

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesores Patrocinantes

Daniel Sbarbaro-Hofer

Willy Kracht Gajardo

“EFECTO DEL CALENTAMIENTO EN LA MOLIENDABILIDAD DEL MINERAL”

CARLOS ROBERTO MUNNIER GONZALEZ



Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Mayo 2019

Resumen

Actualmente la minería del cobre Chilena (y mundial) se enfrenta a nuevos desafíos, principalmente en la búsqueda de mayores tasas de procesamiento y ahorro de recursos debido a la disminución en las leyes del yacimiento.

El pretratamiento térmico antes de la etapa de molienda puede significativamente mejorar las operaciones industriales de conminución, reduciendo los requerimientos energéticos. En algunos casos, este pretratamiento ha mostrado una mejora en la liberación promoviendo la fractura intergranular en lugar de la fractura transgranular.

Se realizaron pruebas de laboratorio sobre dos minerales típicos de la minería Chilena con el fin de evaluar el efecto de la temperatura en la moliendabilidad de cada uno de ellos y reducciones en cuanto a costos energéticos.

Se obtuvieron reducciones de hasta un 19% y 15% en el Work index y en energía específica respectivamente para el mineral de CMET y de un 31% y 24% en Work Index y energía específica para el mineral de Dacita.

Sin embargo, mediante una evaluación económica simple, se obtuvo que el ahorro energético al realizar la molienda sobre el mineral pre tratado, no alcanza a cubrir el costo de calentar el mineral usando energía eléctrica, por lo que el método con esta tecnología no es actualmente económicamente factible. Sin embargo, el uso directo de radiación solar podría ser factible debido a la gran diferencia en cuanto a costos en comparación con la energía eléctrica.

Abstract

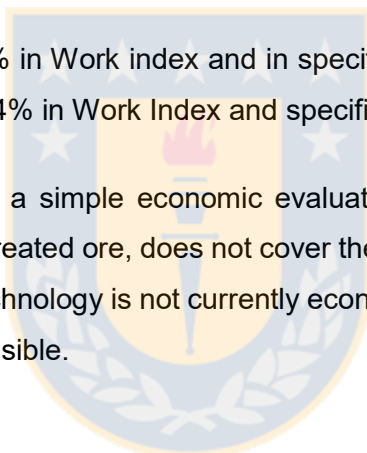
Nowadays Chilean (and global) copper mining faces new challenges, mainly in the search for higher processing rates and resource savings due to the decrease in the deposit grades.

The thermal pre-treatment before the grinding stage can significantly improve industrial comminution operations, reducing energy requirements. In some cases, this pretreatment has shown an improvement in the liberation of the ore, promoting the intergranular fracture instead of the transgranular fracture.

Laboratory tests were carried out on two typical minerals processed in Chile, in order to evaluate the effect of temperature on the grindability as well as reductions in energy costs.

Reductions of 19% and 15% in Work index and in specific energy were obtained respectively for the CMET ore and 31% and 24% in Work Index and specific energy for Dacita ore.

Nevertheless, by means of a simple economic evaluation, it was obtained that the energy saving when grinding on the pre-treated ore, does not cover the cost of heating the ore using electric power, so the method with this technology is not currently economically feasible. However, the direct use of solar radiation could be feasible.



Glosario

CMET: Complejo Máfico El Teniente.

TM: Tonelada métrica.

TJ: Terajoule.

SxEx: Extracción por solventes - Electro obtención.

TAL: Thermally Assisted Liberation.

WI: Work Index.

GPR: Gramos por revolución.

kWh/ton: Kilowatts-hora por tonelada.

tmsd: Tonelada métrica seca por día.

F₈₀: 80% pasante en la alimentación.

P₈₀: 80% pasante en el producto.



Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Revisión de literatura	4
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Antecedentes	7
1.4.1 El proceso de conminución	7
Capítulo 2: Marco Teórico	10
2.1 Optimización de energía y pretratamiento	10
2.2 Fundamentos de fractura de roca	12
2.2.1 Fracturas de Griffith en rocas	12
2.2.2 El rol del límite de grano	13
2.3 Métodos de pretratamiento	17
2.3.1 Aditivos químicos	18
2.3.2 Tratamiento por ultrasonido	19
2.3.3 Calentamiento con microondas	21
2.3.4 Calentamiento convencional.	22

