

Evaluación Preliminar del Efecto de la Reincorporación de Pebbles en Circuito de Molienda SAG, Minera Candelaria

P. Tapia ¹, V. Carmona ¹

1. Departamento de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis preliminar de variables que pueden verse afectadas por la reincorporación de pebbles al circuito de molienda, Fase I, de la planta concentradora de la Compañía Minera Candelaria. Debido al considerable inventario de pebbles rechazados generado y acumulado a través de los años de operación, el cual contiene material magnético con asociaciones de calcopirita cuyas leyes en cobre son similares a la ley de alimentación fresca, motivo por el cual se decide su reincorporación al circuito de molienda SAG, específicamente al chancado de pebbles. Las variables consideradas en este análisis son: Alimentación fresca, alimentación compuesta, consumo de energía en el molino SAG, consumo de energía en chancador de pebbles y distribución de tamaños de alimentación y descarga del chancador de pebbles. Los resultados obtenidos de este análisis indican que la reincorporación de pebbles no presenta una gran incidencia en las variables señaladas, validando el impacto positivo en la recuperación de calcopirita aumentando el volumen de concentrado de cobre, lo que conlleva a un beneficio positivo en relación al proceso productivo y también a la protección del medio ambiente al reducir el inventario de pebbles al interior de la concentradora.

Palabras claves: Pebbles, SAG, alimentación.

Abstract

The objective of this work is to make a preliminary analysis of variables that can be affected by the reincorporation of pebbles to the milling circuit, Phase I of the concentration plant of Candelaria Mining Company. Due to the considerable inventory of rejected pebbles generated and accumulated through the years of operation containing material with chalcopirite associations whose copper grades are similar to fresh feeding grades, a reincorporation to the SAG milling circuit, specifically to pebbles crushed is decided. The variables that are considered in this analysis are: fresh feeding, composed feeding, energy consumption in the SAG mill, energy consumption in the pebbles crusher and distribution of sizes in the feeding and discharge of the crusher of pebbles. The results obtained in this analysis indicate that the reincorporation of pebbles doesn't present a great incidence in the indicated variables, validating in this way, the positive impact in the chalcopirite recovery, increasing the volume of copper concentrate what bears to a positive benefit in relation to the productive process and also to the protection of the environment when reducing the pebbles inventory in the interior plant of the concentrator.

1. Introducción

La molienda semiautógena es una variación del proceso de molienda autógena, es la más frecuente en la práctica y en ella se adicionan medios de molienda metálicos al molino. El nivel volumétrico de llenado de bolas varía normalmente de 12 a 14 % con respecto al volumen interno del molino.

El tamaño de los molinos en la industria del cobre varía típicamente entre 8,5 y 11 metros de diámetro, aunque se encuentran en etapa de diseño y/o fabricación equipos de 13 metros de diámetro. La potencia instalada varía típicamente entre 6.000 y 16.500 Kw, aunque se proyectan instalaciones con 26.000 Kw (1).

La potencia necesaria para rotar un molino es una de las variables operacionales de mayor importancia en molienda semiautógena.

Es importante notar que pequeñas variaciones en la capacidad de levantar su carga, afectarán considerablemente la potencia del molino. Por ejemplo si α pasa de 40° a 45° la potencia aumentara en un 10%, si el resto de las condiciones permanecen constantes (2).

$$\text{Potencia relativa} = \frac{\text{Potencia demandada}}{\text{Potencia de referencia con } J_b = 16\%} \quad (1)$$

Debido entonces el crítico rol de la potencia demandada sobre la capacidad del molino, es de interés disponer de una adecuada correlación con respecto a sus dimensiones y condiciones básicas de operación, a modo de cuantificar la contribución de cada componente independiente de la carga (bolas, rocas y pulpa) a la potencia total demandada por el molino.

$$P_{neta} = \eta * P_{bruta} = 0.238 D^{3.5} \left(\frac{L}{D} \right) N_c \rho_{ap} (J - 1.065 J^2) \text{sen} \alpha \quad (2)$$

Donde:

- P_{bruta} = Potencia bruta demandada por el molino
- η = Eficiencia global de transmisión eléctrica y mecánica, %/1
- D = Diámetro interno efectivo del molino, pies
- L = Largo interno efectivo del molino, pies

N_c = Velocidad de giro; expresada como fracción(°/1) de la velocidad crítica

$$N_{crit} = 76.6/D^{0.5}.$$

J = Nivel de llenado aparente, %/1 (incluye bolas, rocas, pulpa y espacios intersticiales, con respecto al volumen interno total del molino).

