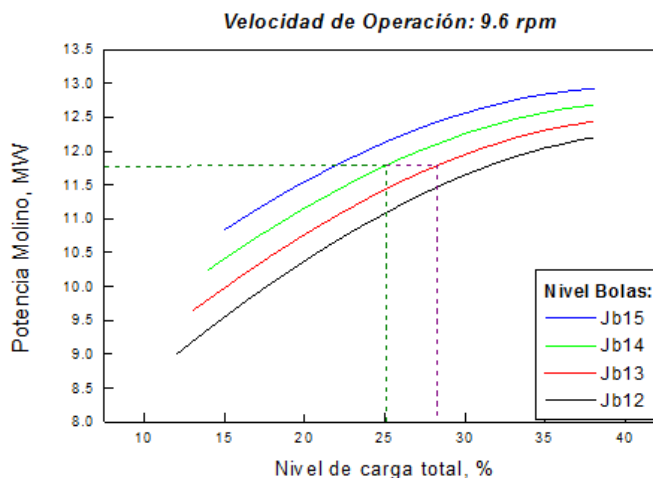


Figura 22. Curvas de Potencia SAG, para diferentes niveles de carga y de bolas ^[5]

En la Figura 22 se muestran las curvas de potencia de un molino SAG, en función del nivel de llenado volumétrico total, para diferentes niveles de llenado de medios de molienda y una velocidad definida de operación. Se ve que un mismo valor de potencia corresponde a diferentes niveles de llenado total del molino, dependiendo del nivel de llenado de bolas con que se esté operando y de la velocidad de rotación del molino.

2.4.5 Tamaño de los Medios de Molienda

En la selección del medio de molienda se involucran muchos factores, tales como la dureza del mineral, el tamaño de la alimentación, el tamaño del producto, la densidad y el nivel de la pulpa, el tamaño del molino, la velocidad del molino y el tonelaje alimentado. La selección del medio de molienda es importante pues es uno de los costos más altos.

El uso de bolas de tamaño pequeño es por lo general preferible debido a que significa una mayor relación de área superficial por peso y, a mayor área mayor será la molienda por fricción. El desgaste de los levantadores también disminuye al disminuir el tamaño de la bola. Sin embargo, existe un límite para disminuir el tamaño del medio de molienda pues el mineral más grande y más duro requiere de un medio de mayor tamaño para ser molidos. Por otra parte, entre menor sea el tamaño del medio, es más costoso por unidad de peso y es más rápidamente eliminado por el molino ^[9].

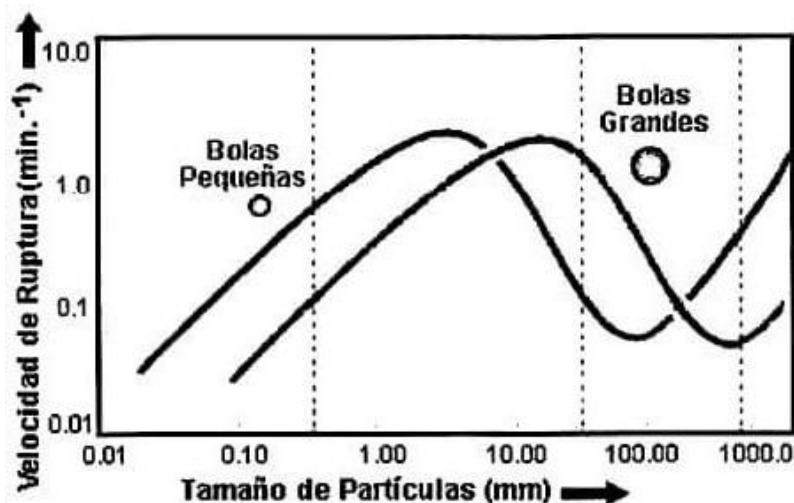


Figura 23. Velocidad de Ruptura en Función del Tamaño de Bola ^[9]

En la Figura 23 se puede ver el efecto del tamaño de partícula en la velocidad de ruptura de los distintos tamaños de partículas en un molino SAG. Con bolas más pequeñas la velocidad de ruptura aumenta para tamaños pequeños, de manera análoga bolas grandes muelen más rápido partículas grandes.

2.4.6 Parrillas de Descarga

Los molinos SAG se caracterizan por el uso de una parrilla de descarga, que retiene al interior del equipo los medios de molienda (colpas y medios metálicos). Gracias a éstas, el mineral alimentado al molino sólo puede ser descargado una vez que su tamaño se ha reducido a uno menor que la abertura de parrillas, por esto se considera que actúan como un clasificador de material. Actualmente existen molinos que operan con abertura de $\frac{1}{2}$ a 3" y con configuraciones distintas.

El diseño de la parrilla de descarga es inicialmente elegido por el fabricante del molino, que considera la capacidad de procesamiento para el que fue diseñado. Posteriormente, en la planta se realizan modificaciones orientadas principalmente a reforzar zonas que sufren mayor desgaste o incluso fractura. La Figura 24 muestra una curva típica de variación de parrillas de descarga.

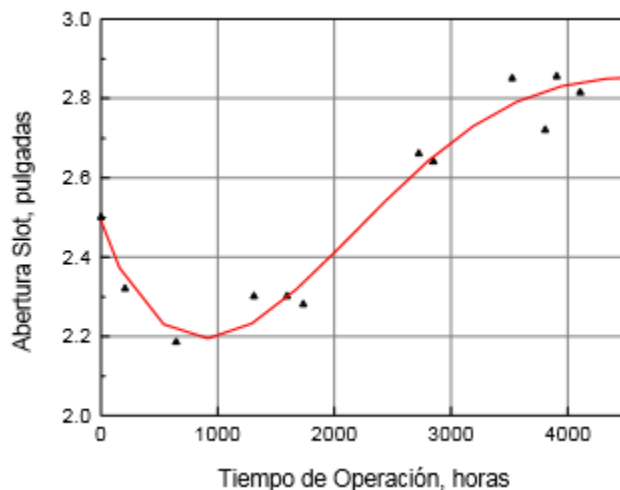


Figura 24. Variación de abertura de parrilla en una campaña de revestimiento SAG ^[5]

En el comienzo de una campaña de revestimiento, las parrillas recién instaladas generan una reducción del flujo que pasa a través de ellas, debido a la abertura de estas. Posteriormente, se debe al desgaste abrasivo que provoca la pulpa, la abertura efectiva de la parrilla comienza a aumentar.

La tendencia inicial en una planta es aumentar la abertura de las parrillas para aumentar la capacidad de evacuación y así aumentar la tasa de procesamiento de mineral (Figura 25). Sin embargo, si se disminuye la granulometría de alimentación, lo aconsejable es disminuir la abertura de las parrillas.

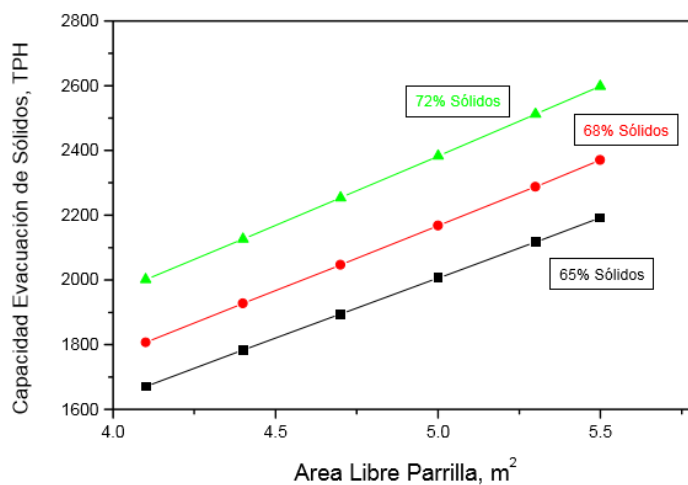


Figura 25. Capacidad de evacuación según abertura de parrillas ^[5]

CAPÍTULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para predecir el impacto de la instalación de una planta de pre-chancado en la operación de la Molienda SAG. En primer lugar se describe y justifica la implementación de *Candelaria Consolidation Projects* (proyecto que contempla la instalación del pre-chancado) y se detallan los datos utilizados y la forma en que estos fueron manipulados. Posteriormente se describen los *softwares* y procedimientos que permitieron la obtención de parámetros y simulaciones de la molienda semiautógena.

3.1 Modelo de Producción Minera Candelaria

Utilizando los Datos Históricos de la planta, se realizaron dos gráficos para visualizar el efecto del rendimiento horario y la ley de mena en la producción de cobre fino, desde año 2000 a la fecha. En la Figura 26 se ve que a pesar de que ha aumentado cerca de un 30% el rendimiento horario, existe una tendencia negativa en cuanto a la producción de cobre. Esto se puede explicar con la Figura 27 donde se aprecia la estrecha relación que existe entre la disminución histórica en la ley de mena y en la producción de cobre fino.

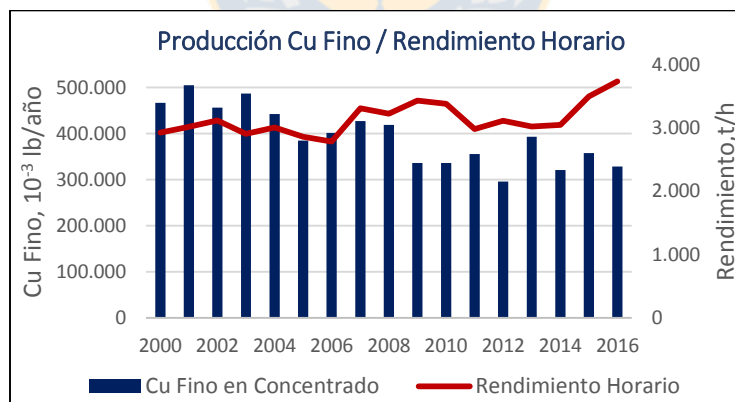


Figura 26. Histórico de Producción de Finos de cobre y Rendimiento Horario, Minera Candelaria

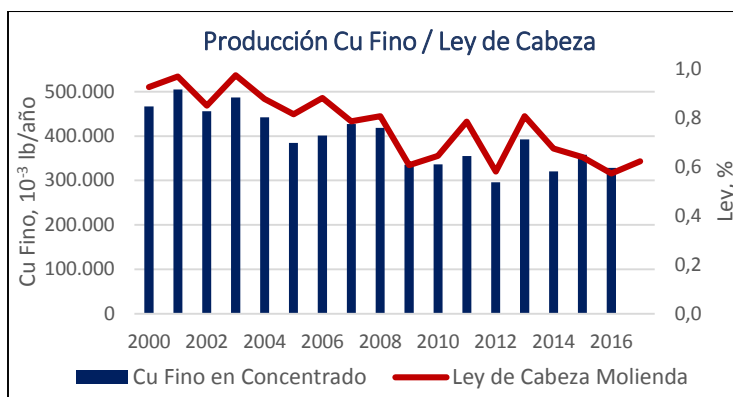


Figura 27. Histórico de Producción de Finos de cobre y Ley de Cabeza, Minera Candelaria

Como la ley del mineral es una variable que no depende de la operación y por ende no puede manipularse, la única solución para - al menos - mantener la producción de Cobre es seguir generando proyectos que aumenten el Rendimiento de la Planta.

3.1.1 Proyección Producción

En la Tabla 1 se muestra la estimación de distintos factores que, bajo el modelo de producción de Minera Candelaria, permitieron realizar una Proyección a cinco años de la Producción de Libras de Cobre Vendibles.

Tabla 1. Proyección Anual de Libras de Cu Vendibles, Minera Candelaria.

	2018	2019	2020	2021	2022
Días/año	365	365	366	365	365
Rendimiento Diario, t/día	78.331	75.202	80.040	80.421	77.776
Total Chancado/Molido Anual, kt	28.591	27.449	29.295	29.354	28.388
Ley Cu Molienda	0,544%	0,545%	0,581%	0,603%	0,662%
Recuperación Cu Planta	91,83%	92,80%	94,37%	94,16%	94,32%
Pérdidas por Transporte (PPT)	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Producción Bruta Cu, ×10⁻³ lb	314.077	305.332	353.284	366.820	389.753
Recup. Fundición/Recuperación	96,5%	96,5%	96,5%	96,5%	96,5%
Producción Cu Vendible, ×10⁻³ lb	303.084	294.645	340.919	353.981	376.111

A continuación se detallan las ecuaciones utilizadas para realizar esta proyección.

$$Total\ Chancado/Molido\ (kt) = Rendimiento\ \left(\frac{t}{día}\right) \times \frac{días}{año} \quad (28)$$

De la Ecuación 28 se obtuvieron las toneladas de mineral chancado y molido por año:

$$\begin{aligned} Prod\ Bruta\ Cu\ ('000\ lbs) \\ = 2204.6 \frac{lbs}{t} \times Tot\ Ch/Mol\ (Kt) \times \%Ley\ Cu \times \%Rec \times (1 - PPT) \end{aligned} \quad (29)$$

Con la Ecuación 29 se calculó la Producción de Cobre Contenido Anual (en libras), esta ecuación incluye la conversión de libras a toneladas, la Ley de mineral, el porcentaje de Recuperación de la planta y las Pérdidas por transporte (que significan un 0,2% anual).

$$Producción\ Cu\ Vendible\ ('000\ lbs) = Prod\ Bruta\ Cu \times \%Recup.\ Fund/Recup \quad (30)$$

Finalmente, la Ecuación 30 corresponde a la Producción de Cobre Vendible que, a diferencia de la producción de cobre bruta, considera el porcentaje de recuperación estimado en los procesos posteriores de Fundición y Refinación.

3.2 Candelaria Consolidation Project

Candelaria Consolidation Project (CCP) surge de la necesidad de revertir la baja en la producción de cobre fino, debido a condiciones desfavorables no manipulables como alta dureza de mineral y bajas leyes de mena.

Este proyecto consiste en la instalación de una planta de pre-chancado, posterior al chancado primario y previo a la alimentación de los molinos SAG. Con el pre-chancado aumentaría el porcentaje de finos en la alimentación de los molinos SAG y por ende disminuiría el Consumo Específico de Energía de los SAG. Esto significaría un incremento en el rendimiento horario de la planta y una amortiguación en la disminución histórica de producción de cobre fino. El funcionamiento de este equipo está considerado sólo cuando el Rendimiento de los SAG sea bajo (menor a 1700 t/h aproximadamente).

Los resultados esperados con este proyecto se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de Candelaria Consolidation Project Esperados.

Parámetro	Variación Esperada
Potencia, kW	-
CEE, kWh/t	- 15%
Finos, % -1"	+ 10%
Rendimiento, t/h	+ 15%

3.2.1 Flowsheet CCP

Se diseñó un *flowsheet* que corresponde al proyecto CCP (Figura 28), aquí se muestra que el pre-chancado es de carácter parcial, es decir, sólo una fracción del mineral es pre-chancado.

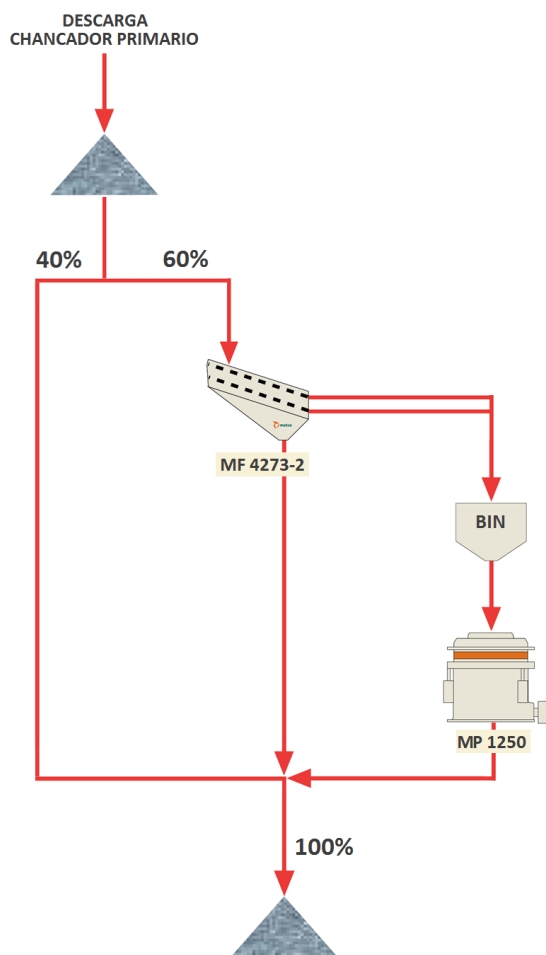


Figura 28. Flowsheet Candelaria Consolidation Project

El material proveniente del chancador primario y descargado en una primera pila de almacenamiento es fraccionado en dos flujos; un 40% pasa directo a un Segundo Stock Pile y el otro 60% alimenta al harnero de doble bandeja MF 4273-2, éste a su vez clasifica el mineral descargando los tamaños menores a 2" (50mm) en una segunda pila de almacenamiento y los tamaños mayores a 2" en el pre-chancado, el cual tiene un *setting* (CSS) de 2".

Las características de los equipos principales, Harnero MF 4273-2 y Chancador MP 1250 (pre-chancado) se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de Principales Equipos CCP.

HARNERO		CHANCADOR	
Modelo	MF 4273-2	Modelo	MP 1250
D50	2" (50 mm)	Setting	2" (50 mm)
Eficiencia	93%	Potencia	1250 HP
Dimensiones	14' x 24'		

En la Figura 29 se muestran los perfiles granulométricos de descarga para un chancador MP 1250, obtenidos del catálogo de Metso Minerals, para distintos *settings* del equipo que van desde los 10 hasta los 50 mm.

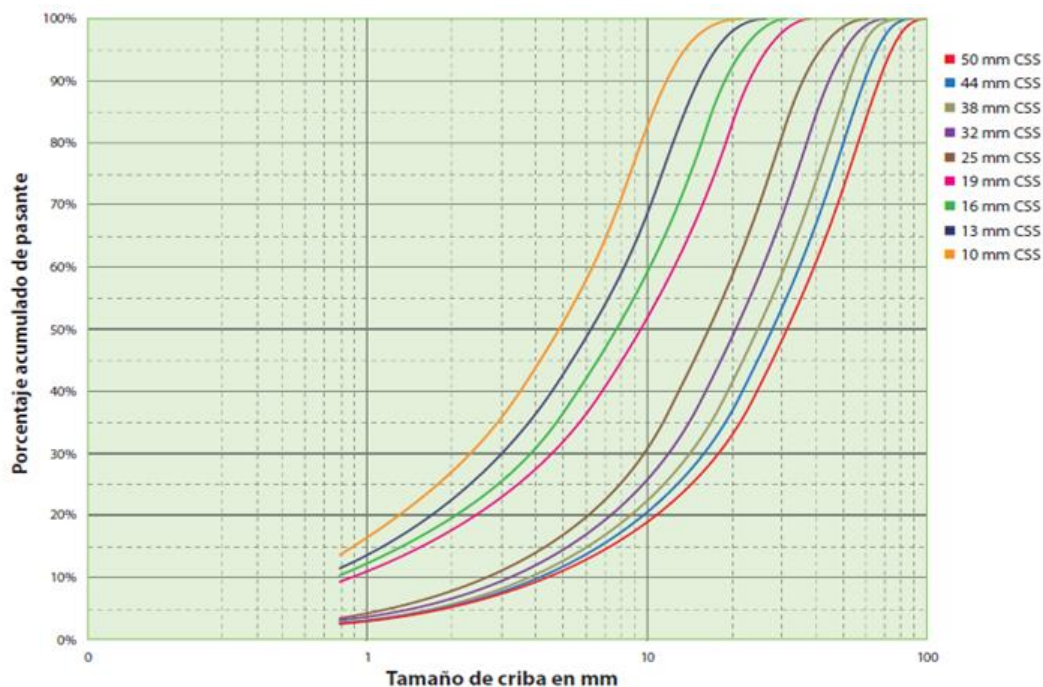


Figura 29. Perfiles Granulométricos Chancador MP 1250 para distintos settings

Para esta memoria efectuaron simulaciones del circuito pre-chacando para un MP 12500 con 50 mm de *setting*, que corresponde a lo estipulado por el proyecto CCP, además de simulaciones con 44 y 60 mm que sirvieron para comparar el efecto del *setting*.