2.4 Estudios anteriores	24
2.4.1 Scheduling et al. [15]	24
2.4.2 Tavares and King [10]	25
Capítulo 3: Diseño experimental	31
3.1 Caracterización de muestras	32
3.2 Pruebas de Moliendabilidad	33
3.2.1 Procedimiento para los ensayos	34
3.2.2 Simulación mediante Molycop-Tools	35
3.3 Procedimiento experimental	37
3.3.1 Preparación de las muestras	38
3.3.2 Test de Bond	41
Capítulo 4: Resultados y discusión	43
4.1 Work Index	43
4.2 Moliendabilidad	45
4.3 Energía específica	46
4.4 Resultados Molycop-Tools	48
4.5 Evaluación económica	49
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	52
5.1 Conclusiones	52

5.2 Recomendaciones	52
Referencias	54
Anexos	56
Anexo A: Procedimiento para realizar test de bond.	56
Anexo B: Planta molienda Sewell.	58
Anexo C: Test de Bond	59
Anexo C: Descripción de equipos	62
i) Ro-Tap	62
ii) Molino de Bond	63
iii) Técnicas de muestreo	64

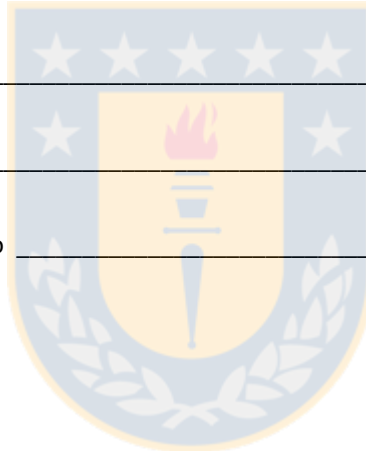


Tabla de ilustraciones

Figura 1: Variación de la energía consumida por la minería 2001-2017.	2
Figura 2: Distribución del consumo de energía total en minera año 2017	7
Figura 3: Concentración de tensión sobre la punta de la grieta	12
Figura 4: Propagación de grietas por los planos de exfoliación	14
Figura 5: Propagación estable de grietas por medio de límites de grano	16
Figura 6: Clasificación de distintos tipos de pretratamiento.	17
Figura 7: Diferencias de gradientes de temperatura entre microondas y calentamiento convencional.	21
Figura 8: Micrografías de partículas de cuarzo.	27
Figura 9: Efecto del calentamiento del mineral a distintas temperaturas, seguido de un temple con agua sobre la densidad de grieta	28
Figura 10: Efecto del calentamiento del mineral y temple con agua sobre la energía residual de fractura de la partícula de diferentes minerales	29
Figura 11: Efecto del calentamiento y temple con agua de distintos minerales en el parámetro de daño de mineral	29
Figura 12: Muestra de dacita utilizada en las pruebas de Bond.....	32
Figura 13: Muestra de mineral CMET utilizado en las pruebas de Bond.....	33
Figura 14: simulación mediante MolyCop Tools.	36
Figura 15: Procedimiento experimental general.	37

Figura 16: Panel de control de horno.....	39
Figura 17: Horno eléctrico utilizado para el calentamiento de las muestras.	39
Figura 18: Medidor de temperatura.....	40
Figura 19: Material enfriándose, expuesto a temperatura ambiente.	40
Figura 20: Planilla Excel de la prueba N°1 del test de Bond.....	42
Figura 21: Variación del índice de Bond con respecto a la temperatura de pretratamiento para los minerales de CMET y Dacita.	43
Figura 22: Variación de los gramos molidos por revolución del molino para ambos minerales.	45
Figura 23: Variación de la energía específica con respecto a la temperatura para CMET y Dacita.	46
Figura 24: Variación de la capacidad de procesamiento en los molinos de bolas con respecto a la temperatura (CMET).....	48

Índice de Tablas

Tabla 1: Aditivos químicos y su efecto	18
Tabla 2: Resumen del efecto de la temperatura para el mineral de CMET.	47
Tabla 3: Resumen del efecto de la temperatura para el mineral de Dacita.	47
Tabla 4: Valores necesarios para la evaluación económica.....	49
Tabla 5: Valores obtenidos tras la simulación mediante MolyCop-Tools.	49



Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto

El propósito fundamental de la conminución en el procesamiento de minerales es liberar el elemento de interés en el mineral, separando la ganga del elemento de valor el cual es comercializado y es el objetivo principal para el cuál se está trabajando.