α = Angulo de levante de la carga. Típicamente en el rango de 35° a 45°.

Donde ρ_{ap} denota la densidad aparente de la carga, la cual puede ser evaluada sobre la base de los tres componentes (bolas, rocas y pulpa).

De esta manera, la contribución a la potencia neta total demandada por el molino asignable a la acción de las bolas en la carga se expresa como:

$$P_{bolas} = \left[\frac{(1 - f_r) \rho_b J_b}{\rho_{ap} J} \right] P_{neta} \quad (3)$$

De la misma forma, la contribución asignable a la acción de las rocas en la carga se expresa como:

$$P_{rocas} = \left[\frac{(1 - f_r) \rho_m (J - J_b)}{\rho_{ap} J} \right] P_{neta} \quad (4)$$

Y finalmente, la contribución asignable a la acción de la pulpa de mineral se expresa como:

$$P_{pulpa} = \left[\frac{\rho_p J_p f_r J}{\rho_{ap}} \right] P_{neta} \quad (5)$$

La figura 1 muestra que un incremento gradual en el nivel de llenado aparente total J , manteniendo constante el contenido de bolas en el molino en $J_b = 12\%$, la potencia total aumenta, pero no así la potencia demandada por las bolas, el cual gradualmente disminuiría. No obstante que la mayor potencia absorbida por las rocas compensaría la perdida de potencia de las bolas, es muy posible que la capacidad del molino se pueda ver afectada negativamente si la eficiencia de las rocas como cuerpo molidor es suficientemente inferior que la eficiencia de molienda de las bolas (2).

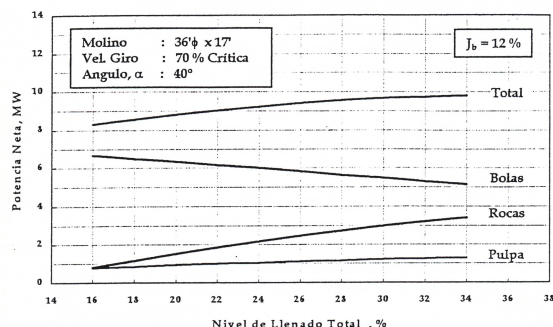


Figura 1: Efecto del nivel de llenado aparente total sobre la potencia demandada por el molino y la contribución de cada componente: bolas, rocas y pulpa.

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

La potencia aumenta con el flujo, comenzando desde un valor cero. A medida que el flujo de alimentación crece, la potencia consumida se incrementa hasta llegar a un valor máximo. Un flujo de alimentación aún mayor provocará una sobrecarga y la potencia comenzará a caer rápidamente. En esta condición de sobrecarga, la intensidad de la acción de molienda se reduce y la capacidad de tratamiento del molino disminuye.

Para un volumen de carga constante, una mayor capacidad de tratamiento se logra cuando el mineral de alimentación es más grueso. Lo anterior se debe a que la capacidad moledora del molino, esta determinada por los medios de molienda, los cuales se forman a partir de las rocas de mayor tamaño en la alimentación. Si la cantidad de gruesos alimentados no es suficiente, la intensidad de

la molienda en el molino será reducida y la capacidad del molino decrecerá..

Lo anterior sólo es válido, en el caso que la dureza del mineral sea normal y permanezca constante y los cambios de granulometría correspondan a problemas de segregación natural en el mineral.

Si la cantidad o segregación de gruesos en la alimentación aumenta demasiado, la capacidad de tratamiento del molino disminuirá ya que estaría faltando la fracción fina que principalmente se muele, es decir el mineral se comporta como si fuera más duro y la capacidad de tratamiento del molino bajaría. Esto será también así si el mineral se vuelve completamente fino.

Es importante notar que en estos dos casos (granulometría muy gruesa y muy fina) el mineral tendrá un alto consumo de energía específica, aparentando ser más duro (2).

La distribución de tamaños de la carga en el molino, está determinada principalmente por la distribución de tamaño de la alimentación: mientras más gruesa es la alimentación, más es la carga. En términos generales, mientras más gruesa es la carga será más permeable y será mayor la tasa de descarga.