3.3 Caracterización Muestreos

Se utilizaron los datos obtenidos a partir de muestreos ejecutados en los años 2011 y 2015 para la obtención de los Parámetros de Molienda SAG y posterior comparación.

En el Anexo B se adjunta el Manual de Procedimiento para Muestreos en las correas 2 y 3, que corresponden a la descarga del chancador primario y la alimentación a los molinos SAG respectivamente.

3.3.1 Condiciones Operacionales

Los Muestreos 2011 y 2015 fueron escogidos porque permiten hacer una comparación del efecto de distintos tamaños de bola para un SAG. Ésta y otras condiciones operacionales medidas al momento de cada muestreo se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones Operacionales, Muestreos 2011 y 2015.

Fecha Muestreo	7/10/2011	28/10/2015
Nivel de Llenado, %Jc	31.15	26.3
Nivel de Bola, %Jb	16.4	18.1
Diámetro de Bola, pulg	6.25	5.5
Potencia, kW	12264	13122
Velocidad, rpm	9.7	9.8
Densidad de bola, ton/m ³	7.75	7.75
Densidad mineral, ton/m ³	2.88	2.8
Abertura Parrilla, pulg	3.25	3.5
Diámetro útil, pies	35	34.4
Largo útil, pies	15	15

El diámetro de bola, la densidad de bola, la abertura de parrilla y el largo útil del molino corresponden a valores predeterminados por planificación, mientras que el nivel de llenado, nivel de bola, potencia y velocidad del molino son variables medidas en el momento mismo del muestreo.

El diámetro útil se calculó a partir del porcentaje de desgaste del revestimiento del SAG, considerando un diámetro nominal de 36' y un revestimiento de 260 mm de espesor inicial. Para el muestreo del 2011 el revestimiento SAG contaba con un 42.86% de desgaste y para el muestro del 2015 con un desgaste del 3,87%.

3.3.2 Balance de Masa

Candelaria cuenta con el *software* **PI DataLink** que es un complemento para Microsoft Excel y que permite recuperar información en tiempo real y para cualquier intervalo de tiempo, desde una planilla PI Server (ver Anexo C) directamente a una hoja de cálculo. PI entrega información para determinados flujos del proceso, como flujo (t/h) y porcentaje de sólidos, para los molinos SAG PI proporciona los flujos de la alimentación y del sobretamaño del harnero.

En la Tabla 5 se muestran los flujos de alimentación, descarga, sobretamaño harnero y bajotamaño harnero definidos para los muestreos 2011 y 2015 del SAG-1.

Tabla 5. Flujos Alimentación y Descarga del SAG-1 para los Muestreos 2011 y 2015.

Flujo	Muestreo 2011	Muestreo 2015
Alimentación, t/h	1653.90	2245.80
Sobretamaño Harnero, t/h	328.05	259.32
Bajotamaño Harnero, t/h	1325.86	1986.48
Descarga, t/h	1653.90	2245.80

Para la determinación de los flujos de alimentación SAG y sobretamaño de harnero SAG, se promediaron los flujos de las dos horas previas a cada muestreo, con un intervalo de 15 minutos entre cada dato (Ver Anexo D). Para obtener el flujo del bajotamaño del harnero, se realizó una diferencia entre la alimentación al molino y el sobretamaño del harnero. El flujo de descarga del molino corresponde a la suma del bajotamaño y sobretamaño del harnero y coincide con el flujo de alimentación al molino.

3.3.3 Perfiles Granulométricos

Las Figuras 30 y 31 corresponden a los Perfiles Granulométricos, en porcentaje de pasante acumulado, de alimentación y descarga (completa) del SAG-1 para los muestreos 2011 y 2015 respectivamente. El detalle de la distribución granulométrica de estos perfiles se tabula en el Anexo E.

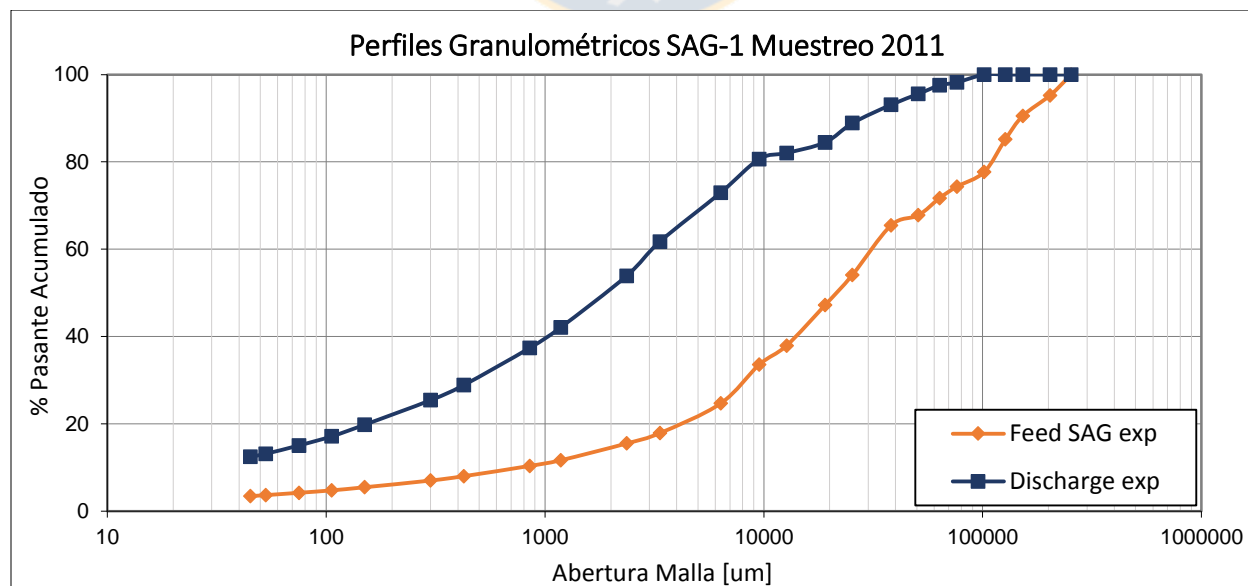


Figura 30. Perfil granulométrico de alimentación y descarga SAG-1, Muestreo 2011

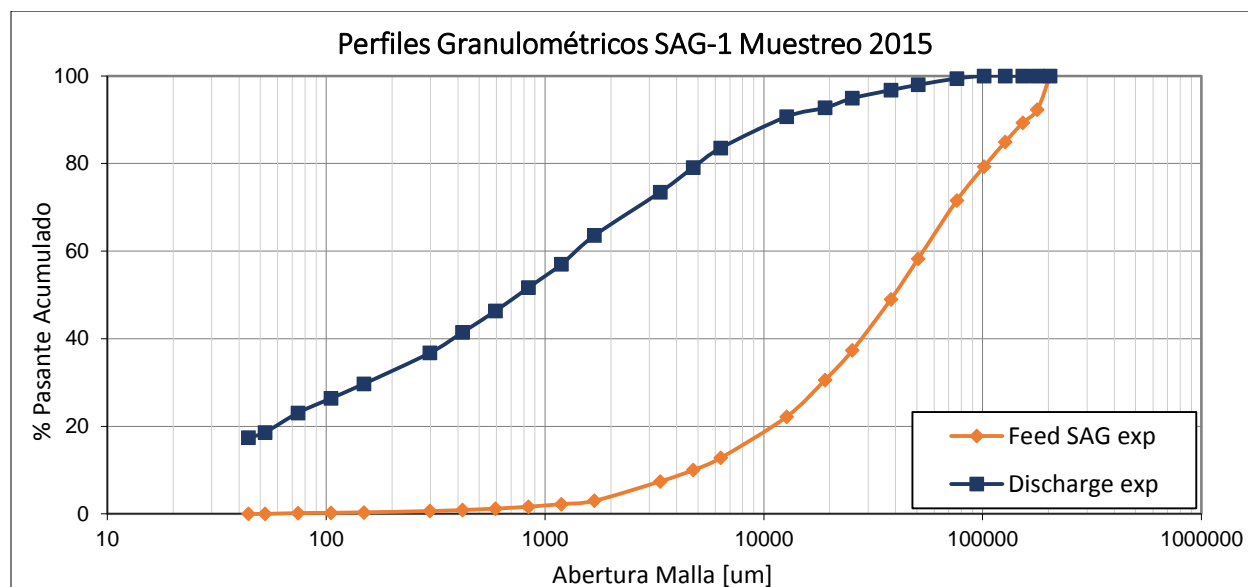


Figura 31. Perfil granulométrico de alimentación y descarga SAG-1, Muestreo 2015

Los perfiles granulométricos de alimentación se construyeron con los datos de distribución granulométrica obtenidos de los informes de cada muestreo.

Mientras que los perfiles granulométricos de descarga se construyeron con la Planilla **Mixer** de Moly-Cop Tools (ver ANEXO F), donde se ponderó la distribución granulométrica del sobretamaño y del bajotamaño del harnero del SAG-1, obtenidos desde el informe de cada muestreo, y los flujos de masa obtenidos en el balance con datos PI.

Para los perfiles de ambos muestreos se eliminaron tres puntos, que no significaran modificaciones en la forma de las curvas, para que el número de mallas del informe coincidiera con el establecido por las planillas de Moly-Cop Tools.

3.4 Estimación de Parámetros de la molienda SAG

Se describe a continuación el procedimiento realizado para la obtención de los parámetros de la Función Selección Específica de Molienda SAG, descrita en la Sección 2.2.3.4, a través del simulador **Moly-Cop Tools**.

El archivo **SAGParam_Open** de Moly-Cop Tools permite la estimación de Parámetros de Molienda SAG a partir de información de Planta ^[8], por medio de un algoritmo en base a un

criterio de mínimos cuadrados no lineales que proporcionan las diez hojas de cálculo adjuntas. De esta forma, permite calcular condiciones de operación del SAG, obtener la Función Selección Específica y la Función Fractura.

En la hoja **Data_File** se ingresaron los datos de la geometría del molino y condiciones operaciones del muestreo (Tabla 4), además de los perfiles granulométricos obtenidos (ver Anexo E), a partir de los cuales se obtuvieron datos como la velocidad crítica (%), la densidad de la pulpa (t/m^3) y el Consumo de Energía (kWh/t).

En la hoja **Control_Panel** se ingresaron valores tentativos para los parámetros las funciones Selección Específica y Fractura, y a través de la herramienta **Solver** se minimizó la función Objetivo y se encontró un conjunto de valores para los Parámetros de ambas funciones que permitieran una mejor aproximación del modelo a las mediciones operacionales. Como resultado, esta hoja entregó un gráfico con los perfiles granulométricos de alimentación molino y de descarga molino (operacional y simulada), además de los Parámetros (Tabla 9, 10 y 11) y la Curva de la Función Selección Específica.

En las Figuras 32 y 33 se muestran capturas de pantalla de la hoja Control_Panel del archivo SAGParam_Open de Moly-Cop Tools, donde aparecen los parámetros y las curvas mencionadas anteriormente, para los muestreos 2011 y 2015 respectivamente.

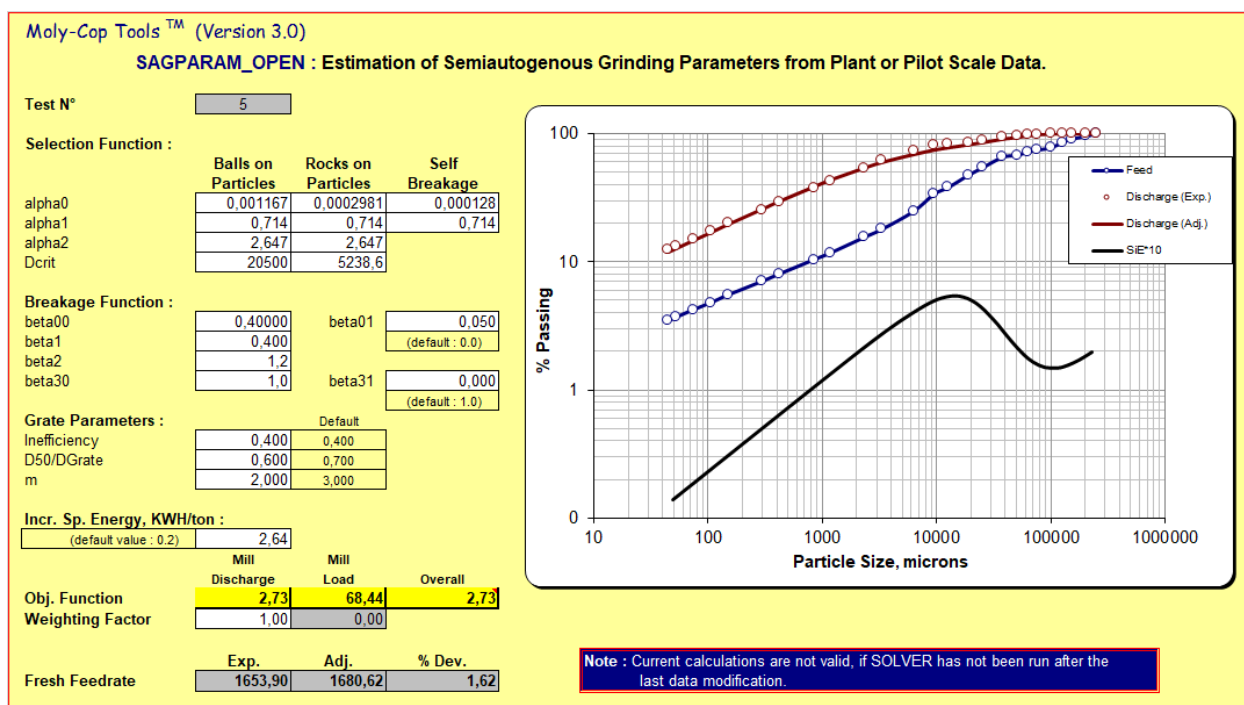


Figura 32. Estimación de Parámetros SAG a partir de datos Muestreo 2011, SAGParam Moly-Cop Tools

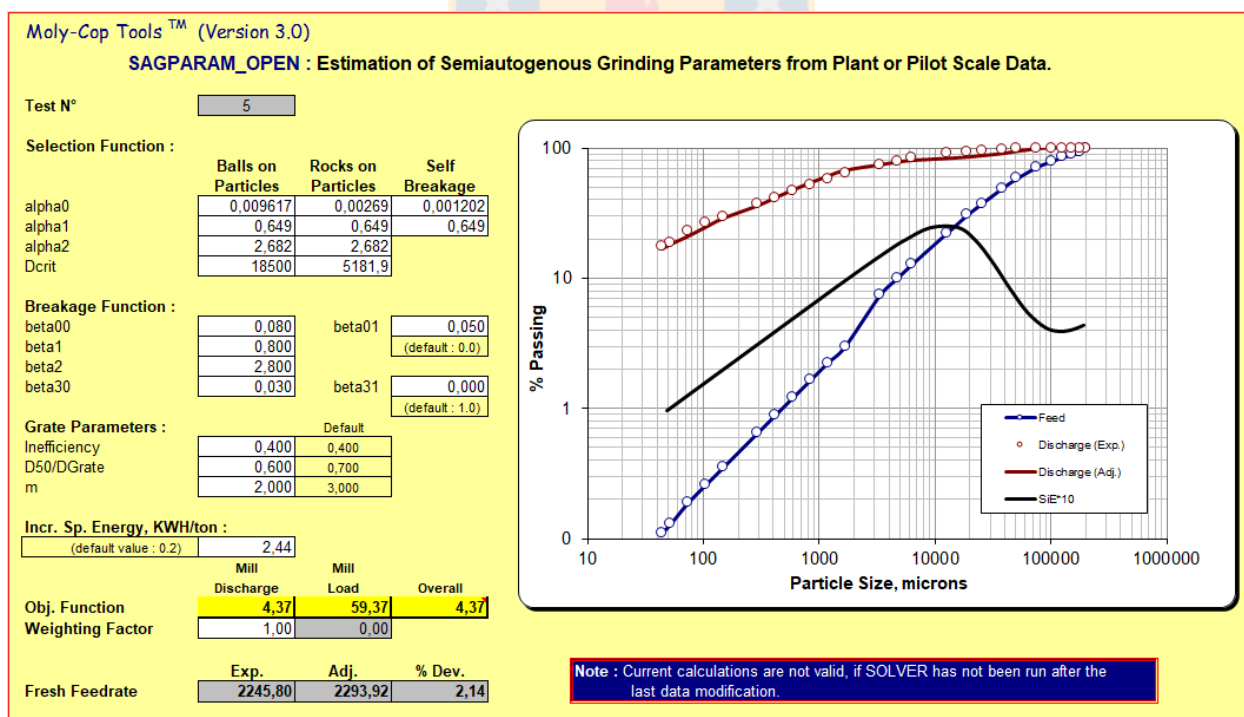


Figura 33. Estimación de Parámetros SAG a partir de datos Muestreo 2015, SAGParam Moly-Cop Tools

3.5 Simulación de Pre-chancado

Para la simulación del circuito de Pre-chancado se escogió sólo uno de los muestreos ajustados anteriormente, el criterio fue seleccionar aquel que presentara menor Rendimiento Horario y que en este caso corresponde a las condiciones modeladas del muestreo 2011, que además presenta un rendimiento inferior a 1700 t/h.

Esta simulación se realizó utilizando el *software* **JKSimMet**, ya que este simulador permite obtener un perfil granulométrico de descarga del Pre-chancado sin la necesidad de contar con un perfil de descarga operacional.

3.5.1 Parámetros de Fractura

Del Muestreo 2011 se tomaron muestras de mineral provenientes de la alimentación SAG y se enviaron a la empresa SGS Chile Limitada, donde se realizaron ensayos de dureza **JKTech Drop Weight** y se obtuvieron los **Parámetros de la Función Fractura** para un Chancador de tipo Cono, que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros Función Fractura para Chancadores, JKTech Drop Weight.

t ₁₀	Tamaño relativo al tamaño inicial			
	t ₇₅	t ₅₀	t ₂₅	t ₄
	Porcentaje acumulado pasante			
10	2.7	3.3	5.1	24.3
20	5.3	6.6	10.2	46.8
30	8.1	10.1	15.5	66.2

El parámetro t_{10} es definido como el porcentaje acumulativo que pasa un décimo del tamaño promedio geométrico, y de la partícula de prueba. Al usar t_n ($n = 10, 2, 4, 25, 50$ y 75) se puede describir la total distribución del tamaño ^[4].

El ensayo JKTech Drop Weight también proporciona información importante sobre el **Consumo Específico de Energía** requerida para una reducción de tamaño establecida. Esta energía tiene una relación lineal con el parámetro de distribución de rompimiento t_{10} , pero también depende

del tamaño de la partícula de prueba. En la Tabla 7 se tabulan los parámetros de CEE para chancadores, obtenidos con el ensayo JKTech Drop Weight.

Tabla 7. Parámetros de Consumo Específico de Energía para Chancadores, JKTech Drop Weight.

t10	Tamaño de Partícula (mm)				
	14.53	20.63	28.89	41.08	57.78
	Consumo Específico de Energía (kWh/t)				
10	0.56	0.47	0.45	0.26	0.26
20	1.19	1.00	0.95	0.60	0.55
30	1.91	1.59	1.52	1.10	0.87

3.5.2 Equipos y Flujos

Se dibujó el *flowsheet* del circuito de pre-chancado (Figura 28) en JKSimMet, para esto se seleccionaron los equipos necesarios, señalados en la Tabla 8, y se conectaron sus puertos de alimentación y producto a través de líneas que representan los flujos de material entre los equipos. Al igual que para cualquier simulación, fue de suma importancia incluir (al menos) un alimentador, puesto que este “equipo” es el que hace el ingreso de material en el circuito.

Tabla 8. Equipos circuito de Pre-chancado, JKSimMet.

Equipo	Modelo	Nombre
Feed	-	Feed
Stockpile	Simple Combiner	Stockpile 1
2 Product Splitter	Simple 2-Way Splitter	Splitter
Single Deck Screen	Single Component Efficiency Curve	MF 4273-2
Bin	Simple Combiner	Bin
Cone Crushers	Crusher (Andersen Whiten – Size Extended)	MP 1250
Stockpile	Simple Combiner	Stockpile 2

Luego, para cada equipo se seleccionó el modelo y se agregaron las **condiciones operacionales** correspondientes. En el chancador MP 1250 también se agregaron los parámetros de ruptura y de energía de las Tablas 6 y 7. En los equipos Feed, Stockpile 1, Bin y Stockpile 2 no se requiere

de la especificación de condiciones operacionales dado la sencillez de sus mecanismos de funcionamiento.

En la **Barra de Herramientas** del simulador se encuentran algunas funciones (botones) fundamentales para la simulación. Con el botón **System Properties** se ingresó la densidad del agua y del mineral muestreado. Con el botón **Series Overview** se estableció el número de mallas y la abertura de estas, se utilizaron las mismas en todos los equipos del flowsheet. Con el botón **Survey Data** se agregaron los datos de cada flujo obtenidos del muestro: porcentaje de sólido, toneladas por hora y distribución granulométrica. Los datos faltantes en algunos de los flujos se dejaron en blanco.

Una vez ingresados todos los datos disponibles se calculó para cada uno de estos la **Desviación Estándar SD**, que es una medida de dispersión y depende de la confiabilidad de cada dato.

3.5.3 Ajuste de Parámetros y Simulación

La herramienta **Model Fitting** o Ajuste de los Parámetros del Modelo permite afinar los modelos de simulación prediseñados por JKSimMet a condiciones reales de operación específicos, ajustando los parámetros del modelo seleccionado sobre la base de diferencias sistemáticas entre el conjunto de datos operacionales y los datos predichos o esperados.

En la ventana Model Fitting se seleccionaron los parámetros a ajustar, que en este caso fueron todos los datos ingresados) y se les aplicó el ajuste utilizando interpolación cúbica monótona, obteniéndose un modelo ajustado con una Desviación Estándar $\sigma = 1.92$. Este ajuste fue la base de las simulaciones siguientes.

La herramienta **Simulate** permite realizar simulaciones de un circuito de molienda en base al modelo ajustado. Al modificar cualquier variable o parámetro, ya sea de un equipo o de un flujo, se deben seleccionar los parámetros restantes del *flowsheet* y aplicar Simulate, de esta forma, JKSimMet muestra como varían los variables que dependen del parámetro modificado.

En la ventana Simulate se seleccionaron todos los equipos y flujos del flowsheet, se establecieron los datos operacionales como condición de partida y utilizando interpolación cúbica monótona

se realizó la simulación del circuito para un pre-chancado de *setting* 50 mm (2"), obteniéndose los datos faltantes y ajustándose los demás flujos para que el balance de masa sea correcto.

El *flowsheet* del Pre-chancado en JKSimMet y los resultados de la simulación se muestran a en la Figura 34. Los cuadros amarillos indican el nombre de cada equipo. Los cuadros verdes corresponden a los flujos, a la izquierda aparece el flujo en t/h y a la derecha el P80 en mm.

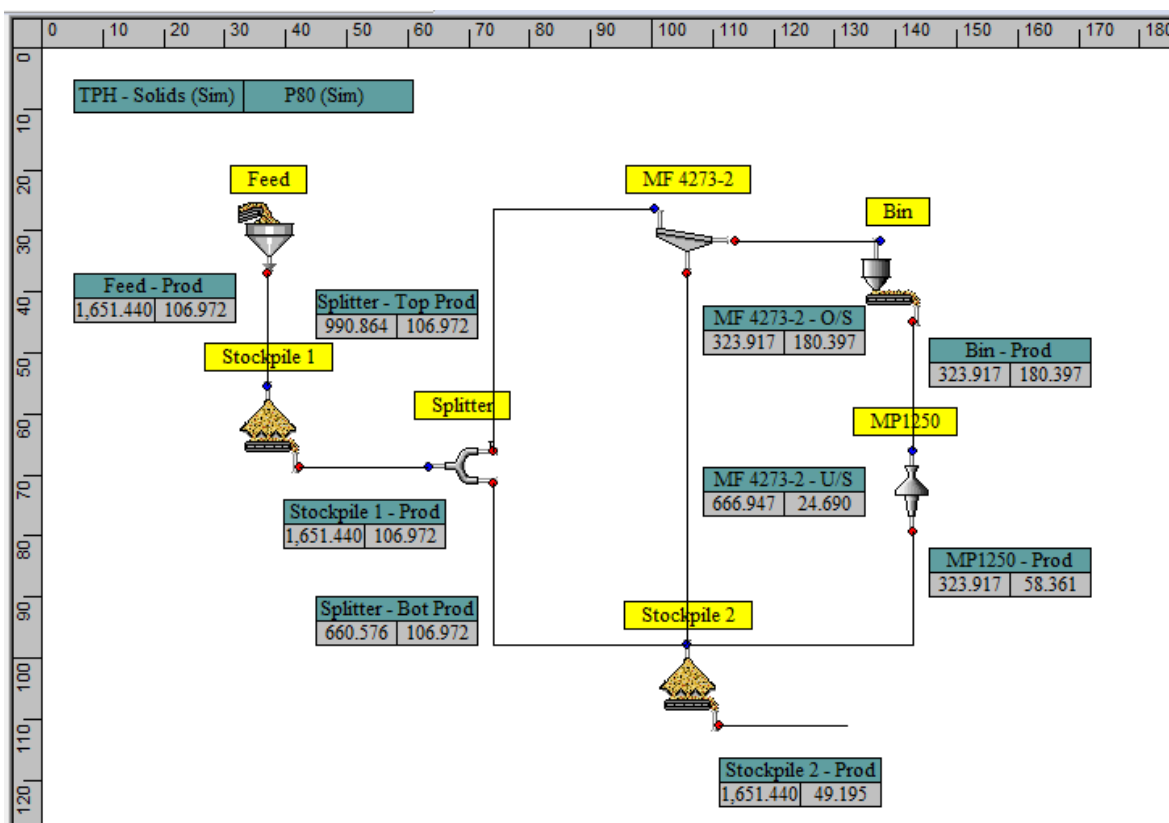


Figura 34. Simulación Circuito de Pre-chancado de CSS 50 mm, JKSimMet

También se realizaron simulaciones para el circuito con un Pre-chancado de 44 y 56 mm de *setting*.

3.6 Simulación SAG

Con la parametrización de molienda SAG (Sección 3.4) se realizaron tres simulaciones en Moly-Cop Tools, una para cada nuevo perfil de alimentación (Gráfico 6), con el fin de determinar el rendimiento horario del SAG con pre-chancado.

3.6.1 Simulación SAG con Nuevo Perfil de Alimentación

El archivo **SAGSim_Open** de Moly-Cop Tools permite simular el comportamiento de la molienda en un molino SAG, sobre la base del modelo matemático obtenido en el archivo SAGParam_Open, obteniéndose un Diagrama de Flujo del proceso y generando curvas de distribución granulométricas para la Alimentación, Carga y Descarga.

En la hoja **Data_File** se ingresaron los parámetros de la Función Selección y Función Fractura obtenidos de la parametrización (Tablas 10 y 11) y la nueva distribución granulométrica de alimentación (Gráfico 6), además de los datos de la geometría del molino y condiciones operacionales, entre otros.

La hoja **Reports** corresponde al reporte sobre desempeño y operación del molino, de aquí se obtuvo el flujo del molino, el agua requerida y la distribución de tamaños de partículas, entre otros.

La hoja **Charts** ilustra el perfil granulométrico de alimentación SAG con los datos ingresados en la hoja Data_File y como resultado de la simulación también muestra los perfiles de carga y descarga del molino.

En la hoja **Flowsheet** se muestra el diagrama de flujo del proceso, donde se detallan los principales resultados de la simulación como rendimiento horario, potencia consumida, consumo específico de energía y P80. En la Figura 35 se muestra una captura de pantalla de la hoja Flowsheet de la Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm y en el Anexo G se incluyen los *flowsheet* para SAG con pre-chancado de 44 y 56 mm de *setting*.

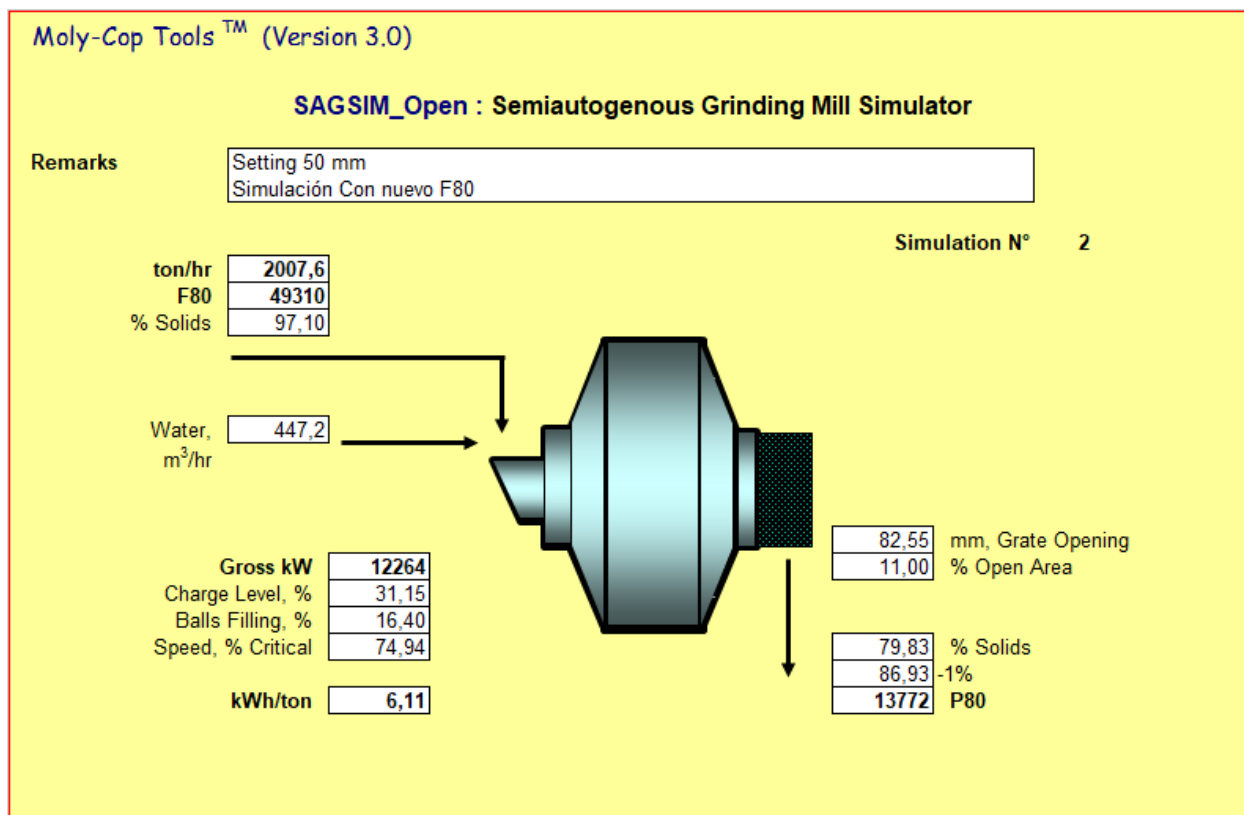


Figura 35. Flowsheet Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm, SAGSIM_Open MolyCop Tools

3.6.2 Nuevo Sobretamaño y Bajotamaño SAG

La descarga de los SAG es clasificada en los flujos por harneros de doble bandeja, el bajotamaño es dirigido hacia la molienda convencional mientras que el sobretamaño es recirculado hacia chancadores de *pebbles*. Para determinar el efecto del pre-chancado en el bajotamaño y sobretamaño se utilizó el archivo **ScreenSim_Single** de Moly-Cop Tools, que permite simular el comportamiento típico de una experiencia de tamizado vibratorio.

En la hoja **Data_File** se ingresó la distribución granulométrica de descarga SAG, el flujo de alimentación (t/h) y el tamaño de corte del harnero (12.7 mm o 0.5 pulgada). De aquí se obtuvo la distribución granulométrica del sobretamaño y bajotamaño del harnero.

En el Anexo H se incluyen las tres planillas de las simulaciones para el harnero vibratorio del SAG.

3.6.3 Optimización de Variables

A fin de aprovechar al máximo las capacidades del SAG, se buscó optimizar el nivel de carga Jc, nivel de bolas Jb y tamaño de bolas.

Para la optimización del Jc y Jb se utilizó la simulación del SAG realizada en el archivo SAGSIM_Open de Moly-Cop Tools, en la hoja Data_File se fue modificando el valor de una de estas variables mientras la otra se mantenía fija y así se obtuvieron curvas para el efecto del nivel de bola en la potencia consumida, efecto de flujo de alimentación en nivel de carga, efecto del nivel de llenado de bola en el rendimiento SAG y efecto del nivel de carga en la potencia consumida.

Por otra parte, para buscar un nuevo Diámetro de Bola óptimo para el nuevo perfil granulométrico de alimentación SAG, se compararon las curvas de la Función Selección Específica de los Muestreos 2011 y 2015, esto porque Moly-Cop Tools no permite calcular un diámetro de bola óptimo para molinos SAG, a diferencia de la molienda convencional.



CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Función Selección Específica

Según la definición de Función Selección Específica de la Sección 2.2.3.3, ésta corresponde a la fracción de un determinado tamaño de partícula presente en el molino que será fracturada durante el siguiente incremento de Energía Específica y depende principalmente de las características intrínsecas del mineral y marginalmente de las condiciones operacionales del molino. A partir de la parametrización de cada muestreo, se obtuvieron los Parámetros de Fractura (α_0 , α_1 , α_2 y d_{crit}) que definen los puntos máximos y mínimos de la curva S_i^E (Figura 9).

Como ejemplo del efecto de ciertos factores en la Función S_i^E , del Anexo A se hacen las siguientes observaciones: Al aumentar el porcentaje de bolas en el molino (Figura 49) aumenta la potencia, pero no necesariamente la Selección Específica. Por otra parte, el efecto de la granulometría de alimentación (Figura 50) tiene influencia en la Selección Específica, pero no tan significativa como se podría esperar. Por último, de la Figura 51 se deduce que un mayor diámetro de bolas es ligeramente más eficiente para mallas gruesas, esta última observación fue el motivo de comparación de la Función Selección Específica de los Muestreos 2011 y 2015, ya que presentan distintos diámetros de bola (6.25 y 5.5 pulgadas).

4.1.1 Parámetros SAG

En las Tablas 9 y 10 se tabulan los Parámetros de la Función Selección Específica del SAG-1, para los muestreos del año 2011 y 2015 respectivamente, obtenidos a partir de las parametrizaciones realizadas en Moly-Cop Tools. En la Tabla 11 se muestran los Parámetros de la Función Fractura del SAG-1, obtenidas de las mismas parametrizaciones.

Tabla 9. Parámetros Función Selección Específica SAG-1, Muestreo 2011.

Parámetro	Bolas/Partículas	Rocas/Partículas	Autofractura
α_0	0.001167	0.0002981	0.0001283
α_1	0.714	0.714	0.714
α_2	2.647	2.647	
D_{crit}	20500	5238.6	

Tabla 10. Parámetros Función Selección Específica SAG-1, Muestreo 2015.

Parámetro	Bolas/Partículas	Rocas/Partículas	Autofractura
α_0	0.009617	0.00269	0.000120
α_1	0.649	0.649	0.649
α_2	2.682	2.682	
D_{crit}	18500	5181.9	

Tabla 11. Parámetros Función Fractura SAG-1, Muestréos 2011 y 2015.

Parámetro	Muestreo 2011	Muestreo 2015
β_0	0.400	0.080
β_1	0.400	0.800
β_2	1.200	2.800
β_3	1.000	0.030

En la Función Selección Específica para molienda SAG es una media ponderada de tres mecanismos de fractura (Ecuación 15) son en total 10 los parámetros que la definen, a diferencia de la molienda convencional donde son sólo cuatro parámetros para un único mecanismo. Esto dificulta hacer una comparación entre las funciones S_i^E de los muestreos 2011 y 2015 sólo con los valores de los Parámetros de Fractura, resultando más factible realizar dicha comparación a través de las curvas de la Función S_i^E (Sección 4.1.3).

4.1.2 Validación de Parámetros

Para validar la los Parámetros de Fractura obtenidos con el archivo SAGParam_Open de Moly-Cop Tools se establecieron cuatro criterios:

- 1) El Perfil de Descarga Ajustado (curva roja Figuras 32 y 33) debe ajustarse lo más posible al Perfil de Descarga Operacional (puntos rojos Figuras 32 y 33). De esta forma nos aseguramos que la parametrización SAG sea lo más cercana posible al funcionamiento real de planta. En ambos ajustes se cumple con el criterio establecido. Para ver el detalle de las diferencias en la distribución de tamaños ver ANEXO I.
- 2) La herramienta Solver busca un valor mínimo para la Función Objetivo y, según la experiencia de otras simulaciones de la planta, valores bajo 5 se consideran aceptables. Para el muestreo del 2011 Solver encontró un valor de 2.73 y 4.37 para el muestreo 2015, estos se encuentran dentro del rango aceptable y se valida el segundo criterio.
- 3) Las curvas de la Función Selección Específica obtenidas a partir de la parametrización (curvas negras Figuras 32 y 33) deben poseer un máximo y un mínimo relativo, similar a la Figura 11, demostrándose la existencia de tamaños críticos. Para ambas parametrizaciones se cumple.
- 4) Por último, al encontrar los Parámetros SAG se generan diferencias entre los datos ajustados y los datos operacionales, las que deben ser mínimas. En la Tabla 12 se hace una comparación entre los datos operacionales y los datos ajustados, según esta tabla las diferencias son marginales y se cumple con lo establecido por el cuarto criterio.

Tabla 12. Datos Operacionales y Datos Ajustados SAG-1, Muestreos 2011 y 2015.

	2011		2015	
	Operacional	Ajustada	Operacional	Ajustada
Alimentación, t/h	1653.9	1680.6	2245.8	2293.9
Potencia, kW	12264	12264	13122	13122
CEE, kWh/t	7.42	7.30	5.84	5.72
P80, pulg	0.36	0.62	0.20	0.26

Como se cumple a cabalidad con los cuatros criterios establecidos, se validan los parámetros y las curvas obtenidas en el ajuste de cada muestreo.

4.1.3 Comparación Curvas Si^E

La Función Selección Específica (y la curva Si^E) para molienda SAG es el resultado de la sumatoria de las contribuciones independientes de los tres mecanismos de fractura involucrados en la operación: bolas sobre partículas, rocas sobre partículas y auto-fractura (Ecuación 15). Este último mecanismo hace que la curva se eleve en su última sección, formándose un valle que representa los tamaños críticos, o *pebbles*, que son los que requieren de mayor energía para ser fracturados.

La Figura 36 muestra las curvas de Función Selección Específica del SAG-1, obtenidas a partir de la parametrización en Moly-Cop Tools de los muestreos 2011 y 2015 (Figuras 32 y 33). Para efectos de una mejor comprensión de este gráfico se designó d_{crit}^* al punto donde comienza el tamaño crítico de cada curva, α_0^* a la fracción del tamaño más pequeño de partículas que serán fraccionadas en el siguiente incremento de energía específica, α_1^* a la pendiente de la primera sección de la curva y $(\alpha_1 - \alpha_2)^*$ a la pendiente de la segunda sección de la curva.