Las variaciones en la tasa de descarga, debido a la distribución de tamaños de la carga, pueden ser compensadas mediante el ajuste de la densidad de la pulpa del molino, de tal manera que, a medida que la alimentación se torna más gruesa tiende a aumentar la carga circulante, lo cual implica aumentar la densidad de la carga automáticamente. También puede darse el caso que, para una carga gruesa y dura conviene más diluir al máximo la alimentación al molino ya que con eso promovemos el desgaste de las rocas. Paradojalmente, cuando el mineral de alimentación viene muy fino, es aceptable disminuir la densidad de la pulpa con el objeto de evacuar el mineral en un estado más grueso de manera de compensar por la falta de capacidad de molienda.

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

inferior a su capacidad máxima, al aumentar el volumen de su carga consumirá más potencia y el cambio en la dureza se compensará con un aumento de energía por tonelada de mineral fresco, sin embargo si el molino está siendo operado a su máxima capacidad, un aumento en la dureza, producirá un sobrellenado que sólo podrá ser compensado con una disminución del tonelaje tratado (2).

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

Un factor que influye mucho en la operación de un molino semiautógeno, es el volumen de la carga de bolas. Este volumen se expresa como una fracción del volumen total del molino y puede variar entre 4 y 14%, siendo el valor más usado 8% (2).

Un cambio en la carga circulante, tiene el efecto de variar la distribución de tamaños de la alimentación al molino. A medida que la carga circulante aumenta, una mayor proporción del producto del molino es reciclado y en consecuencia la distribución de tamaño de la alimentación se vuelve más fina. A medida que el molino se comienza a llenar de material fino, su capacidad de moler disminuye debido a la falta de medios de molienda. Este tipo de efecto es dominante en la conducta de un circuito cerrado de molienda semiautógena (1,2).

Debido al considerable inventario de pebbles rechazados generando y acumulando a través de los años de operación, es que se decide su reincorporación a través del circuito de molienda SAG, específicamente al chancado de pebbles. Las variables mas relevantes que se consideran en este análisis son: Alimentación fresca (flujo másico), alimentación compuesta (flujo másico y porcentual), consumo de energía en el molino SAG, consumo de energía en chancador de pebbles y la distribución granulométrica en la alimentación y descarga del chancador de pebbles.

2. Metodología

El tipo de circuito de Candelaria se denomina circuito SABC, que corresponde a un molino semiautógeno, molino de bolas y chancador.

En este trabajo se consideró evaluar el circuito correspondiente a la Fase I, que es la que tiene mayor tiempo operando.

La carga total de alimentación al molino SAG esta constituida por la carga fresca, pebbles y bolas de molienda (5 pulgadas), además de un flujo de agua para lograr un porcentaje de sólidos en peso de 63 a 67 %.

En la operación del circuito de molienda se pueden presentar dos tipos de comportamientos, es decir, operando en circuito corto u operando en circuito largo.

El material reciclado (pebbles o sobre tamaño harnero SAG) puede volver todo o parte de él a la correa de alimentación del molino SAG, en cuyo caso se habla del circuito corto, circuito que se utiliza en caso de existir problemas en el chancado de pebbles.

Un circuito largo, es el utilizado en una operación normal, aquí el material reciclado cae a la correa, donde es sometido a la acción de dos imanes de correa cruzada que retiran las bolas de molienda desgastadas, los fragmentos de metal sobrantes junto con algunos pebbles, caen a otra correa, donde un tercer imán autolimpiante elimina las bolas y algunos pebbles, los que son almacenados. El material que permanece en el circuito alimenta a la planta de chancado de pebbles.

La descripción del circuito completo de molienda y chancado de pebbles sometido al estudio se muestra en la figura 2.

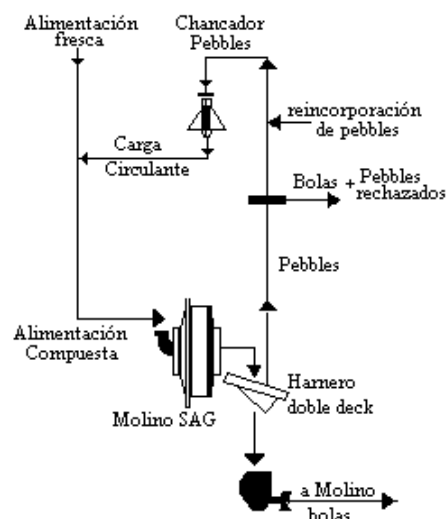


Figura 2: Circuito de molienda SAG y chancado de pebbles sometido al estudio.