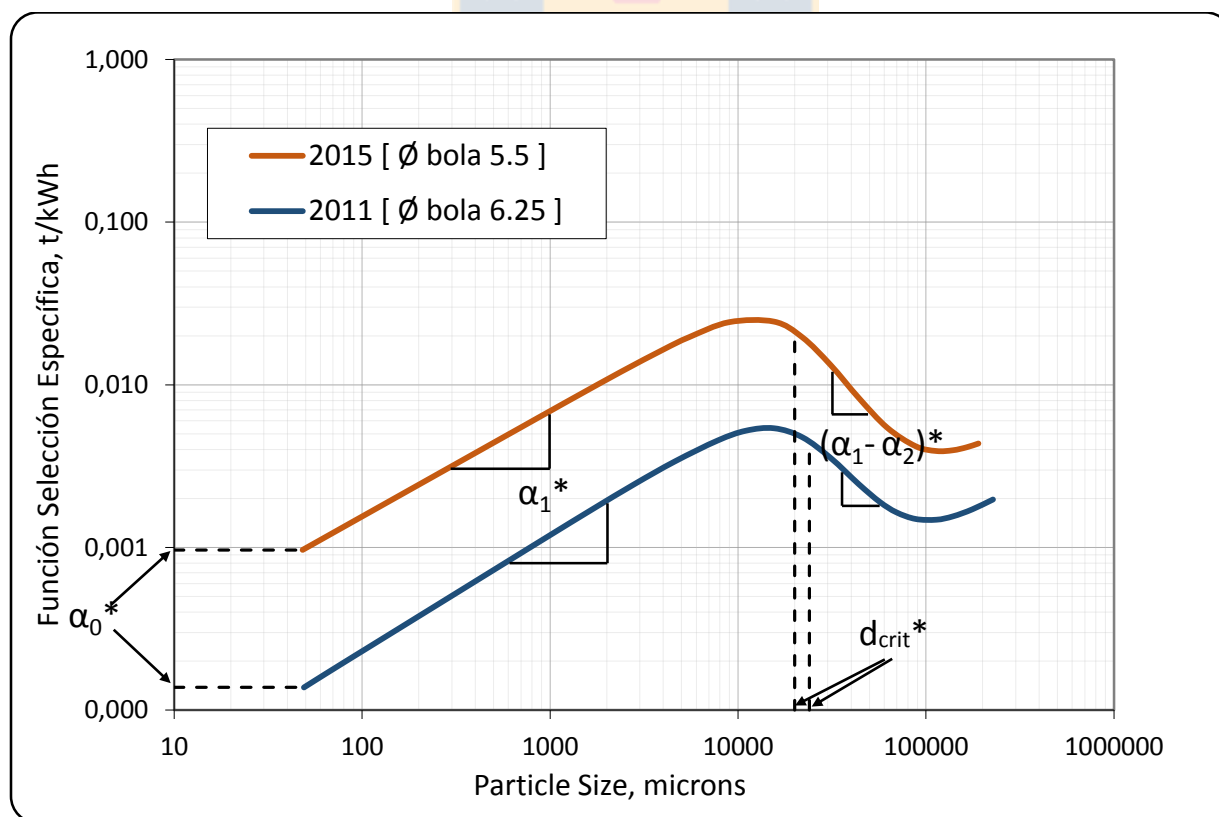


Figura 36. Curvas Función Selección Específica SAG-1, Muestreos 2011 y 2015

De las curvas de Selección Específica se tienen las siguientes conclusiones:

- La distancia que separa ambas curvas se debe a la distancia entre el punto α_0^* que representa principalmente características propias del mineral, que son el factor más influyente en los parámetros de fractura. Se podría presumir que el mineral del muestreo 2011 presentaría mayor dureza, dado que en todo rango de tamaños de partícula muestra una menor selección específica.
- La curva 2015 presenta un menor tamaño d_{crit}^* con respecto a la curva 2011, esto debido a que la diferencia en el tamaño de bola produce diferencias en el tamaño de los *pebbles* generados, con la bola de 5.5 (2015) se generan *pebbles* de 0.7 pulgadas aproximadamente y con la bola de 6.25 (2011) *pebbles* de 0.9 pulgadas aprox.
- De la primera sección de las curvas, las pendientes α_1^* son bastante similares. Aunque la pendiente α_1^* de la curva 2011 es levemente más pronunciada, generando una mayor distancia entre curvas en el punto de inicio, esto demuestra que para tamaños más pequeños la bola de 6.25 es menos eficiente en comparación con la bola de 5.5.
- Con respecto a la segunda sección de la curva, el muestreo 2015 presenta una pendiente $(\alpha_1 - \alpha_2)^*$ más negativa, demostrando que un menor diámetro de bola es menos eficiente para tamaños grandes de partícula.

4.2 Circuito de Pre-chancado

Tal como ya se ha mencionado anteriormente, el propósito del pre-chancado es aumentar el rendimiento de planta en situaciones en que ésta presente bajos tonelajes de procesamiento, es por esto que se descartó el uso del Muestreo 2015 para la simulación del pre-chancado y sólo se realizó con los datos del Muestreo 2011, ya que este presenta con un rendimiento horario más bajo (ver Tabla 4). Se creó un archivo en JKSimMet donde se dibujó el *flowsheet* del Proyecto CCP, se ingresaron los datos del muestreo y se realizó un Ajuste de Parámetros que entregó una Desviación Estándar $\sigma = 1.92$ (ponderación de la desviación de todos los datos del ajuste).

A partir del ajuste se realizaron tres simulaciones del circuito, una para cada *setting* (44, 50 y 56 mm), y se obtuvo razón de reducción $R_R = 3.1$ para el chancador MP12500.

4.2.1 Validación de Ajuste y Simulación

Para la validar el Ajuste de Parámetros y la Simulación del Circuito de Pre-chancado en JKSimMet se utilizaron los siguientes dos criterios:

- 1) Para establecer la confiabilidad en el ajuste y simulación del chancador MP 1250, el P80 simulado (para cada uno de los *setting*) debe coincidir con el estipulado por catálogo (Figura 29), de esta forma nos aseguramos que los perfiles granulométricos obtenidos son correctos. En la Tabla 13 se muestra la comparación de estos valores.

Tabla 13. P80 de Catálogo y Simulado para Chancador MP1250.

Setting de Pre-chancado	P80 Catálogo (mm)	P80 Simulado (mm)
44 mm	50 aprox.	52.28
50 mm	58 aprox.	58.36
56 mm	-	65.27

Las simulaciones del circuito con el pre-chancado de CSS 44 y 50 mm cumplen con el criterio establecido. Mientras que para el *setting* de 56 mm no existe referencia por catálogo, pero las dos primeras simulaciones son suficientes para afirmar que el ajuste de parámetros es confiable y por ende también lo son todas las simulaciones realizadas.

- 2) Al hacer el Ajuste de Modelo se calcula automáticamente la Desviación Estándar SD, que es la medida de dispersión más común y que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Según la experiencia de otros Ajustes de la planta, valores bajo 3 se consideran aceptables, para este modelo ajustado se obtuvo una Desviación Estándar $\sigma=1.92$, validándose el segundo criterio.

Como se cumplen los dos criterios establecidos, se valida el Modelo Ajustado y las Simulaciones del pre-chancado.

4.2.2 Nuevo Perfil Granulométrico Alimentación SAG

De las simulaciones del circuito pre-chancado se obtuvo nuevos perfiles granulométricos para la alimentación SAG correspondiente a la convergencia de tres flujos en el stock pile 2, el 40%

proviene del primer stock pile y el otro 60% del bajo tamaño Harnero MF 4273-2 y de la descarga del chancador MP1250. Estos nuevos perfiles se comparan con el perfil original en la Figura 37.

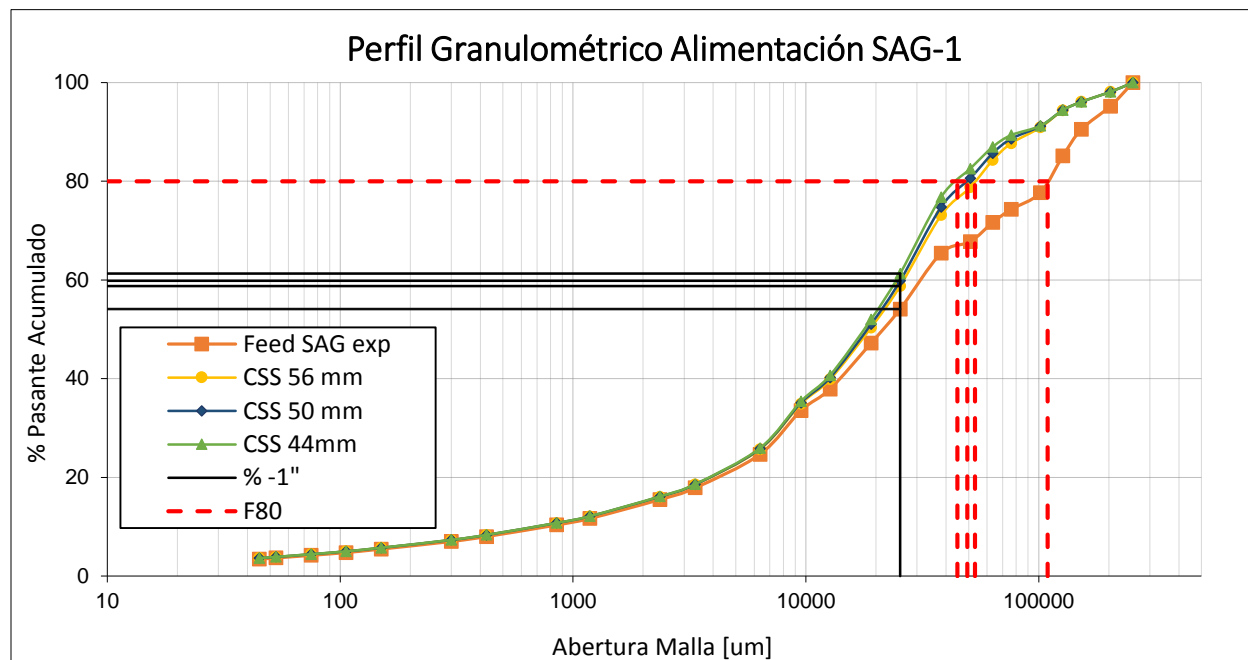


Figura 37. Perfiles Granulométricos de Alimentación SAG con Pre-chancado de distintos setting

La curva anaranjada representa la distribución de tamaños de alimentación del SAG-1 del muestreo del 2011 y las curvas restantes corresponden a la descarga de la planta de pre-chancado con *settings* de 44, 50 y 56 mm. El detalle de estas distribuciones de tamaño se adjunta en el ANEXO J.

Las líneas negras muestran el porcentaje de finos (% -1") en la alimentación del SAG y las líneas segmentadas rojas representan el F80 para cada distribución granulométrica. Los valores de estos parámetros se tabulan en la Tabla 14.

Tabla 14. Porcentaje de Finos y F80 en Alimentación SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.

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

Lógicamente con la instalación del pre-chancado aumenta el porcentaje de finos y disminuye el F80 en la alimentación SAG y, al disminuir el setting del pre-chancado se amplifican estos efectos.

4.3 Efectos del Pre-chancado en la Molienda SAG

Se clasificaron en dos los efectos en la molienda SAG con la instalación de un pre-chancado: los efectos en la distribución granulométrica de descarga y en el tamaño de transferencia T80; y los efectos en consumo específico de energía y en el rendimiento horario.

4.3.1 Distribución Granulométrica de Descarga SAG

En la Figura 38 se muestran los Perfiles Granulométricos de Descarga obtenidos a partir de las simulaciones SAG con pre-chancado y se comparan con el perfil de descarga original (sin pre-chancado). El detalle de estas distribuciones de tamaño se adjunta en el ANEXO J.

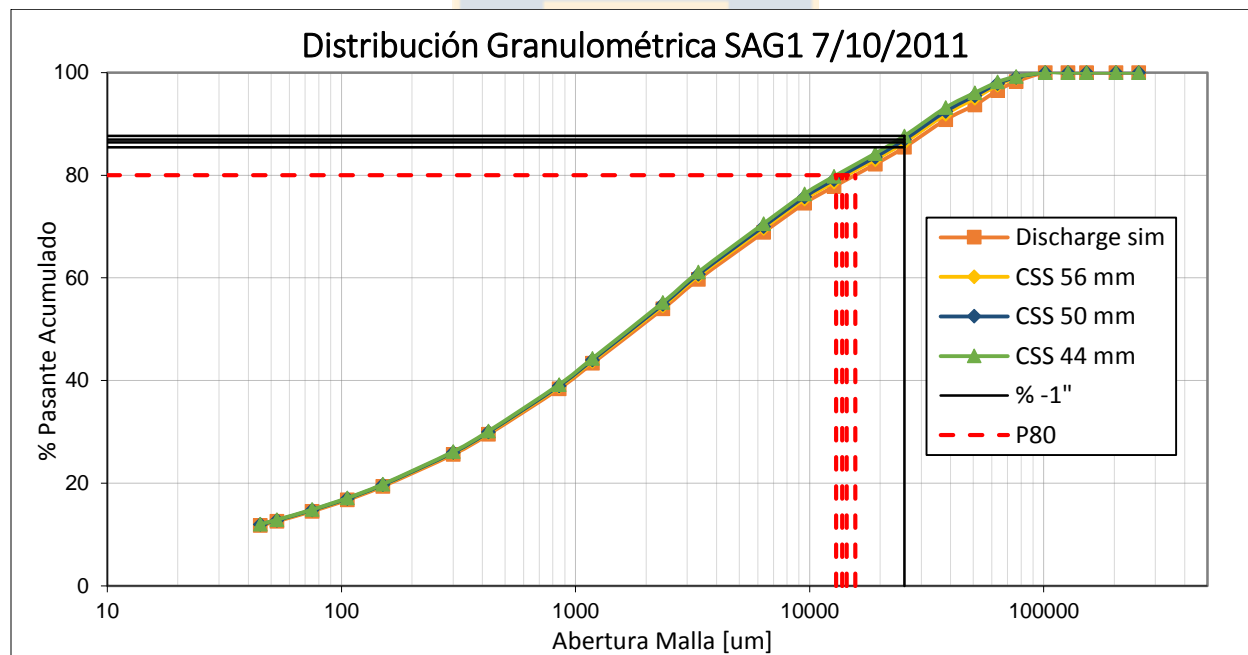


Figura 38. Perfiles Granulométricos de Descarga SAG con Pre-chancado de distintos setting

La curva anaranjada representa la distribución de tamaños de descarga del SAG-1 del muestreo del 2011 y las demás curvas corresponden a la descarga del molino, al ser alimentado desde la planta de pre-chancado con settings de 44, 50 y 56 mm.

Las líneas negras muestran el porcentaje de finos (% -1") en la descarga del SAG y las líneas segmentadas rojas representan el P80 para cada distribución granulométrica. Los valores obtenidos se tabulan en la Tabla 15.

Tabla 15. Porcentaje de Finos y P80 en Descarga SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.

	Sin Pre-chancado	Simulación con Pre-chancado		
		CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
-1", %	85.43	87.65	86.93	86.39
P80, pulg	0.62	0.51	0.54	0.56
P80, mm	15.65	12.97	13.77	14.41

A diferencia de la distribución granulométrica de alimentación, la distribución de descarga SAG se ve mínimamente afectada, lo que no se podría definir como un efecto positivo ni negativo, puesto que con el pre-chancado se espera un aumento en el rendimiento y no necesariamente cambios en la granulometría de descarga.

4.3.1.1 Sobretamaño y Bajotamaño Harnero SAG

La Figura 39 muestra el perfil granulométrico del sobretamaño (Over) y bajo tamaño (Under) para el Harnero SAG sin pre-chancado y con pre-chancado, obtenidos con el archivo ScreenSim_Single de Moly-Cop Tools.

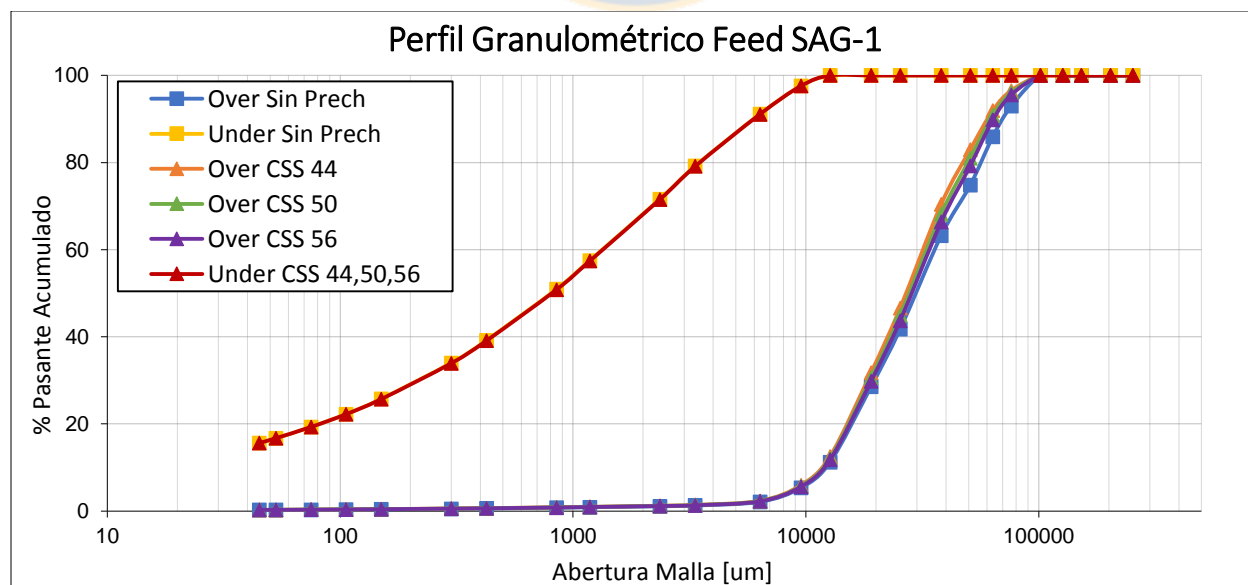


Figura 39. Sobretamaño y Bajotamaño Harnero SAG, con Pre-chancado y sin Pre-chancado

Según las simulaciones realizadas, la granulometría del bajotamaño no se ve afectada con el pre-chancado, es decir, el perfil granulométrico de alimentación de la molienda convencional será la misma con o sin pre-chancado. Mientras que el sobretamaño si se ve afectado, aunque mínimamente. Estos resultados se tabulan en la Tabla 16.

Tabla 16. Porcentaje de finos y P80 para SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.

	Sin Pre-chancado	Simulación con Pre-chancado		
		CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
-1", %	41.76	46.61	44.93	43.70
P80, pulg	2.23	1.88	1.96	2.03
P80, mm	56.58	47.64	49.74	51.68

Si bien los *pebbles* se definen como un tamaño característico de partícula que actúa como dureza mayor al resto, en la práctica se denomina al sobretamaño del harnero SAG y van desde 0.5 a 3.25 pulgadas. La generación de *pebbles* es un factor negativo dentro de la operación de molienda SAG, ya que ésta produce un mayor gasto de energía y de medios de molienda.

En la Tabla 17 se muestra la fracción de *pebbles* con respecto a la descarga total para SAG.

Tabla 17. Generación de Pebbles en SAG con Pre-chancado de Distintos Setting.

	Sin Pre-chancado	Simulación con Pre-chancado		
		CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
Generación Pebbles, t/hr	420.3	469.4	476.1	497.5
Respecto Descarga Total	25.01%	23.13%	23.73%	24.18%

Un *setting* más pequeño significa un incremento en el porcentaje de finos en la alimentación SAG y, al mismo tiempo, una leve disminución en la generación de tamaños críticos o *pebbles*.

4.3.2 Rendimiento SAG

En la Tabla 18 se tabulan los resultados de cada simulación y en la Tabla 19 las variaciones obtenidas, la Referencia CCP indica las variaciones esperadas con *Candelaria Consolidation Project*.

Tabla 18. Resultados Simulaciones SAG con Pre-chancado de Distintos Setting.

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

Tabla 19. Variaciones Simulaciones SAG con Pre-chancado de Distintos Setting.

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

De ambas tablas se concluye que, para una misma potencia, al aumentar los finos en la alimentación del molino cerca de un 10%, el consumo específico de energía disminuye un 17%, mientras que el rendimiento horario aumenta un 20%, aproximadamente, lo que puede traducirse en un incremento de 300 a 400 t/h por molino SAG.

4.4 Optimización de Parámetros SAG con Pre-chancado

Con la ayuda de simuladores, se demostró que al instalar una planta de pre-chancado e incrementar el porcentaje de finos en la alimentación SAG, se logra un aumento considerable en el rendimiento de los molinos.

Con el fin de aprovechar al máximo las capacidades del SAG se realizaron simulaciones para optimizar algunas variables operacionales y obtener rendimientos horarios aún mayores. A continuación se muestran los resultados de dicha optimización.

4.4.1 Diámetro de Bola

A través de Moly-Cop Tools no es posible calcular un diámetro de bola específico para un molino SAG bajo ciertas condiciones, a diferencia de un molino de bolas para el cual si es posible realizar este cálculo. De ahí la importancia del Gráfico 6, este permitió analizar la operación de molienda SAG con dos tamaños de bolas distintos.

Si bien no fue posible realizar simulaciones para evaluar distintos tamaños de bola, se pudo comprobar que para partículas de tamaños menores es más eficiente un diámetro de bola pequeño, del mismo modo que una bola de mayor diámetro para partículas grandes. Por lo tanto, al instalar de una planta de pre-chancado y aumentar el porcentaje de partículas pequeñas en la alimentación del SAG, sería conveniente evaluar una disminución en el tamaño de la bola, siempre y cuando el pre-chancado funcionara de manera permanente (24/7), para lo cual se tendrían que aplicar test de laboratorio específicos.

4.4.2 Nivel de Bola

Según el Modelo de Potencia de la Sección 2.3.2, para un molino SAG con dimensiones y velocidad crítica constantes, el nivel de llenado es la variable que controla la Potencia consumida. En la Figura 40 se puede ver que para un nivel de llenado constante, existe una relación directamente proporcional entre el nivel de bola y la potencia consumida (kW), esto se debe a que un aumento en la cantidad de bolas conlleva un gran aumento en el peso del molino generando un mayor consumo de potencia.

En el Anexo K se tabulan los datos del efecto de bola en la potencia consumida para distintos niveles de carga. Para una mejor visualización del efecto del % Jb en la potencia sólo se graficaron rectas para cuatro distintos % Jc (29, 31, 33, 35).

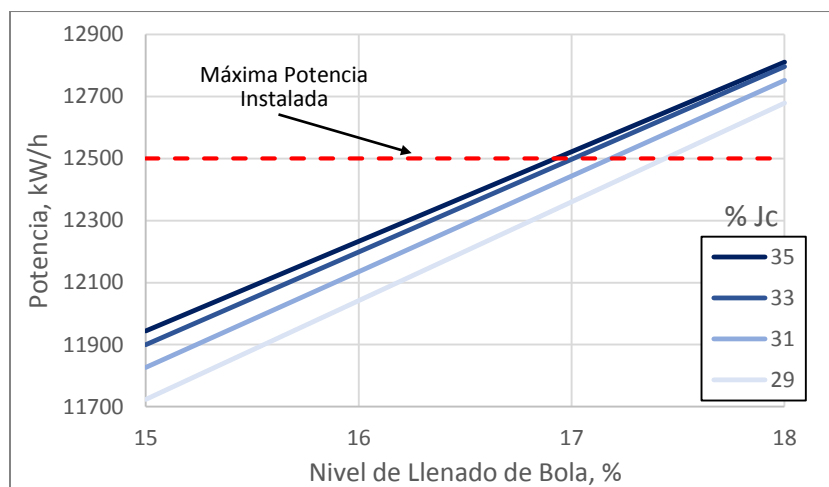


Figura 40. Efecto del Nivel de Bola en la Potencia Consumida SAG

De éste gráfico se obtuvo el nivel de bola, para distintos niveles de carga con el que el molino consume la Potencia Máxima Instalada (12500 kW) para los SAG de Candelaria, ésta se encuentra demarcada por la línea segmentada roja. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 20. Nivel de Bola para un Consumir Máxima Potencia Instalada.

% Jc	% Jb	Potencia, kW
29	17.46	12500
30	17.30	12500
31	17.18	12500
32	17.08	12500
33	17.01	12500
34	16.95	12500
35	16.92	12500
36	16.92	12500

Las Figuras 41, 42 y 43 muestran el efecto del Nivel de Bola en el Rendimiento Horario del SAG con pre-chancado de distintos *settings*. Utilizando los datos obtenidos del gráfico de la Figura 40, en los en los gráficos de las Figuras 41, 42 y 43 se determinó el rendimiento horario (línea segmentada roja) para cada combinación Jb-Jc que consume el máximo de potencia instalada (12500 kW).

En el Anexo L se tabulan los datos correspondientes los tres gráficos siguientes.

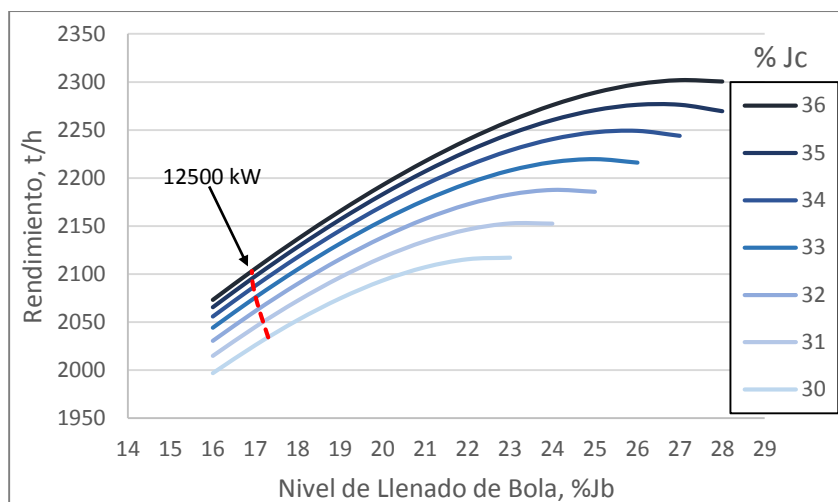


Figura 41. Efecto del Nivel de Llenado de Bola en el Rendimiento SAG con Pre-chancado de CSS 44mm

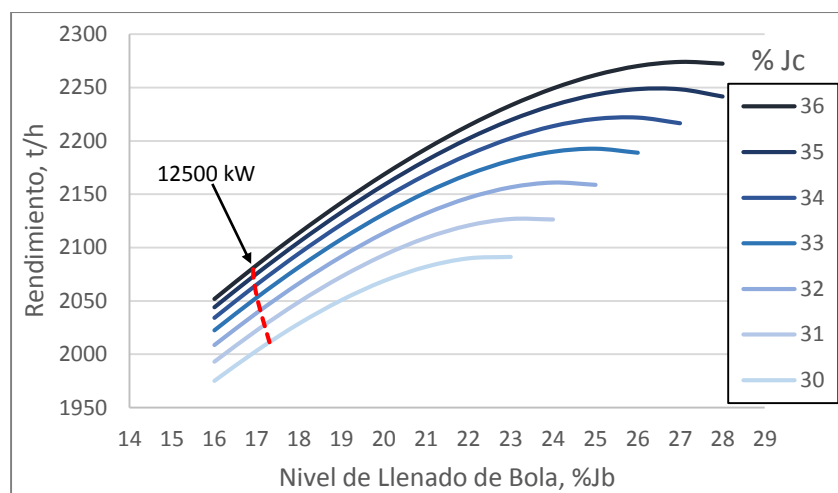


Figura 42. Efecto del Nivel de Llenado de Bola en el Rendimiento SAG con Pre-chancado de CSS 50mm

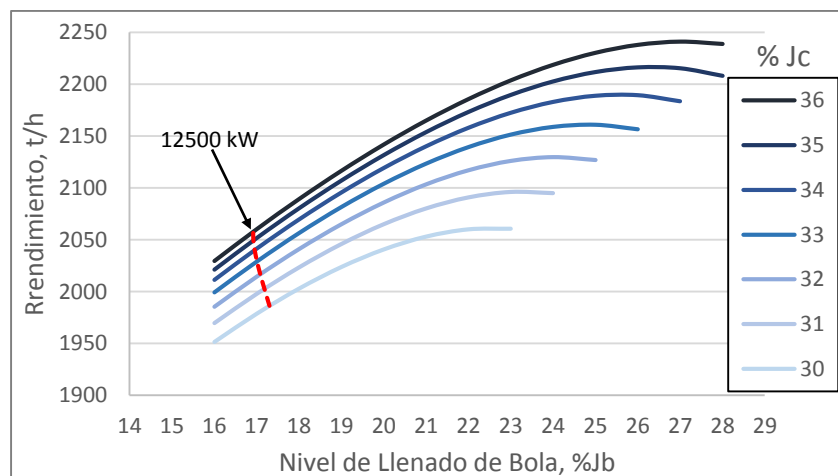


Figura 43. Efecto del Nivel de Llenado de Bola en el Rendimiento SAG con Pre-chancado de CSS 56mm

La incorporación de medios de molienda aumenta considerablemente el tonelaje procesado por el molino, hasta un punto máximo donde el rendimiento empieza a ser más deficiente a medida que aumenta el Nivel de Bola.

Tomando como ejemplo la curva de $J_c = 30\%$ de la Figura 31, el máximo rendimiento para este nivel de llenado sería con un nivel de bola cercano 23%, sin embargo, este punto de la curva está fuera del rango de potencia del molino y sólo es posible un nivel de bola máximo de 17.3% para dicho nivel de llenado.

Por lo tanto, para niveles de llenado entre 30 y 36%, se estima un nivel de bola óptimo entre 16 y 17%.

4.4.3 Flujo de Alimentación y Nivel de Carga

El nivel de la carga de un molino SAG depende del flujo de mineral con que este es alimentado, tal como se ve en el Gráfico 14. De igual forma, la cantidad de mineral molido (descargado) es proporcional al nivel de carga presente en el molino, es por esto que en la práctica el flujo de descarga se controla ajustando el flujo de alimentación. En el Anexo M se tabulan los datos del siguiente gráfico.

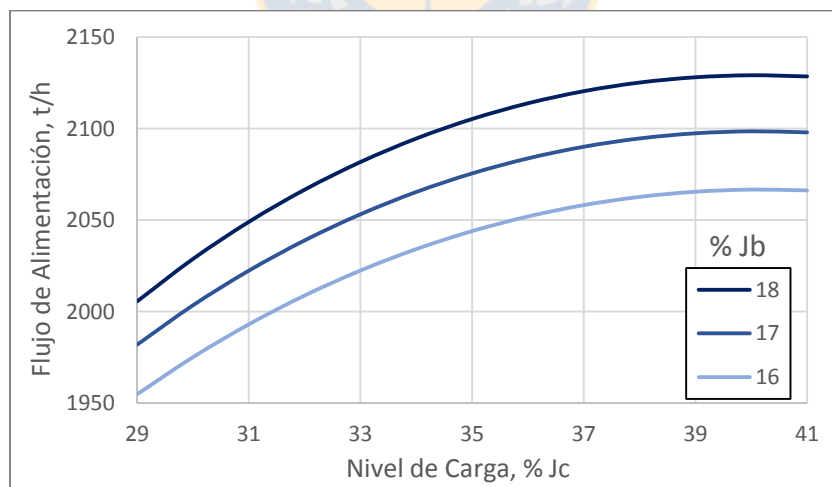


Figura 44. Efecto de Flujo de Alimentación en Nivel de Carga para SAG con Pre-chancado de CSS 50mm

Según el Modelo de Potencia de la Sección 2.3.2, el nivel de carga de un molino sag tiene una influencia directa en la potencia consumida, lo que queda demostrado con la Figura 45, la potencia aumenta a medida que el nivel de carga también lo hace hasta llegar a un valor máximo

luego, si el flujo de alimentación es muy alto se generará una sobrecarga de mineral y la potencia comenzará a caer generando una inestabilidad en el molino. En el Anexo N se tabulan los datos del siguiente gráfico.

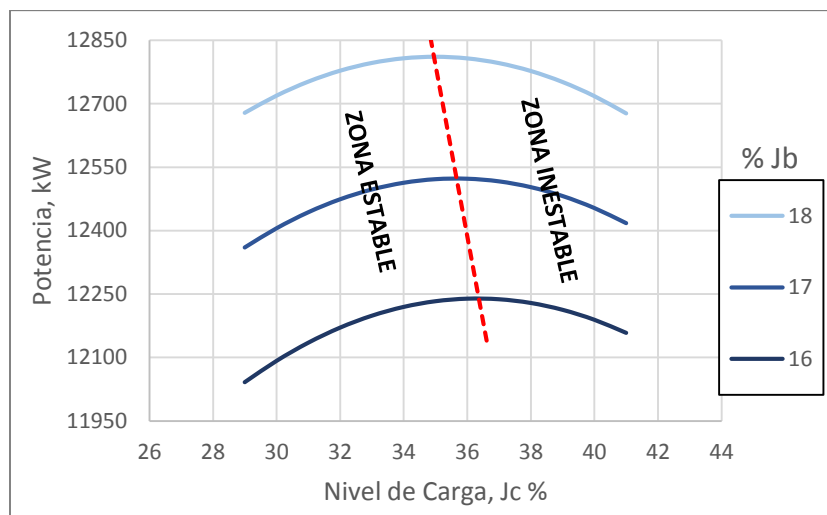


Figura 45. Efecto del Nivel de Carga en la Potencia Consumida SAG

Este gráfico muestra que con un nivel de bola cercano a 17% se alcanza un consumo 12500 kW de potencia y para este nivel de bola el molino funcionará con estabilidad por debajo del 36% de carga.

Con el fin de evitar una sobrecarga de mineral y la desestabilización del molino, se estableció como nivel de carga óptimo $J_c = 34\%$, teniendo un margen dentro del rango de estabilidad cercano a dos puntos porcentuales y a partir de la Tabla 18 tiene que para este nivel de carga, el nivel de bola óptimo es $J_b = 16.95\%$.

Los resultados de la optimización de parámetros se tabulan a continuación:

Tabla 21. J_b y J_c Optimizados, Muestreo 2011.

Parámetro	Muestreo	Optimizado
% J_b	16.40	16.95
% J_c	31.15	34.00

4.5 Proyección de Producción

4.5.1 Rendimiento SAG con Pre-chancado y Variables Optimizadas

En la Tabla 22 se muestran los resultados para SAG sin pre-chancado, con pre-chancado y con pre-chancado y variables optimizadas, obtenidos a través de las simulaciones realizadas en Moly-Cop Tools. En esta tabla se detallan el porcentaje de finos, la potencia consumida, el consumo específico de energía y el rendimiento horario.

Tabla 22. Resultados Simulaciones para SAG con Pre-chancado y Variables Optimizadas.

	Simulación Sin	Simulación con Pre-chancado			Simulación con Pre-chancado Variables Optimizadas		
	Pre-chancado	CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm	CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
Alimentación-1", %	54.11	61.31	59.84	58.77	61.31	59.84	58.77
Potencia, kW	12264	12264	12264	12264	12500	12500	12500
CEE, kWh/t	7.30	6.04	6.11	6.18	5.99	6.06	6.13
Rendimiento, t/h	1680.6	2029.7	2007.6	1983.6	2086.3	2064.0	2040.0

En la Tabla 23 se tabula el aumento o disminución, en porcentaje, para las mismas variables de la Tabla 22. La Referencia CCP se refiere a los resultados esperados por *Candelaria Consolidation Project* para un pre-chancado de CSS 50 mm.

Tabla 23. Variaciones Simulaciones para SAG con Pre-chancado y Variables Optimizadas.

	Referencia CCP	Simulación con Pre-chancado			Simulación con Pre-chancado Variables Optimizadas		
	CSS 50 mm	CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm	CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
Alimentación -1"	+ 10%	+ 13.31%	+10.60%	+8.61%	+ 13.31%	+10.60%	+8.61%
Potencia	-	-	-	-	+ 1.92%	+ 1.92%	+ 1.92%
CEE	- 15%	- 17.20%	- 16.29%	- 15.28%	- 17.89%	- 17.00%	- 16.03%
Rendimiento	+ 15%	+ 20.77%	+ 19.45%	+ 18.03%	+ 24.14%	+ 22.81%	+ 21.38%

Se comprueba que aumentar el porcentaje de finos, disminuye el consumo específico de energía y aumenta el rendimiento horario hasta cerca de un 20%. Además, optimizando las variables nivel de llenado y nivel de bola y utilizando el máximo de potencia instalada (12500 kW) se logra un aumento del 3% en el rendimiento.

4.5.2 Proyección a Cinco Años de Producción de Cu Fino

Utilizando los resultados del aumento en el rendimiento horario con pre-chancado de la Tabla 22 y las Ecuaciones 28, 29 y 30 del Modelo de Producción de Minera Candelaria, se realizó una Proyección para Producción de Libras de Cobre Fino Vendible por los próximos cinco años.

Como el proyecto CCP contempla un funcionamiento parcial del pre-chancado, es decir, no funcionaría las 24 horas del día sino sólo en ocasiones que el rendimiento sea bajo, las se realizaron proyecciones para 12, 18 y 24 horas diarias de funcionamiento.

A continuación, en las Tablas 24, 25 y 26 se detallan las proyecciones para 44, 50 y 56 mm de *setting* respectivamente.

Tabla 24. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 44 mm.

	Sin Pre-chancado	Con Pre-chancado CSS 44 mm		
		12 h/día	18 h/día	24 h/día
Año	Producción Cu Vendible (10^{-3} lb/año)			
2018	303,084	339,664	357,952	376,248
2019	294,645	330,206	347,985	365,772
2020	340,919	382,065	402,636	423,217
2021	353,981	396,704	418,063	439,432
2022	376,111	421,505	444,199	466,905

Tabla 25. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 50 mm.

	Sin Pre-chancado	Con Pre-chancado CSS 50 mm		
		12 h/día	18 h/día	24 h/día
Año	Producción Cu Vendible (10^{-3} lb/año)			
2018	303,084	337,650	354,933	372,217
2019	294,645	328,249	345,051	361,853
2020	340,919	379,800	399,241	418,683
2021	353,981	394,352	414,538	434,724
2022	376,111	419,006	440,454	461,902

Tabla 26. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 56 mm.

Año	Sin Pre-chancado	Con Pre-chancado CSS 56 mm		
		12 h/día	18 h/día	24 h/día
		Producción Cu Vendible (10^3 lb/año)		
2018	303,084	335,488	351,689	367,883
2019	294,645	326,146	341,897	357,640
2020	340,919	377,368	395,592	413,808
2021	353,981	391,826	410,749	429,662
2022	376,111	416,322	436,428	456,524

De las ecuaciones del modelo de producción se tiene que un aumento en el rendimiento horario es directamente proporcional a un aumento en la producción de Cu Vendible, lo que se refleja en los valores tabulados en estas tres tablas. En las Figuras 46, 47 y 48 se grafican los resultados obtenidos.