El material magnético que se evacua a diario desde el circuito de molienda es trasladado al

sector de stock en donde se acopia, se deja reposar como mínimo por una semana y posteriormente son separados en acero y los pebbles de magnetita, generándose un stock de pebbles limpios.

Los pebbles rechazados en el circuito por los electroimanes, corresponden aproximadamente a un 2% del tonelaje procesado, habiéndose generado una reserva de aproximadamente 4 millones de toneladas a la fecha, donde 500.000 toneladas corresponden a pebbles limpios.

Estos pebbles contienen calcopirita asociada a magnetita, cuya ley de cobre es de 0.78 %. Permitiendo su reincorporación al proceso lograr aumentar la producción de concentrado de cobre sin aumentar la alimentación fresca y resolver un problema ambiental futuro por el espacio ocupado en su almacenaje.

El material a reincorporar, previa limpieza debe presentar tamaños inferiores a 3½", para no provocar daños en los revestimientos de los chancadores de pebbles.

La información necesaria para la evaluación a fue obtenida desde la base de datos, donde queda registrada la operación del circuito de acuerdo a las variables de control tales como: Alimentación fresca al SAG [tph], alimentación compuesta al SAG [tph], consumo energía SAG [Kw], consumo energía chancador de pebbles [%], tipo de circuito de operación (largo o corto).

Se consideraron datos registrados durante un periodo de 21 días de operación. Filtrándose la información con una frecuencia de 10 minutos generándose una base inicial igual a 3169 datos, todos en condición de operación normal, esto quiere decir operación con circuito largo.

Para complementar la información se obtiene de los reportes operacionales que permiten identificar los periodos en que estuvo operando con y sin reincorporación de pebbles al circuito de molienda SAG, obteniéndose además el flujo másico de pebbles reincorporados.

Toda la información seleccionada fue procesada para obtener los promedios diarios de la operación, la cual es necesaria para la evaluación del efecto de la reincorporación de pebbles en: (a) La alimentación fresca al SAG; (b) La alimentación compuesta al SAG; (c) Consumo de energía del SAG; (d) Consumo de energía del Chancador de pebbles; (e)

Granulometría de alimentación y descarga del chancador de pebbles.

Para evaluar el efecto de la reincorporación de pebbles sobre la granulometría de alimentación y descarga del chancador se realizaron muestreos en la descarga del sobre tamaño del harnero (alimentación a chancado pebbles) y en la descarga del chancador de pebbles, para realizar determinación de la distribución de tamaños en cada caso.

3. Resultados

Se presentan a continuación los resultados y su discusión obtenidos en la evaluación de los efectos que provoca la reincorporación de pebbles al circuito analizando las variables relacionadas.

Para evaluar el efecto que provoca la reincorporación de pebbles en el flujo másico de alimentación fresca al SAG, se consideran 21 días de información, donde se midieron los flujos másicos considerando dos situaciones: Con reincorporación de pebbles y sin reincorporación de pebbles.

La figura 3 ilustra gráficamente la comparación de las situaciones descritas anteriormente.

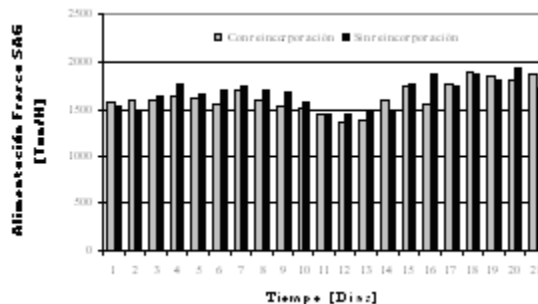


Figura 3: Flujo de alimentación fresca al SAG con y sin reincorporación de pebbles.

Al analizar los valores medios del flujo másico, se aprecia una disminución de 0.02% en el caso de operar el circuito con reincorporación de pebbles. Destacando que al realizar el análisis por día en la mayoría de los casos la alimentación fresca es mayor cuando no se reincorporan pebbles al molino donde el flujo de alimentación fresca no se ve afectada significativamente por la reincorporación de pebbles. Sin embargo, también se presentan días en que esta situación se revierte, lo que indica que se debe llevar a cabo un control más extenso que permita definir claramente este

efecto involucrando tal vez otras variables tales como la dureza, granulometría del mineral. Los datos que permiten realizar la evaluación de la reincorporación de pebbles en el flujo másico de la alimentación compuesta al SAG, se presentan en las figuras 4 y 5.