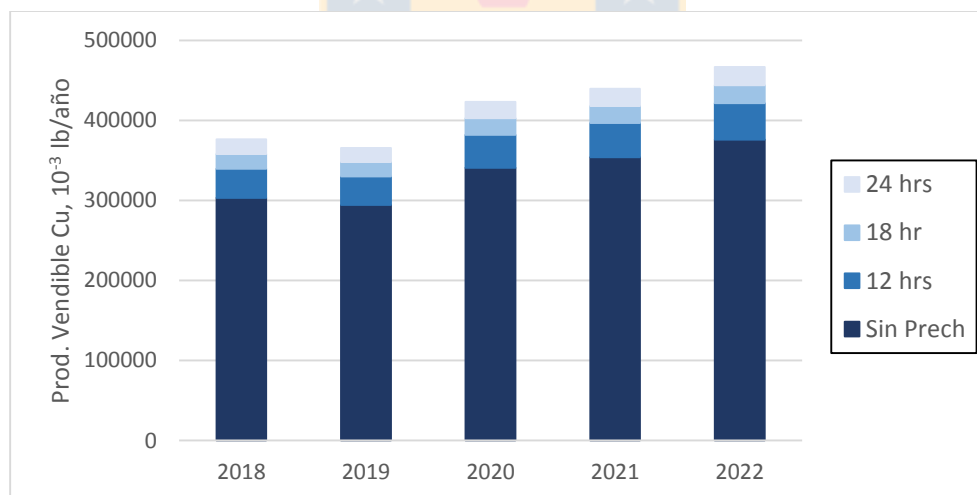


Figura 46. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 44 mm

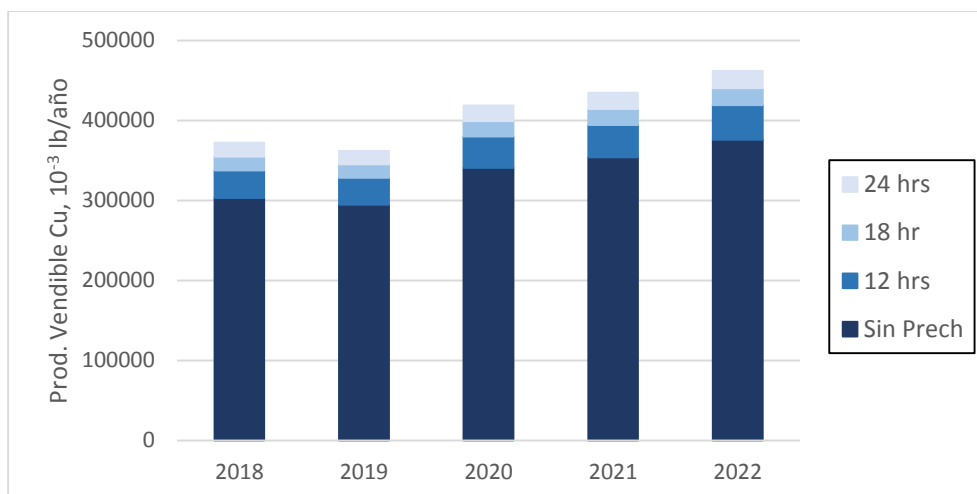


Figura 47. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 50 mm

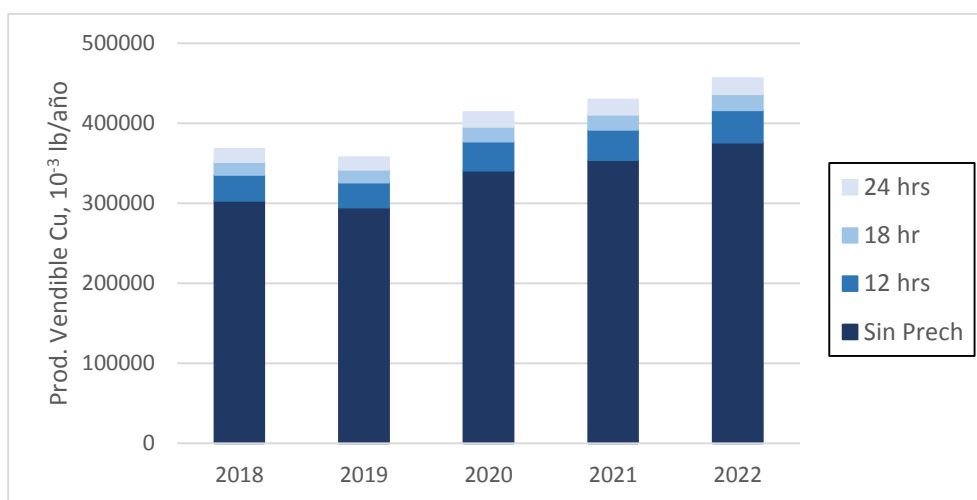


Figura 48. Proyección Anual Candelaria según horas de funcionamiento Pre-chancado CSS 56 mm

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se validó tanto la parametrización de molienda SAG realizada en Moly-Cop Tools (Tablas 9, 10 y 11), como la simulación del circuito de pre-chancado en JKSimMet (Figura 34).
- De la comparación de las Curvas de Función Selección Específica Muestreos 2011 y 2015 se concluye que: Es probable que el mineral del muestreo 2011 fuese de mayor dureza, dado que en todo rango de tamaños de partícula muestra una menor Selección Específica; el diámetro de la bola utilizada como medio de molienda impacta directamente en el tamaño de los *pebbles* generados, una bola de diámetro pequeño genera *pebbles* de menor tamaño que una bola de diámetro grande; al mismo tiempo, el diámetro de bola define la eficiencia para la molienda de los distintos tamaños de partículas al interior del molino, una bola más pequeña es más eficiente para partículas de menor tamaño y, del mismo modo, una bola de mayor diámetro es más eficiente para partículas más grandes.
- Respecto de los perfiles granulométricos para SAG con pre-chancado se tiene que, entre más pequeño es el *setting* del pre-chancado, mayor es el porcentaje de finos en la alimentación SAG y menor es el F80 y; contrario a lo que podría esperarse, el perfil granulométrico de descarga SAG es sólo marginalmente afectado.
- El perfil del bajotamaño se mantiene igual para SAG con o sin pre-chancado; mientras que en el perfil del sobretamaño el porcentaje de finos aumenta y el P80 disminuye con *settings* más estrechos (del pre-chancado), moderadamente en ambos casos, lo que se traduce en una leve disminución en la generación de tamaños críticos o *pebbles*.
- En cuanto al impacto en el rendimiento SAG, con la instalación de un pre-chancado de 50 mm de *setting* (estipulado por el proyecto CCP) se registra un aumento de 7.59% de finos en la alimentación, una disminución de 16.29% en el consumo específico de energía y un aumento de 19.45% en el rendimiento horario, lo que significa un incremento de 327 t/h por SAG. Con el funcionamiento permanente de este pre-chancado (24/7) se obtendría un aumento de 19.45% en las libras de cobre vendibles anuales.

- Con pre-chancado de 44 y 56 mm de *setting* se registran aumentos de 11.69 y 4.65% en los finos de alimentación SAG, una disminución de 17.20 y 15.28% en el CEE y un aumento de 20.77 y 18.03 en el rendimiento horario, respectivamente.
- Para evitar una sobre carga de mineral y la desestabilización del molino, se determinó un nivel de llenado óptimo $J_c=34\%$, que se encuentra 2% bajo el límite de estabilidad. Para este nivel de llenado se estableció como nivel de bola óptimo $J_b=16.95\%$ con el que el consumo de potencia es de 12500 kW, que es la máxima instalada. Con esta optimización se logra un aumento del 3% en el rendimiento SAG.
- Combinando la instalación del pre-chancado y la optimización de variables, se podría lograr un aumento de hasta un 22% de la producción de cobre fino.
- Si el pre-chancado tuviera un funcionamiento 24/7, disminuyendo de forma permanente el tamaño de las partículas en la alimentación SAG, se recomienda evaluar la disminución del diámetro de bola a través de test específicos de laboratorio.
- En base a los resultados obtenidos se recomienda la instalación del pre-chancado, pero tomando en cuenta que en la actualidad Candelaria no cuenta con mineral suficiente para aumentar el rendimiento horario de la planta, el proyecto CCP no podría llevarse a cabo, sin embargo, existen planes de expansión de la mina y, de ser así, el pre-chancado estaría completamente justificado.
- Como línea de investigación futura, se invita a realizar una Evaluación Económica de *Candelaria Consolidation Project* con pre-chancado de distintos *settings*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Austin, L., Concha, F. (1994). *“Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación”*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red de Fragmentación XII-A, Chile.
- [2] Gutiérrez, L., Sepúlveda, J., (1986) *“Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras Mediante Técnicas de Modelación Matemática”*. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, Chile.
- [3] Jofré, J. (2016). *“Optimización de Procesos de Molienda-Clasificación. Desafíos-Oportunidades-Escenarios”*. Séptima Conferencia Minería y Metalurgia. Moly Cop Chile S.A., Iquique, Chile.
- [4] *“JK SimMet Simulador de Procesamiento de Minerales en Estado Estacionario”* (2001). JKMRC Commercial Division: Australia.
- [5] Magne, L., Valderrama, W., Pontt, J. (2001). *“Temas Actuales en Molienda Semiautógena”*. Workshop de Molienda SAG, Centro Tecnológico de Molienda SAG y Sistemas Eléctricos. Chile.
- [6] Ruiz, M. C. (2004). *“Reducción de tamaño y clasificación”*. Universidad de Concepción, Chile.
- [7] Sepúlveda, J. (1986). *“Un Análisis Crítico del Proceso de Molienda/Clasificación”*. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, Chile.
- [8] *“Simula v.2.0 Simulador estático Plantas Concentradoras de Cobre”* (2009). [en línea]. Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/simula2/index.html.
- [9] Tamaño Máximo de Medio de Molienda (2016). [en línea]. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/tamano-maximo-de-medio-de-molienda/>
- [10] Software for the Anlysis of Mineral Grinding Processes. Moly-Cop Tools.

ANEXOS

Anexo A. Efecto de Parámetros en la Función Selección Específica SAG

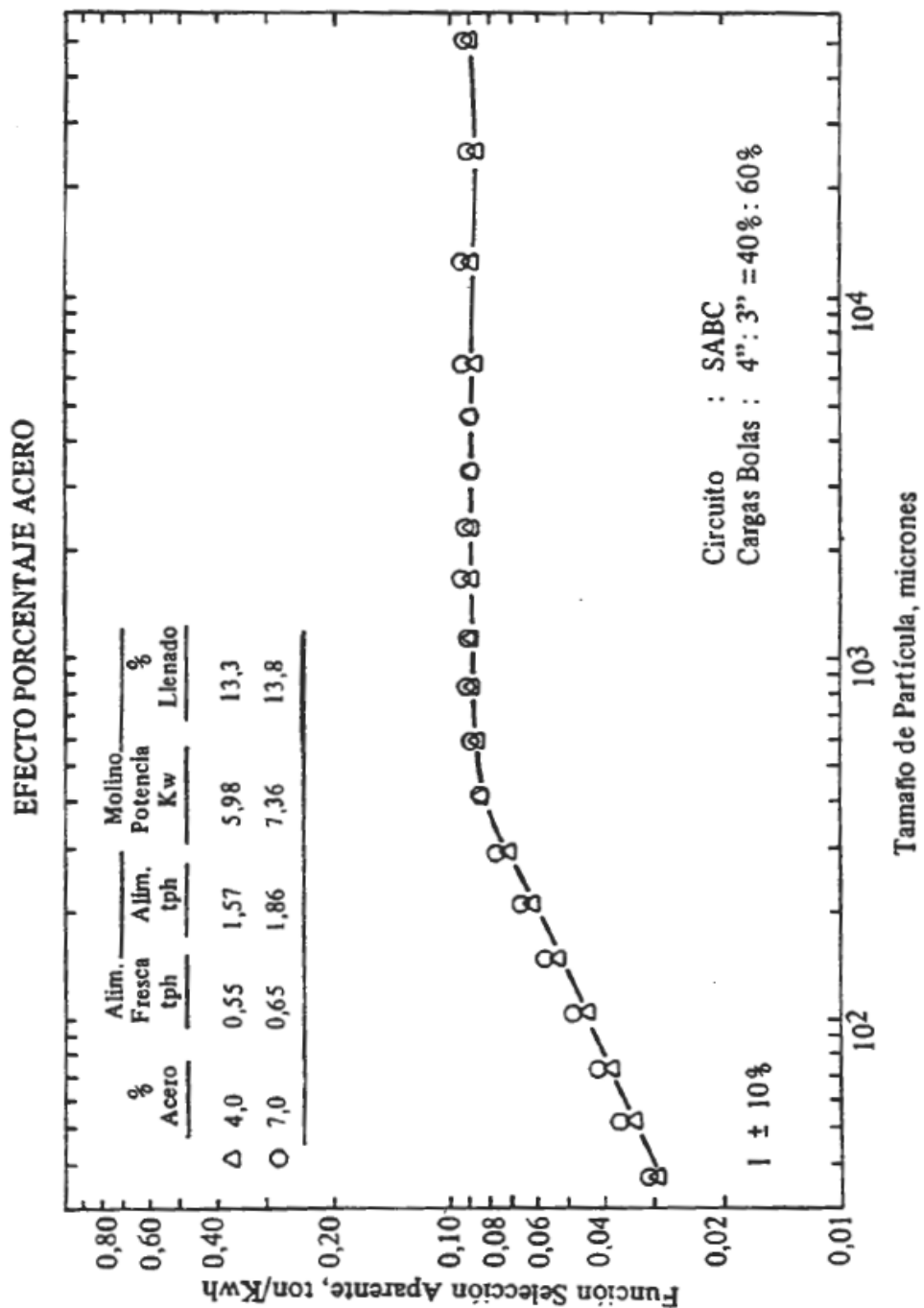


Figura 49. Efecto del % de acero sobre la función selección específica^[7]

EFECTO GRANULOMETRIA DE ALIMENTACION (Mineral Duro)

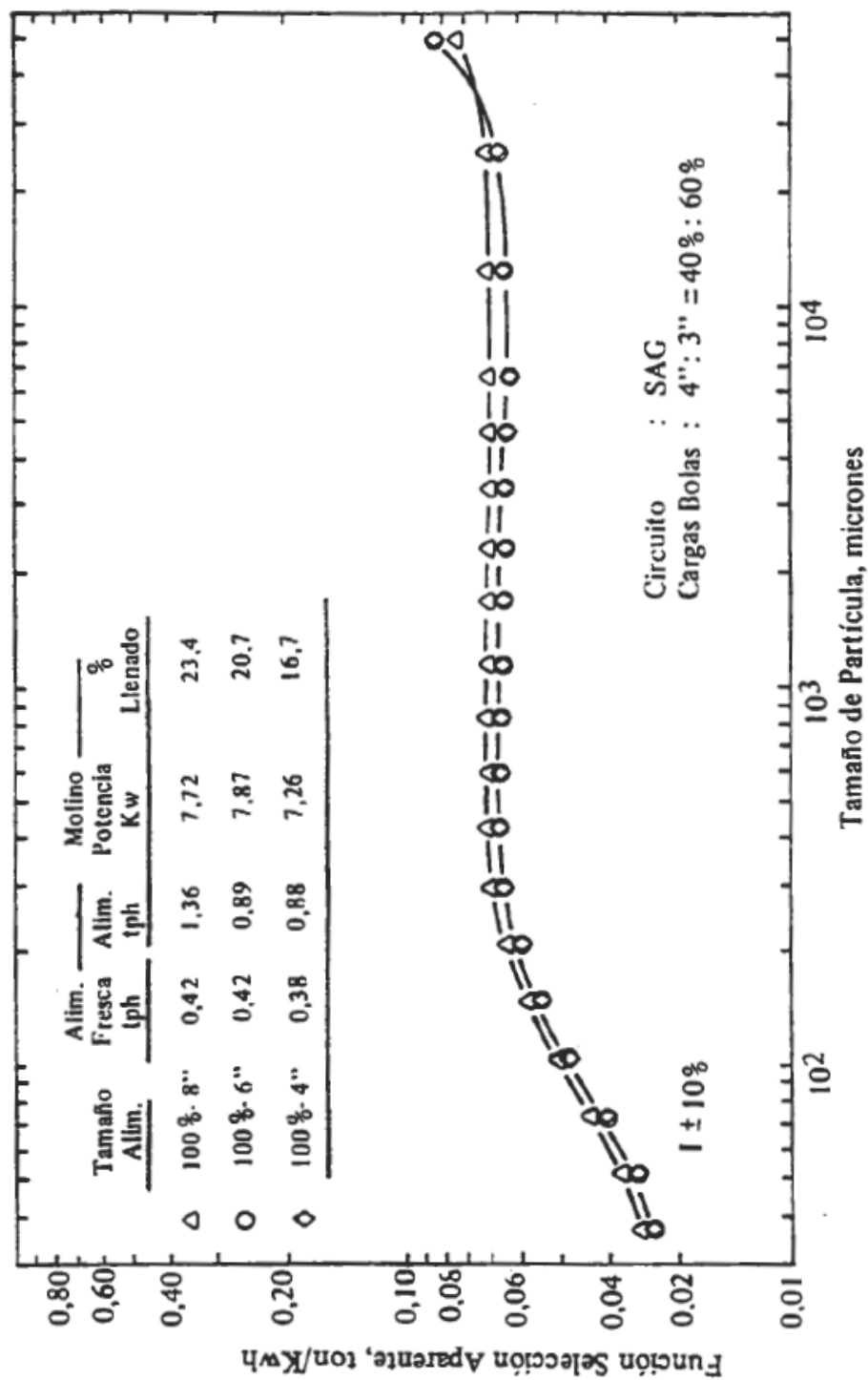


Figura 50. Efecto de la granulometría de alimentación sobre la función selección específica ^[7]

EFECTO DIAMETRO DE BOLAS

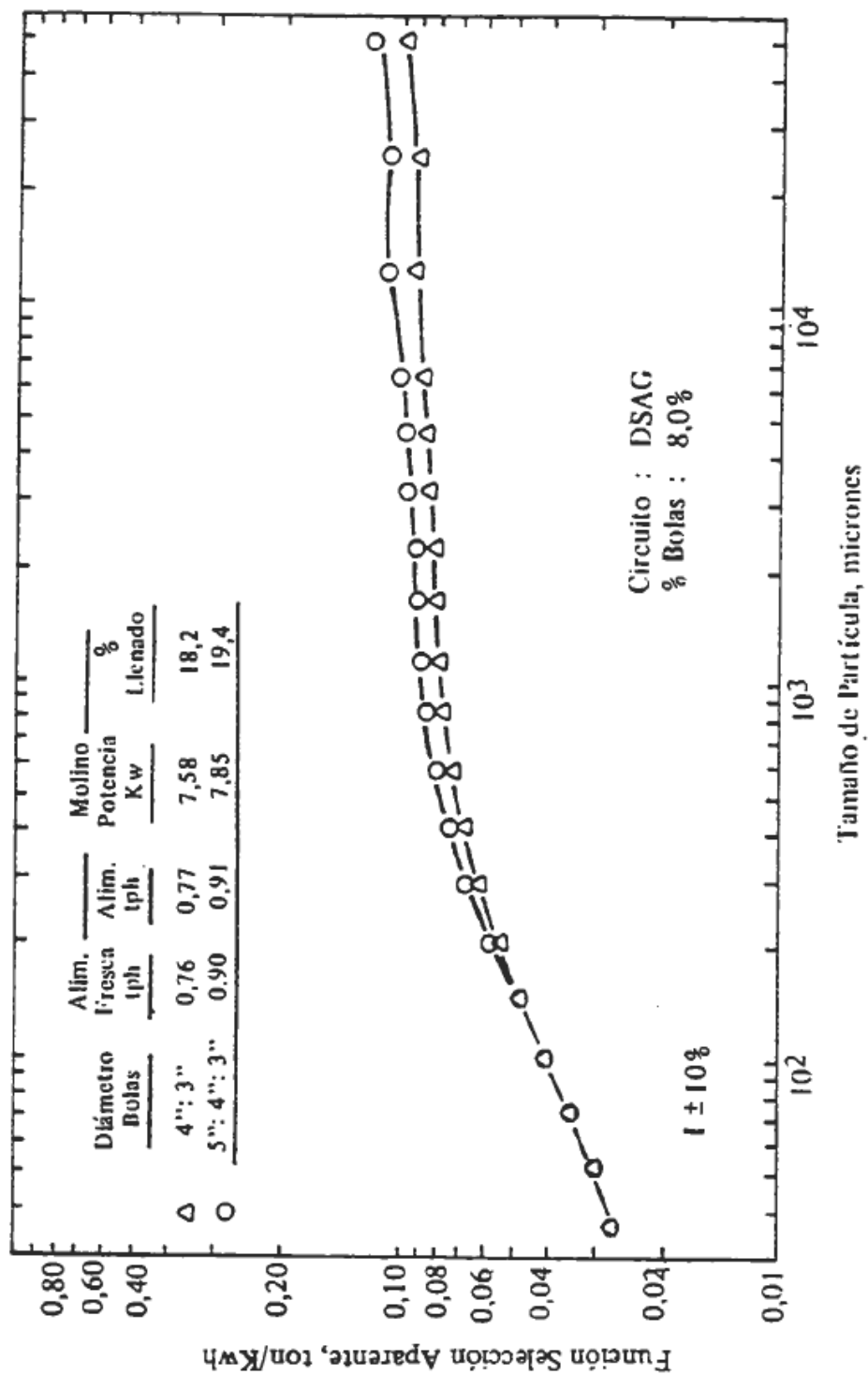


Figura 51. Efecto del diámetro de las bolas sobre la función selección específica ^[7]

Anexo B. Manual de Procedimiento Muestreos Correas 2 y 3

Minera candelaria

Manual de Procedimiento Gerencia Concentradora

“Muestreo de Correas CV-02 y CV-03”

COMpr059_3

Revisión	Fecha	Preparó	Revisó	Aprobó	Autorizó
3	07.03.17	C. Gahona Metalurgista Junior	R. Barrera Metalurgista Senior V. Carmona Ing. Senior Medio Ambiente R. Rivera Sup. Prevención Riesgos	H. Jiménez Superintendente Metalurgia Concentradora G. Burgos Gerente Prevención de Riesgos H. Espejo Gerente Medio Ambiente	M. Gironás Gerente Concentradora

Este documento debe ser revisado para actualizarlo, de acuerdo al desarrollo de las operaciones y/o cuando se produzcan modificaciones en la legislación.

1. OBJETIVO

- 1.1. El objetivo de este trabajo es determinar mediante la obtención de una muestra representativa, la granulometría del mineral recibido por la correa el cual proviene de la mina.

2. ALCANCE

- 2.1. El presente procedimiento es aplicable a todo el Personal del Departamento Metalurgia y Operaciones, que haya sido instruido en esta actividad, así como también, todo aquél personal que de alguna manera tenga que realizar y/o apoyar en el desarrollo de esta labor.