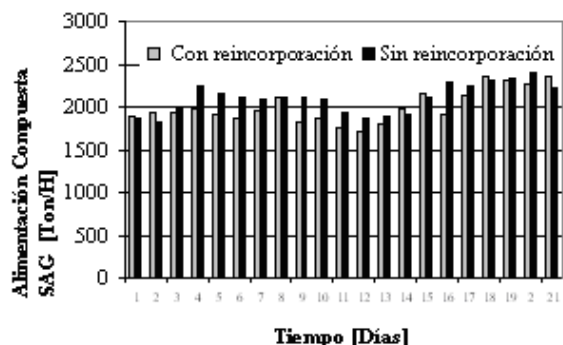


Figura 4: Flujo de alimentación compuesta al SAG con y sin reincorporación de pebbles.

Se aprecia en la figura 4 que en la mayoría de los casos la tendencia es que el flujo másico es mayor cuando el molino opera sin reincorporación de pebbles a pesar de que existen casos donde esta situación presenta un comportamiento opuesto, por lo que se puede deducir que la reincorporación de pebbles no tiene efectos significativos en el flujo másico de alimentación compuesta.

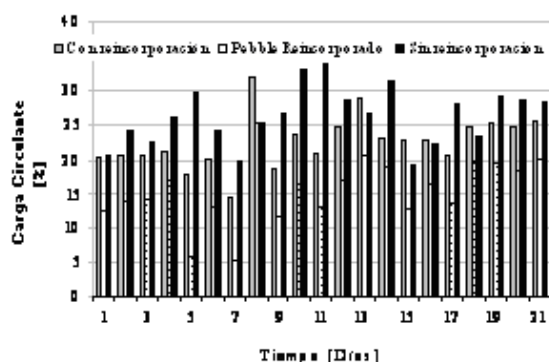


Figura 5: Comparación de cargas circulantes que ingresan al SAG, y pebbles reincorporados.

La figura 5 muestra que existe una disminución de la carga circulante que retorna al molino SAG, en la condición de reincorporación de pebbles. Provocando un impacto favorable en el molino SAG.

Para evaluar el efecto de la reincorporación de pebbles en el consumo de energía por el

molino SAG, la figura 6 muestra el flujo másico de alimentación compuesta y la energía consumida en el SAG con y sin reincorporación de pebbles.

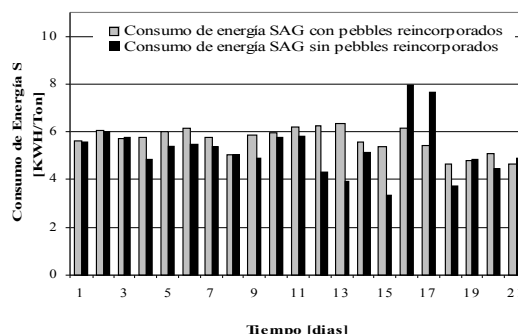


Figura 6: Comparación de consumo de energía en SAG con y sin reincorporación de pebbles.

La tendencia ilustrada en la figura 6 muestra que el consumo de energía es mayor en la mayoría de los casos para las condiciones de operación con reincorporación de pebbles.

La evaluación del efecto en el consumo de energía del chancador de pebbles que provoca la reincorporación de pebbles para el periodo de evaluación se presenta en figura 7 donde se compara la energía consumida versus la alimentación al chancador medido bajo las dos condiciones. Se registra el consumo de energía en forma porcentual debido a que el control operacional se registra de esta forma, teniendo de referencia que el 100% equivale a 522 KWH/Ton.

Se aprecia en la figura 7 que el efecto de la reincorporación de pebbles sobre el consumo de energía del chancador no provoca grandes variaciones a pesar que el flujo másico es mayor cuando no se reincorpora pebbles. Esto no concuerda con lo que se muestra en la figura 5 donde se observa que mayoritariamente la carga circulante es mayor cuando no se reincorporan pebbles por lo tanto estas variaciones pueden deberse a un efecto combinado de otras variables tales como dureza y distribución de tamaños.