3. DOCUMENTOS RELACIONADOS

- 3.1. Reglamento de Bloqueo, Tarjeteo y Prueba en Intervención de Equipos e Instalaciones (PSArg0011-2)
- 3.2. Procedimiento Aviso en caso de Emergencia (PSErg002-4)
- 3.3. Procedimiento de Buenas Prácticas Ambientales (PMArg002-7)
- 3.4. Procedimiento de Identificación de Peligros y Evaluación y control de Riesgos Operacionales (PSAr020-2)

4. DEFINICIONES

- 4.1. **Muestra:** Cantidad representativa de material para hacer análisis químico y metalúrgico.
- 4.2. **Granulometría:** Puede definirse como "la relación de porcentajes en que se encuentran los distintos tamaños de material de una roca respecto del total".

5. RESPONSABILIDADES

5.1. Supervisores

- 5.1.1. Supervisor de Operaciones, es responsable de programar el sector que se muestreará.
- 5.1.2. Verificar que se cuente con los recursos adecuados para la aplicación correcta de la tarea a ejecutar.
- 5.1.3. Conocer, instruir, cumplir y hacer cumplir las disposiciones estipuladas en el presente procedimiento.
- 5.1.4. Planificar la tarea junto a las personas que realizarán el muestreo.
- 5.1.5. Asegurar que se cumplan todas las medidas de protección personal y medio ambiente establecidas en este procedimiento.
- 5.1.6. Proporcionar materiales a usar.
- 5.1.7. Coordinar con personal de Operaciones día y hora en que se realizará el muestreo.

5.2. Operadores y/o Técnicos Metalurgistas

- 5.2.1. Utilizar los elementos de protección personal correspondiente.
- 5.2.2. Preparar los materiales a utilizar.
- 5.2.3. Dar aviso al Supervisor de Control y Operador del Área el momento de iniciar la tarea.
- 5.2.4. Informar al Supervisor a cargo de la tarea, de manera inmediata cualquier anomalía detectada.

5.2.5. Dar fiel cumplimiento al presente procedimiento y cualquier otra disposición que guarde relación con el tema.

5.3. General

5.3.1. Las situaciones no consideradas en el presente procedimiento, deben ser evaluadas por el supervisor del área, el operador y las personas involucradas, quienes determinarán la forma correcta de continuar con el trabajo. En tal caso deberá realizar la identificación del riesgo y confeccionar el análisis de riesgo operacional (ARO) o procedimiento de trabajo seguro, el cual debe considerar todas las medidas de control a los riesgos identificados e informar a todo el personal involucrado.

6. MODO OPERATIVO

6.1. RECURSOS

6.1.1. Equipos de seguridad básico <ul style="list-style-type: none"> • Casco • Lentes • Zapatos de seguridad • Guantes de Operador • Protector auditivo 	6.1.2. Equipos y materiales de apoyo <ul style="list-style-type: none"> • Bolsas (o tambores) para recolectar la muestra • Radio Portátil • Cargador Frontal
6.1.3. Equipo de seguridad específico <ul style="list-style-type: none"> • Arnés • Protector respiratorio para polvo 	6.1.4. Herramientas <ul style="list-style-type: none"> • Palas • Escobillón
6.1.5. Humanos <ul style="list-style-type: none"> • Personal Depto. Metalurgia, Operaciones o personal contratista • Operador Cargador Frontal 	

6.2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS Y RIESGOS POTENCIALES

PELIGRO	RIESGO	CONTROL
Ruido	Pérdida de la audición	Uso de protector auditivo.
Distinto niveles Piso irregular de la carga sobre la correa	Caída a igual o distinto nivel, con consecuencia herida y/o fractura	Uso de vías de tránsito definidas, uso adecuado de escalas, concentración en la tarea, utilizar los tres puntos de apoyo.
Estructuras	Golpeador por	Ojos en el camino, concentración en la tarea.

6.3. DESARROLLO

6.3.1. Preparar los materiales necesarios para el muestreo (bolsas o tambores, palas, cargador frontal).

6.3.2. Avisar y coordinar con el Supervisor de Control y operador del área el mejor momento para realizar la tarea.

6.3.3. Dirigirse al área de muestreo con todos los materiales necesarios.

- 6.3.4. El metalurgista o técnico metalurgista procederá una vez recibida la instrucción de la sala de control a tirar del pullcord para detener la correa.
- 6.3.5. Una vez detenida la correa, procederá a dirigirse a la sala eléctrica donde previa verificación de la normativa LOTOTO bloquearán la correa que se muestreará todos quienes deberán subir a la correa para realizar la recolección de muestras.
- 6.3.6. El técnico metalurgista dirigirá la posición del cargador frontal.
- 6.3.7. Subirán a la correa solo las personas previamente definidas y que hayan bloqueado, y procederán a retirar el mineral desde la correa y echarán este al cargador frontal usando para ello las palas, las rocas de mayor tamaño podrán ser cargadas en forma manual al cargador frontal. La cantidad de mineral recolectado será de 10 metros para CV-02 y 3 metros para CV-03.
- 6.3.8. Finalizada la recolección de la muestra, se deben retirar los bloqueos y avisar al Operador del Área y Supervisor de Control.
- 6.3.9. Retirar las muestras del área de manera ordenada y tranquila. En lo posible, las bolsas o tambores de colección de las muestras deben ser identificadas antes de comenzar el muestreo. Si lo anterior no es posible deben identificarse antes de ser retiradas.
- 6.3.10. Todos los equipos de apoyo deberán ser guardados en sus lugares correspondientes una vez terminada la tarea.

6.4. MEDIO AMBIENTE

- 6.4.1. Se debe mantener una actitud proactiva respecto a la protección del medio ambiente.
- 6.4.2. Conservar el espacio de trabajo limpio y depositar la basura en los lugares habilitados para tal efecto.
- 6.4.3. Se deben reportar los incidentes ambientales que puedan ocurrir durante la realización de la tarea.
- 6.4.4. Una vez realizado el Análisis Granulométrico, la muestra deberá ser depositada a un costado del Stock Pile.
- 6.4.5. **MANEJO DE RESIDUOS**
- 6.4.5.1. Se deben identificar y separar los residuos de acuerdo a sus características.

Residuo	Clasificación	Disposición temporal	Disposición final
Muestra	N/A	Bolsas o tambores	Stockpile

7. EMERGENCIAS

- 7.1. Ante emergencias o accidentes que comprometan la integridad física de las personas se deberá proceder de acuerdo al Procedimiento de aviso en caso de Emergencias” vigente en la Compañía, respecto de avisos y alarmas (Radio transmisor presionando botón rojo durante 3 segundos, teléfono 1555, gaitronic línea 5 y celular 461555).

Anexo C. PI Server



Figura 52. PI Server Circuito Molienda Línea 1

Anexo D. Datos PI SAG-1

Tabla 27. Códigos PI y Flujos de Descarga y Sobretamaño SAG-1, Muestreo 2011.

	Descarga SAG	Sobretamaño SAG
	Código PI	
	412I001_SP	43WI008
Fecha y Hora	Flujo, t/h	
07/10/11 13:15	1637,6	234,9
07/10/11 13:30	1650,6	344,4
07/10/11 13:45	1820,1	326,5
07/10/11 14:00	1580,0	363,3
07/10/11 14:15	1535,9	307,8
07/10/11 14:30	1714,2	301,7
07/10/11 14:45	1541,4	292,4
07/10/11 15:00	1751,5	453,5
07/10/11 15:15	7,1	0,0
07/10/11 15:30	6,3	0,0
07/10/11 15:45	5,6	0,0
07/10/11 16:00	4,8	0,0
07/10/11 16:15	17,5	0,0

Tabla 28. Códigos PI y Flujos de Descarga y Sobretamaño SAG-1, Muestreo 2015.

	Descarga SAG	Sobretamaño SAG
	Código PI	
	412I001_SP	43WI008
Fecha y Hora	Flujo, t/h	
28/10/15 10:45	2277,9	220,3
28/10/15 11:00	2272,7	235,8
28/10/15 11:15	2329,2	267,0
28/10/15 11:30	2357,0	254,5
28/10/15 11:45	2006,1	236,3
28/10/15 12:00	2301,9	321,0
28/10/15 12:15	2104,3	312,7
28/10/15 12:30	2317,3	227,0
28/10/15 12:45	16,1	0,0
28/10/15 13:00	6,4	0,0
28/10/15 13:15	2,6	28,3

Anexo E. Distribución Granulométrica SAG, Muestras 2011 y 2015

Tabla 29. Distribución Granulométrica SAG-1 Muestreo 2011.

	i	Mesh	Mid Size	Size Distributions, % Passing			
				Feed exp	Feed sim	Discharge exp	Discharge sim
1	10"	254000		100	100	100	100.00
2	8"	203200	227185	95.23	95.23	100	100.00
3	6"	152400	175976	90.51	90.51	100	100.00
4	5"	127000	139122	85.14	85.14	100	100.00
5	4"	101600	113592	77.67	77.67	100	100.00
6	3"	76200	87988	74.33	74.33	98.21	98.24
7	2 1/2"	63500	69561	71.68	71.68	97.52	96.49
8	2"	50800	56796	67.76	67.76	95.55	93.70
9	1 1/2"	38100	43994	65.43	65.43	93.07	90.81
10	1"	25400	31109	54.11	54.11	88.87	85.43
11	3/4"	19050	21997	47.21	47.21	84.46	82.13
12	1/2"	12700	15554	37.91	37.91	82.03	77.80
13	3/8"	9525	10999	33.55	33.55	80.64	74.53
14	1/4"	6350	7777	24.68	24.68	72.95	68.87
15	6#	3350	4612	17.89	17.89	61.74	59.73
16	8#	2360	2812	15.51	15.51	53.89	53.98
17	14#	1180	1669	11.67	11.67	42.1	43.36
18	20#	850	1001	10.36	10.36	37.36	38.41
19	35#	425	601	8.01	8.01	28.87	29.55
20	48#	300	357	7.02	7.02	25.42	25.63
21	100#	150	212	5.48	5.48	19.81	19.41
22	150#	106	126	4.77	4.77	17.14	16.77
23	200#	75	89	4.21	4.21	15.05	14.55
24	270#	53	63	3.68	3.68	13.15	12.60
25	325#	45	49	3.44	3.44	12.45	11.76
26	-325#	0	23	0.00	0.00	0.00	0.00
D80, microns				109165.9	109165.9	9222.8	15649.27

Tabla 30. Distribución Granulométrica SAG-1 Muestreo 2015.

	i	Mesh	Mid Size	Size Distributions, % Passing			
				Feed exp	Feed sim	Discharge exp	Discharge sim
1	8 "	203200		100.00	100.00	100.00	100.00
2	7 "	177800	190076	92.31	92.31	100.00	100.00
3	6 "	152400	164611	89.27	89.27	100.00	100.00
4	5 "	127000	139122	84.94	84.94	100.00	100.00
5	4"	101600	113592	79.32	79.32	100.00	100.00
6	3"	76200	87988	71.55	71.55	99.41	97.43
7	2 "	50800	62217	58.27	58.27	97.96	93.43
8	1 ½"	38100	43994	49.01	49.01	96.76	91.34
9	1"	25400	31109	37.33	37.33	94.90	89.61
10	¾"	19050	21997	30.59	30.59	92.70	88.37
11	½"	12700	15554	22.18	22.18	90.68	86.65
12	¼"	6350	8980	12.77	12.77	83.52	83.32
13	4#	4757	5496	10.00	10.00	79.08	79.75
14	6#	3364	4000	7.42	7.42	73.47	74.70
15	12#	1682	2378	2.99	2.99	63.56	65.46
16	16#	1189	1414	2.24	2.24	57.01	58.25
17	20#	841	1000	1.64	1.64	51.67	51.59
18	30#	595	707	1.21	1.21	46.34	45.70
19	40#	420	500	0.89	0.89	41.47	40.61
20	50#	297	354	0.65	0.65	36.74	36.25
21	100#	149	210	0.35	0.35	29.69	28.94
22	140#	105	125	0.26	0.26	26.38	25.11
23	200#	74	88	0.19	0.19	23.07	21.77
24	270#	53	63	0.00	0.00	18.61	18.57
25	325#	44	48	0.00	0.00	17.44	17.14
26	-325#	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
D80, microns				104470.1	104470.1	5056.8	4855.7

Anexo F. Utilities_Mixer Moly-Cop Tools

Tabla 31. Planilla Mixer para descarga SAG-1, muestreo 2011.

Dry Feed, ton/hr				Input 1	Input 2	Output
				328.05	1325.85	1653.90
	i	Mesh	Mid Size	Size Distributions, % Passing		
1	10"	254000		100.00	100.00	100.00
2	8"	203200	227185	100.00	100.00	100.00
3	6"	152400	175976	100.00	100.00	100.00
4	5"	127000	139122	100.00	100.00	100.00
5	4"	101600	113592	100.00	100.00	100.00
6	3"	76200	87988	100.00	94.86	99.41
7	2 1/2"	63500	69561	100.00	82.33	97.96
8	2"	50800	56796	100.00	71.90	96.76
9	1 1/2"	38100	43994	100.00	55.82	94.90
10	1"	25400	31109	100.00	36.79	92.70
11	3/4"	19050	21997	100.00	19.25	90.68
12	1/2"	12700	15554	94.42	0.00	83.52
13	3/8"	9525	10999	89.40	0.00	79.08
14	1/4"	6350	7777	83.06	0.00	73.47
15	6#	3350	4612	71.85	0.00	63.56
16	8#	2360	2812	64.45	0.00	57.01
17	14#	1180	1669	58.42	0.00	51.67
18	20#	850	1001	52.39	0.00	46.34
19	35#	425	601	46.89	0.00	41.47
20	48#	300	357	41.54	0.00	36.74
21	100#	150	212	33.56	0.00	29.69
22	150#	106	126	29.82	0.00	26.38
23	200#	75	89	26.08	0.00	23.07
24	270#	53	63	21.04	0.00	18.61
25	325#	45	49	19.72	0.00	17.44
26	-325#	0	23	0.00	0.00	0.00
D80, microns				2810	47793	5057

Tabla 32. Planilla Mixer para Descarga SAG-1 Muestreo 2015.

Dry Feed, ton/hr				Input 1	Input 2	Output
				1986.48	259.32	2245.80
	i	Mesh	Mid Size	Size Distributions, % Passing		
1	8 "	203200		100.00	100.00	100.00
2	7 "	177800	190076	100.00	100.00	100.00
3	6 "	152400	164611	100.00	100.00	100.00
4	5 "	127000	139122	100.00	100.00	100.00
5	4"	101600	113592	100.00	100.00	100.00
6	3"	76200	87988	100.00	94.86	99.41
7	2 "	50800	62217	100.00	82.33	97.96
8	1 ½"	38100	43994	100.00	71.90	96.76
9	1"	25400	31109	100.00	55.82	94.90
10	¾"	19050	21997	100.00	36.79	92.70
11	½"	12700	15554	100.00	19.25	90.68
12	¼"	6350	8980	94.42	0.00	83.52
13	4#	4757	5496	89.40	0.00	79.08
14	6#	3364	4000	83.06	0.00	73.47
15	12#	1682	2378	71.85	0.00	63.56
16	16#	1189	1414	64.45	0.00	57.01
17	20#	841	1000	58.42	0.00	51.67
18	30#	595	707	52.39	0.00	46.34
19	40#	420	500	46.89	0.00	41.47
20	50#	297	354	41.54	0.00	36.74
21	100#	149	210	33.56	0.00	29.69
22	140#	105	125	29.82	0.00	26.38
23	200#	74	88	26.08	0.00	23.07
24	270#	53	63	21.04	0.00	18.61
25	325#	44	48	19.72	0.00	17.44
26	-325#	0	22	0.00	0.00	0.00
D80, microns				2810	47793	5057

Anexo G. SAGSim_Open Moly-Cop Tools

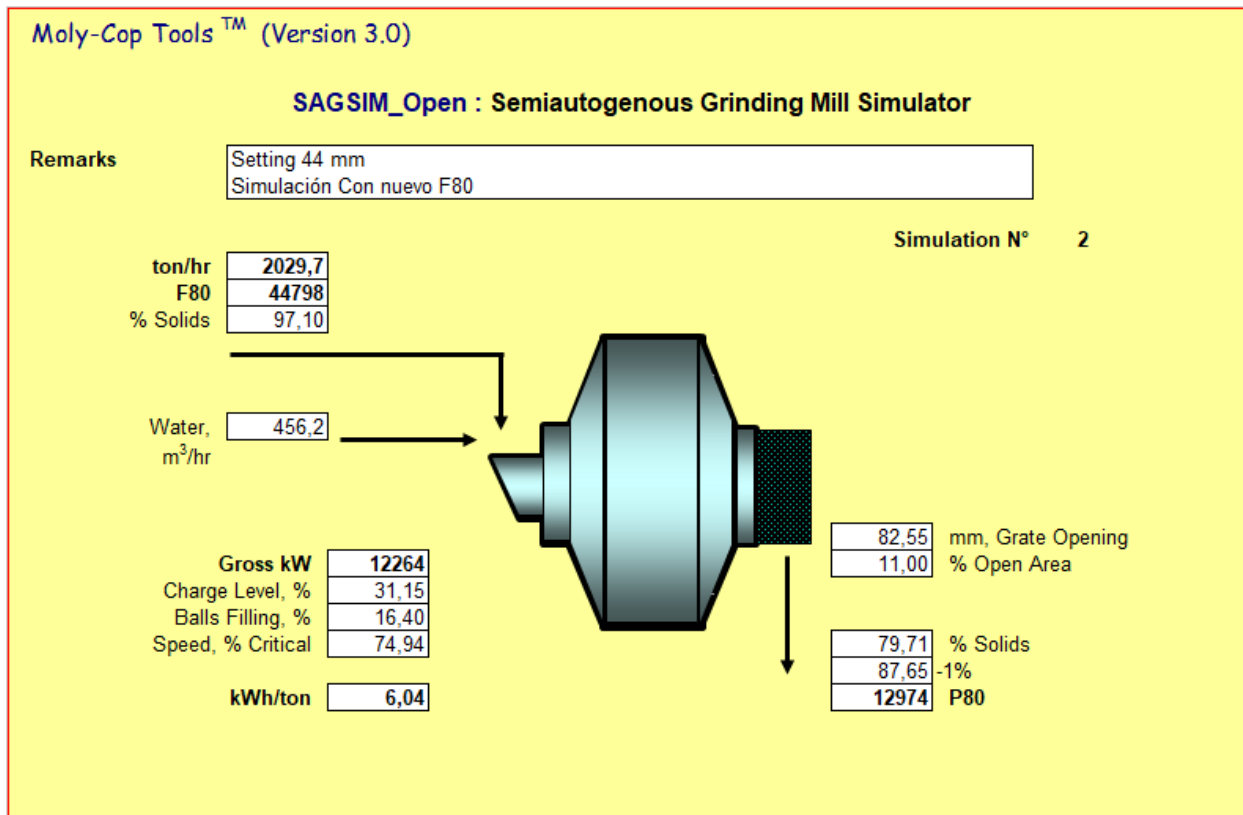


Figura 53. Flowsheet Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm, SAGSIM_Open MolyCop Tools