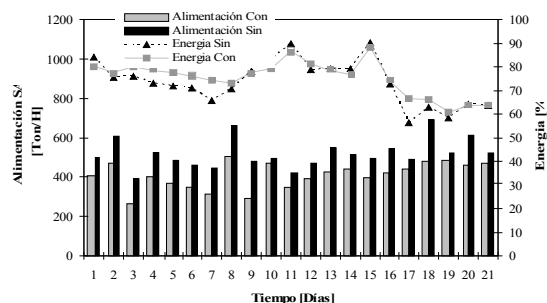


Figura 7: Gráfica consumo de energía y alimentación a chancador de pebbles.

Ya que no existe una base de datos que permita determinar el efecto de la reincorporación de pebbles en la granulometría de alimentación y descarga del chancador de pebbles, se realizaron mediciones de la distribución de tamaños en la alimentación y descarga del chancador de pebbles, la figura 8 muestra la distribución de tamaños de alimentación al chancador de pebbles en las distintas condiciones de operación, mientras que la figura 9 muestra la distribución granulométrica para estas situaciones en la descarga del chancador de pebbles.

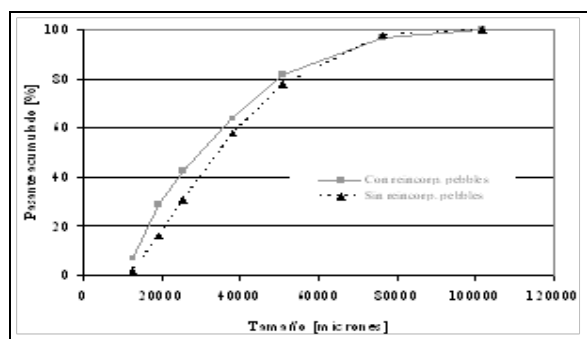


Figura 8: Distribución de tamaños de alimentación al chancador de pebbles.

En la figura 8, se observa que para ambas condiciones se presentan tamaños máximos similares es decir de 101600 micrones aproximadamente, pero en la descarga del chancador (figura 9) este tamaño máximo es mayor bajo la condición sin reincorporación de pebbles. Si comparamos además los contenidos de material con tamaños inferiores a 1 pulgada en la alimentación al chancador de pebbles, se observa que al reincorporar pebbles este valor es alto, por lo que estas granulometrías presentan mayor presencia de tamaños más fino, este comportamiento se mantiene en el producto al compararlo con las

otras dos situaciones generando así una granulometría en la descarga menor con respecto a la situación donde no se reincorporan pebbles, por lo tanto desde el punto de vista granulométrico reincorporar pebbles al circuito favorece a la molienda SAG ya que la carga circulante presentará tamaños más finos.

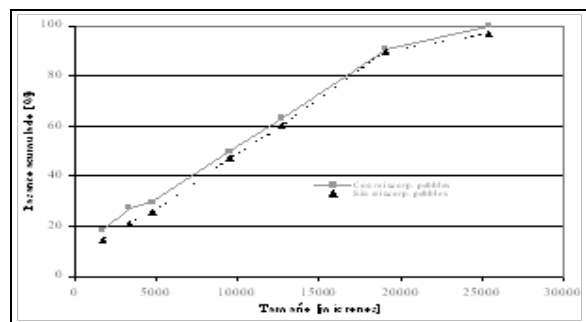


Figura 9: Distribución de tamaños descarga del chancador de pebbles.

4. Conclusiones

De acuerdo a las variables analizadas en este presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

La reincorporación de pebbles no tiene un efecto significativo sobre la alimentación fresca. Una leve disminución ocurre al reincorporar los pebbles.

Respecto a la alimentación compuesta se refleja un impacto favorable ya que hay una disminución de carga circulante cuando se reincorporan pebbles, logrando de esta manera procesar el material útil contenido en ellos.

En relación a la energía consumida, el impacto sobre el consumo en el molino SAG es más estable al reincorporar pebbles, esto puede ser atribuido a la dureza implícita de este material, lo cual aumenta levemente este consumo. En el chancado de pebbles el consumo energético no presenta una gran variación, manteniéndose muy similar en ambos casos.

Referente al impacto de la reincorporación de pebbles en la variable granulometría analizada en la alimentación y descarga del chancador de pebbles es favorable cuando se reincorpora pebbles por el aumento de finos que se genera como producto del chancador.

6. Referencias

Magne L. "Visión Conceptual y Estado de la Tecnología en Molienda Semiautógena", Workshop SAG 1997. pp 3-5.

Barahona C. Diseño y Operación de Circuitos con Molienda Autógena. 1992, pp 43-75.