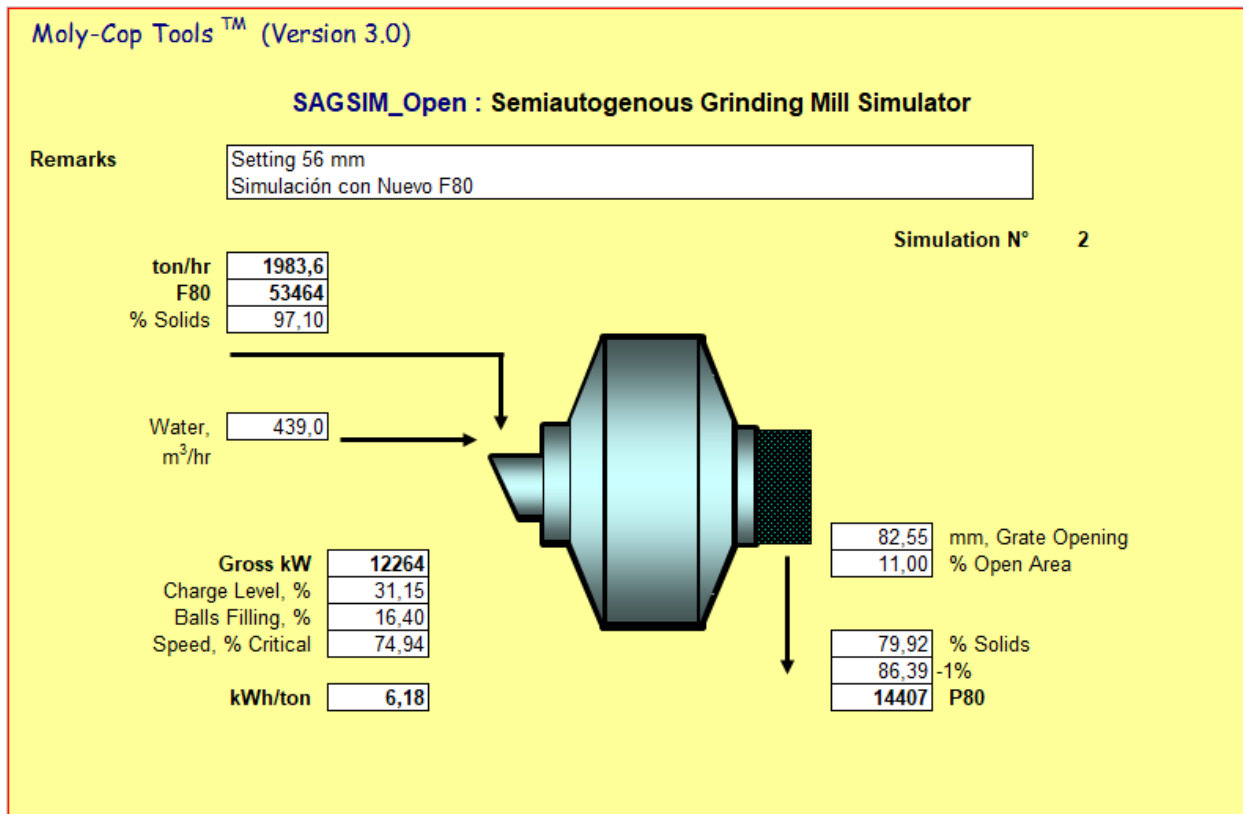


Figura 54. Flowsheet Simulación para SAG con Pre-chancado CSS 50mm, SAGSIM_Open MolyCop Tools

Anexo H. ScreenSim_Single Moly-Cop Tools

Tabla 33. Simulación Harnero Vibratorio para SAG con Pre-chancado CSS 44 mm.

	i	Dry Feed, ton/hr		Feed	O'size	U'size	Screen Efficiency
		Mesh	Mid Size	2029.71	469.40	1560.31	
1	10"	254000		100,00	100,00	100,00	
2	8"	203200	227185	100,00	100,00	100,00	1,000
3	6"	152400	175976	100,00	100,00	100,00	1,000
4	5"	127000	139122	100,00	100,00	100,00	1,000
5	4"	101600	113592	100,00	100,00	100,00	1,000
6	3"	76200	87988	99,20	96,54	100,00	1,000
7	2 1/2"	63500	69561	98,14	91,95	100,00	1,000
8	2"	50800	56796	96,07	82,99	100,00	1,000
9	1 1/2"	38100	43994	93,16	70,41	100,00	1,000
10	1"	25400	31109	87,65	46,61	100,00	1,000
11	3/4"	19050	21997	84,22	31,78	100,00	1,000
12	1/2"	12700	15554	79,77	12,53	100,00	1,000
13	3/8"	9525	10999	76,38	5,93	97,58	0,451
14	1/4"	6350	7777	70,56	2,34	91,08	0,142
15	6#	3350	4612	61,14	1,40	79,11	0,023
16	8#	2360	2812	55,22	1,21	71,47	0,008
17	14#	1180	1669	44,31	0,96	57,35	0,005
18	20#	850	1001	39,23	0,85	50,77	0,005
19	35#	425	601	30,17	0,65	39,05	0,005
20	48#	300	357	26,17	0,57	33,87	0,005
21	100#	150	212	19,82	0,43	25,65	0,005
22	150#	106	126	17,14	0,37	22,19	0,005
23	200#	75	89	14,88	0,32	19,26	0,005
24	270#	53	63	12,90	0,28	16,70	0,005
25	325#	45	49	12,05	0,26	15,60	0,005
26	-325#	0	23	0,00	0,00	0,00	0,005
D80, microns				12974	47643	3524	

Tabla 34. Simulación Harnero Vibratorio para SAG con Pre-chancado CSS 50 mm.

Dry Feed, ton/hr				Feed	O'size	U'size	
				2007.58	476.35	1531.23	
	i	Mesh	Mid Size	Size Distributions, % Passing			Screen Efficiency
1	10"	254000		100,00	100,00	100,00	
2	8"	203200	227185	100,00	100,00	100,00	1,000
3	6"	152400	175976	100,00	100,00	100,00	1,000
4	5"	127000	139122	100,00	100,00	100,00	1,000
5	4"	101600	113592	100,00	100,00	100,00	1,000
6	3"	76200	87988	99,07	96,07	100,00	1,000
7	2 1/2"	63500	69561	97,84	90,88	100,00	1,000
8	2"	50800	56796	95,50	81,02	100,00	1,000
9	1 1/2"	38100	43994	92,44	68,14	100,00	1,000
10	1"	25400	31109	86,93	44,93	100,00	1,000
11	3/4"	19050	21997	83,54	30,63	100,00	1,000
12	1/2"	12700	15554	79,14	12,08	100,00	1,000
13	3/8"	9525	10999	75,79	5,72	97,59	0,451
14	1/4"	6350	7777	70,03	2,27	91,10	0,142
15	6#	3350	4612	60,70	1,36	79,16	0,023
16	8#	2360	2812	54,83	1,17	71,53	0,008
17	14#	1180	1669	44,01	0,93	57,41	0,005
18	20#	850	1001	38,97	0,82	50,84	0,005
19	35#	425	601	29,98	0,63	39,11	0,005
20	48#	300	357	26,01	0,55	33,93	0,005
21	100#	150	212	19,70	0,42	25,69	0,005
22	150#	106	126	17,04	0,36	22,23	0,005
23	200#	75	89	14,79	0,31	19,30	0,005
24	270#	53	63	12,82	0,27	16,72	0,005
25	325#	45	49	11,97	0,25	15,62	0,005
26	-325#	0	23	0,00	0,00	0,00	0,005
D80, microns				13772	49744	3515	

Tabla 35. Simulación Harnero Vibratorio para SAG con Pre-chancado CSS 56 mm.

Dry Feed, ton/hr				Feed	O'size	U'size	
				1983.63	479.54	1504.09	
	i	Mesh	Mid Size	Size Distributions, % Passing			Screen Efficiency
1	10"	254000		100.00	100.00	100.00	
2	8"	203200	227185	100.00	100.00	100.00	1.000
3	6"	152400	175976	100.00	100.00	100.00	1.000
4	5"	127000	139122	100.00	100.00	100.00	1.000
5	4"	101600	113592	100.00	100.00	100.00	1.000
6	3"	76200	87988	98.93	95.56	100.00	1.000
7	2 1/2"	63500	69561	97.54	89.80	100.00	1.000
8	2"	50800	56796	94.98	79.24	100.00	1.000
9	1 1/2"	38100	43994	91.87	66.36	100.00	1.000
10	1"	25400	31109	86.39	43.70	100.00	1.000
11	3/4"	19050	21997	83.03	29.81	100.00	1.000
12	1/2"	12700	15554	78.67	11.76	100.00	1.000
13	3/8"	9525	10999	75.35	5.58	97.60	0.451
14	1/4"	6350	7777	69.63	2.21	91.12	0.142
15	6#	3350	4612	60.37	1.32	79.20	0.023
16	8#	2360	2812	54.55	1.14	71.57	0.008
17	14#	1180	1669	43.79	0.91	57.47	0.005
18	20#	850	1001	38.78	0.80	50.89	0.005
19	35#	425	601	29.84	0.62	39.16	0.005
20	48#	300	357	25.89	0.54	33.97	0.005
21	100#	150	212	19.61	0.41	25.73	0.005
22	150#	106	126	16.96	0.35	22.25	0.005
23	200#	75	89	14.72	0.30	19.32	0.005
24	270#	53	63	12.76	0.26	16.74	0.005
25	325#	45	49	11.92	0.25	15.64	0.005
26	-325#	0	23	0.00	0.00	0.00	0.005
D80, microns				14407	51677	3508	

Anexo I. Diferencias Perfil de Descarga

Tabla 36. Perfil de Descarga Operacional y Ajustado SAG-1 Muestreo 2011.

	i	Mesh	Mid Size	Mill Discharge	
				Operational	Adjusted
1	10"	254000		100,00	100,00
2	8"	203200	227185	100,00	100,00
3	6"	152400	175976	100,00	100,00
4	5"	127000	139122	100,00	100,00
5	4"	101600	113592	100,00	100,00
6	3"	76200	87988	98,21	98,24
7	2 1/2"	63500	69561	97,52	96,49
8	2"	50800	56796	95,55	93,70
9	1 1/2"	38100	43994	93,07	90,81
10	1"	25400	31109	88,87	85,43
11	3/4"	19050	21997	84,46	82,13
12	1/2"	12700	15554	82,03	77,80
13	3/8"	9525	10999	80,64	74,53
14	1/4"	6350	7777	72,95	68,87
15	6#	3350	4612	61,74	59,73
16	8#	2360	2812	53,89	53,98
17	14#	1180	1669	42,10	43,36
18	20#	850	1001	37,36	38,41
19	35#	425	601	28,87	29,55
20	48#	300	357	25,42	25,63
21	100#	150	212	19,81	19,41
22	150#	106	126	17,14	16,77
23	200#	75	89	15,05	14,55
24	270#	53	63	13,15	12,60
25	325#	45	49	12,45	11,76
26	-325#	0	23	0,00	0,00
D80, microns				9223	15649

Anexo J. Distribución Granulométrica SAG con Pre-chancado

Tabla 37. Distribución Granulométrica para SAG con Pre-chancado de Distintos Settings.

	i	Mesh	CSS 44 mm		CSS 50 mm		CSS 56mm	
			Feed	Discharge	Feed	Discharge	Feed	Discharge
			Size Distributions, % Passing					
1	10"	254000	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	8"	203200	98.13	100.00	98.13	100.00	98.13	100.00
3	6"	152400	96.09	100.00	96.09	100.00	96.09	100.00
4	5"	127000	94.42	100.00	94.42	100.00	94.38	100.00
5	4"	101600	91.23	100.00	91.15	100.00	90.89	100.00
6	3"	76200	89.36	99.20	88.62	99.07	87.69	98.93
7	2 1/2"	63500	86.97	98.14	85.69	97.84	84.29	97.54
8	2"	50800	82.56	96.07	80.62	95.50	78.77	94.98
9	1 1/2"	38100	76.82	93.16	74.79	92.44	73.13	91.87
10	1"	25400	61.31	87.65	59.84	86.93	58.77	86.39
11	3/4"	19050	52.01	84.22	51.04	83.54	50.36	83.03
12	1/2"	12700	40.69	79.77	40.20	79.14	39.87	78.67
13	3/8"	9525	35.40	76.38	35.11	75.79	34.90	75.35
14	1/4"	6350	25.94	70.56	25.79	70.03	25.68	69.63
15	6#	3350	18.65	61.14	18.58	60.70	18.53	60.37
16	8#	2360	16.14	55.22	16.09	54.83	16.05	54.55
17	14#	1180	12.14	44.31	12.11	44.01	12.08	43.79
18	20#	850	10.77	39.23	10.75	38.97	10.72	38.78
19	35#	425	8.35	30.17	8.33	29.98	8.31	29.84
20	48#	300	7.34	26.17	7.31	26.01	7.30	25.89
21	100#	150	5.74	19.82	5.72	19.70	5.71	19.61
22	150#	106	5.02	17.14	5.00	17.04	4.99	16.96
23	200#	75	4.44	14.88	4.42	14.79	4.41	14.72
24	270#	53	3.89	12.90	3.87	12.82	3.86	12.76
25	325#	45	3.65	12.05	3.63	11.97	3.62	11.92
26	-325#	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
D80, microns			44798	12974	49310	13772	53464	14407

Anexo K. Efecto Nivel de Bola en Potencia Consumida

Tabla 38. Efecto de Bola en la Potencia Consumida SAG para distintos Niveles de Carga.

Jc (%)	Jb (%)	Gross (kW)
29	15	11723.4
29	16	12041.8
29	17	12360.2
29	18	12678.7
30	15	11778.6
30	16	12092.1
30	17	12405.6
30	18	12719.2
31	15	11826.4
31	16	12135.1
31	17	12443.7
31	18	12752.3
32	15	11826.4
32	16	12135.1
32	17	12443.7
32	18	12752.3
33	15	11899.9
33	16	12198.8
33	17	12497.6
33	18	12796.4
34	15	11925.6
34	16	12219.5
34	17	12513.4
34	18	12807.3
35	15	11943.9
35	16	12233.0
35	17	12521.9
35	18	12810.9
36	15	11955.0
36	16	12238.9
36	17	12523.0
36	18	12807.1

Anexo L. Efecto Nivel de Bola en Rendimiento Horario

Tabla 39. Efecto del Nivel de Bola en Rendimiento Horario SAG con Pre-chancado de Distintos Dettings.

Jc (%)	Jb (%)	CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
		Fresh Feedrate, ton/hr		
30	16	1996.9	1975.1	1951.4
30	17	2026.1	2003.4	1978.6
30	18	2052.1	2028.7	2002.9
30	19	2074.7	2050.6	2023.7
30	20	2093.3	2068.6	2040.7
30	21	2107.1	2081.9	2053.0
30	22	2115.4	2089.8	2060.1
30	23	2117.0	2091.1	2060.7
31	16	2014.8	1993.0	1969.5
31	17	2044.9	2022.3	1997.7
31	18	2072.4	2049.0	2023.3
31	19	2096.7	2072.6	2045.9
31	20	2117.5	2092.8	2065.1
31	21	2134.3	2109.0	2080.3
31	22	2146.4	2120.6	2091.0
31	23	2152.9	2126.7	2096.3
31	24	2152.6	2126.2	2095.1
32	16	2030.5	2008.7	1985.4
32	17	2061.4	2038.9	2014.4
32	18	2089.9	2066.6	2041.1
32	19	2115.6	2091.6	2065.1
32	20	2138.3	2113.6	2086.0
32	21	2157.4	2132.1	2103.6
32	22	2172.5	2146.6	2117.2
32	23	2182.8	2156.5	2126.2
32	24	2187.6	2160.9	2129.8
32	25	2185.7	2158.8	2127.1
33	16	2044.1	2022.4	1999.2
33	17	2075.6	2053.2	2028.9
33	18	2104.9	2081.7	2056.4
33	19	2131.8	2107.9	2081.6
33	20	2156.0	2131.3	2104.0
33	21	2177.0	2151.7	2123.4
33	22	2194.5	2168.6	2139.3
33	23	2207.9	2181.5	2151.4
33	24	2216.6	2189.8	2158.8
33	25	2219.7	2192.6	2160.9
33	26	2216.1	2188.8	2156.5
34	16	2055.7	2034.1	2011.1
34	17	2087.7	2065.3	2041.3

34	18	2117.7	2094.5	2069.5
34	19	2145.5	2121.6	2095.5
34	20	2170.8	2146.2	2119.1
34	21	2193.4	2168.1	2140.0
34	22	2212.8	2187.0	2157.9
34	23	2228.7	2202.3	2172.4
34	24	2240.6	2213.7	2182.9
34	25	2247.7	2220.4	2188.8
34	26	2249.2	2221.7	2189.4
34	27	2244.0	2216.4	2183.5
35	16	2065.4	2044.0	2021.1
35	17	2097.7	2075.5	2051.7
35	18	2128.2	2105.2	2080.4
35	19	2156.7	2133.0	2107.1
35	20	2183.0	2158.5	2131.7
35	21	2206.8	2181.7	2153.8
35	22	2227.9	2202.1	2173.3
35	23	2245.8	2219.4	2189.7
35	24	2260.2	2233.3	2202.7
35	25	2270.6	2243.2	2211.8
35	26	2276.2	2248.5	2216.3
35	27	2276.2	2248.3	2215.4
35	28	2269.5	2241.5	2208.1
36	16	2073.3	2051.9	2029.3
36	17	2105.8	2083.7	2060.1
36	18	2136.7	2113.8	2089.2
36	19	2165.7	2142.1	2116.5
36	20	2192.8	2168.4	2141.8
36	21	2217.6	2192.6	2165.0
36	22	2240.0	2214.3	2185.8
36	23	2259.6	2233.3	2203.8
36	24	2276.0	2249.2	2218.8
36	25	2289.0	2261.7	2230.5
36	26	2297.9	2270.1	2238.1
36	27	2302.0	2274.0	2241.2
36	28	2300.6	2272.3	2239.0

Anexo M. Efecto Flujo de Alimentación en Nivel de Carga

Tabla 40. Efecto de Flujo de Alimentación en Nivel de Carga SAG con Pre-chancado de distintos Settings.

Jb (%)	Jc (%)	CSS 44 mm	CSS 50 mm	CSS 56 mm
		Fresh Feedrate, ton/hr		
16	29	1976.7	1954.8	1930.9
16	30	1996.9	1975.1	1951.4
16	31	2014.8	1993.0	1969.5
16	32	2030.5	2008.7	1985.4
16	33	2044.1	2022.4	1999.2
16	34	2055.7	2034.1	2011.1
16	35	2065.4	2044.0	2021.1
16	36	2073.3	2051.9	2029.3
16	37	2079.4	2058.2	2035.8
16	38	2083.7	2062.7	2040.5
16	39	2086.4	2065.5	2043.5
16	40	2087.4	2066.6	2044.9
16	41	2086.8	2066.2	2044.7
17	29	2004.6	1981.9	1956.9
17	30	2026.1	2003.4	1978.6
17	31	2044.9	2022.3	1997.7
17	32	2061.4	2038.9	2014.4
17	33	2075.6	2053.2	2028.9
17	34	2087.7	2065.3	2041.3
17	35	2097.7	2075.5	2051.7
17	36	2105.8	2083.7	2060.1
17	37	2112.0	2090.1	2066.7
17	38	2116.4	2094.6	2071.5
17	39	2119.1	2097.4	2074.5
17	40	2120.0	2098.5	2075.8
17	41	2119.2	2097.9	2075.5
18	29	2029.0	2005.6	1979.5
18	30	2052.1	2028.7	2002.9
18	31	2072.4	2049.0	2023.3
18	32	2089.9	2066.6	2041.1
18	33	2104.9	2081.7	2056.4
18	34	2117.7	2094.5	2069.5
18	35	2128.2	2105.2	2080.4
18	36	2136.7	2113.8	2089.2
18	37	2143.2	2120.4	2096.1
18	38	2147.7	2125.1	2101.0
18	39	2150.4	2128.0	2104.2
18	40	2151.4	2129.1	2105.5
18	41	2150.5	2128.5	2105.2

Anexo N. Efecto Nivel de Carga en Potencia Consumida

Tabla 41. Efecto del Nivel de Carga en la Potencia Consumida SAG.

Jb (%)	Jc (%)	Potencia (kW)
16	29	12041.8
16	30	12092.1
16	31	12135.0
16	32	12170.6
16	33	12198.7
16	34	12219.5
16	35	12232.9
16	36	12238.9
16	37	12237.6
16	38	12228.8
16	39	12212.7
16	40	12189.1
16	41	12158.2
16.92	29	12334.8
16.92	30	12380.6
16.92	31	12419.0
16.92	32	12450.0
16.92	33	12473.6
16.92	34	12489.9
16.92	35	12498.8
16.92	36	12500.3
16.92	37	12494.4
16.92	38	12481.1
16.92	39	12460.5
16.92	40	12432.4
16.92	41	12397.0
17	29	12360.2
17	30	12405.6
17	31	12443.7
17	32	12474.3
17	33	12497.5
17	34	12513.4
17	35	12521.9
17	36	12523.0
17	37	12516.7
17	38	12503.1
17	39	12482.0
17	40	12453.6
17	41	12417.8
18	29	12678.7
18	30	12719.2

18	31	12752.3
18	32	12778.0
18	33	12796.3
18	34	12807.3
18	35	12810.9
18	36	12807.1
18	37	12795.9
18	38	12777.3
18	39	12751.4
18	40	12718.1
18	41	12677.3