La mayoría de los desarrollos importantes en la conminución han estado dirigidos a reducir su alto costo operativo, la mayoría de las veces ignorando el hecho de que el papel más importante de la conminución no es simplemente reducir el tamaño de partícula, sino que liberar los minerales entre sí. Las técnicas actuales realizan una liberación relativamente ineficiente e inadecuada, lo que a su vez conduce a mayores consumos de energía, ya que se debe realizar una molienda más fina para lograr un grado adecuado de liberación. Esto también conduce a la generación de partículas ultrafinas, que pueden ser perjudiciales en el proceso posterior.

Debido a esto, los costos energéticos están aumentando cada vez más dada la necesidad de procesar minerales que están en constante disminución de ley. En consecuencia, una molienda muy fina es la que se necesita para liberar progresivamente el mineral contenido en la mena.

Una de las consecuencias de aumentar la reducción de tamaño para lograr la liberación efectiva, es que se produce material muy fino conocido como "laminas" (debido a la sobremolienda) produciendo ineficiencias el proceso de concentración del mineral (principalmente flotación) disminuyendo la ley y recuperación de concentrado final.

Por otro lado, desde el punto de vista energético, la producción y consumo energético son variables históricamente correlacionadas, en los últimos años se hace visible el desacople entre las mismas (Figura 1), puesto que a pesar de que la producción de cobre ha decrecido desde 5.78 millones de TM en 2013 a 5.50 en 2017 (-4.7%), el consumo energético ha pasado de 155 mil TJ a 170 mil en el mismo periodo (+9.7%).

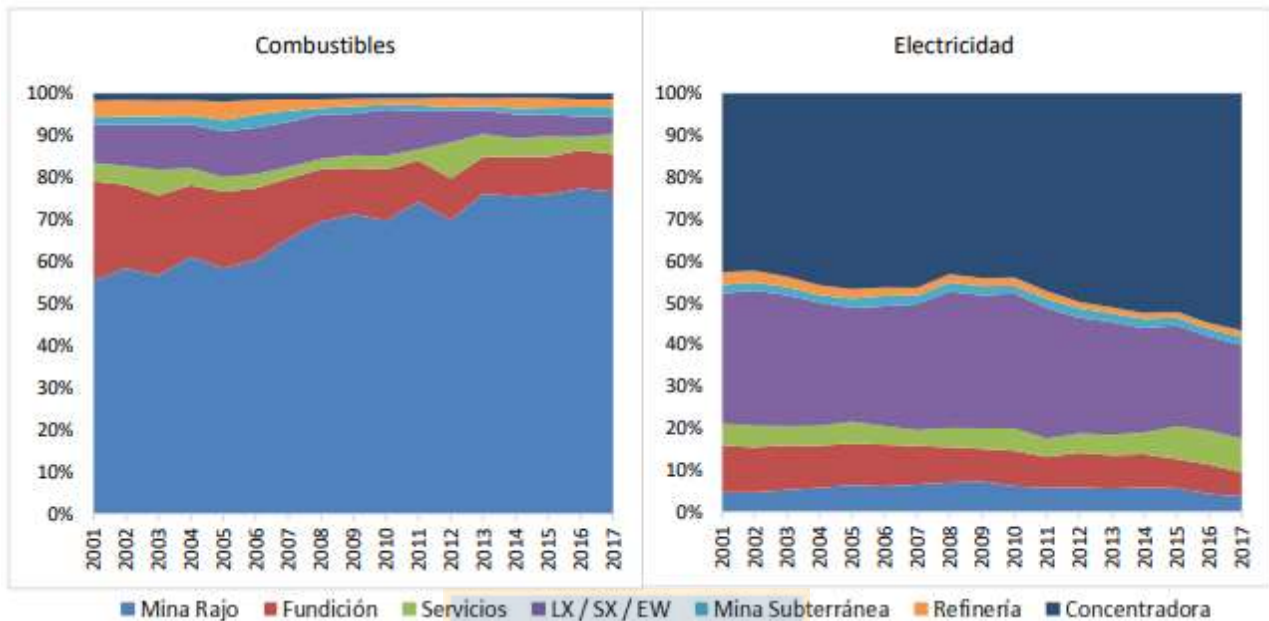


Figura 1: Variación de la energía consumida por la minería 2001-2017. [1]

Este aumento en la intensidad de uso de energía por parte de la minería del cobre se explica principalmente por cambios estructurales en distintas fases del proceso de explotación, en los que destacan los siguientes [1]:

- Tendencia decreciente en las leyes de las minas: la ley de mineral promedio del país en general ha tendido a bajar, desde 1.08% en 2001 hasta 0.64% en 2017 (-40%), con las leyes promedio de concentradora en específico, proceso altamente intensivo en electricidad, cayendo desde 1.24% hasta 0.8% en el mismo periodo (-36%)
- Mayor dureza de la roca: Situación que se asocia al envejecimiento de las minas y una mayor profundidad de excavación
- Tendencia a la mayor producción de concentrados: Mientras que la producción de cátodos en SxEw se ha mantenido relativamente estable en el tiempo en torno a 1.5-1.6 millones de TM entre 2001 y 2017, la producción de concentrados (considerados aquellos fundidos local y externamente) ha aumentado desde 3.2 millones de TM en 2001 hasta 3.9 en 2017. Dado que este producto es altamente intensivo en energía eléctrica en el proceso de concentración, se ha presionado el alza en el uso energético en general.

Existen dos posibles enfoques para la solución de este problema. La primera es mejorar la eficiencia de conminución y de la posterior concentración. Un segundo enfoque está en aumentar la liberación del mineral de interés mediante diversos métodos, entre estos se incluyen reactivos para facilitar la molienda, calentamiento con microondas, tratamiento ultrasónico y por calentamiento convencional [2]. Este último, es el que se procederá a estudiar en esta memoria de título.

Según estudios sobre las limitaciones que se tienen en la conminución convencional [3] sería ampliamente beneficioso idear nuevos métodos que apliquen la fuerza de rompimiento preferencialmente sobre los límites de grano del mineral con el objetivo de consideraciones energéticas y evitar la molienda innecesaria del material.

Uno de los métodos que se ha estudiado con el fin de mejorar la eficiencia del proceso, es la llamada Thermally Assisted Liberation (liberación asistida térmicamente) que consiste en calentar el mineral hasta a altas temperaturas, y así facilitar su agrietamiento, con el objetivo de promover la fractura intergranular y lograr mejorar la liberación de componentes de interés del mineral, aprovechando anisotropías en la expansión térmica de las distintas fases minerales que se encuentran dentro de la roca, o bien, aprovechar la descomposición del material a estas altas temperaturas, etc. Lo que se busca, en general, es mejorar la liberación por medio de fracturas intergranulares, con el fin de evitar una sobremolienda, para así evitar gastos energéticos innecesarios en la conminución, y además, mejorar la recuperación metalúrgica.

1.2 Revisión de literatura

Una de las primeras investigaciones que se realizó en cuanto a la liberación asistida térmicamente fue la propuesta por Yates [4] que estudió el efecto de calentamiento y templado antes de la etapa de conminución. El calentamiento no mejoró de manera significativa la eficiencia del proceso, sin embargo, este redujo la proporción de finos.

Myers [5] investigó la calcinación de piedras y cuarzo antes de la reducción de tamaño. El costo de la calcinación fue cercano al costo ahorrado en la reducción de tamaño obtenido por el tratamiento térmico.

Holman [6] observó que los minerales ricos en cuarzo que fueron templados con agua después de un tratamiento térmico a 560-600°C se deshacían de manera extremadamente fácil.

Mitchell et al. [7] observaron que el tratamiento térmico del mineral antes de la conminución reduce el requerimiento de energía en la molienda, disminuye el desgaste de los medios de molienda y además, mejora la recuperación de la típica Taconita magnética de Minnesota.

Djingheuzian et al. [8] utilizando minerales de cobre-nickel y plata-plomo-zinc y varios tipos más de minerales industriales, sugirió que mayores temperaturas de templado incrementan la eficiencia mecánica de molienda.

Brown et al. [9] observaron que el tratamiento térmico puede producir incrementos en la moliendabilidad y fragilidad con el incremento de la temperatura desde la cual el mineral es sometido a un temple. El incremento fue atribuido al “shock” térmico, con pequeños efectos resultantes si solo se calentara (sin temple).

Tavares and King [10] estudiaron varios minerales (hierro, cobre, entre otros) y observaron que la molienda asistida térmicamente incrementa la liberación del mineral y reduce el consumo energético

Rao et al. [11] Estudiaron el efecto del pretratamiento térmico en la moliendabilidad y la recuperación de bauxita como aplicación para refractarios. Se observó que se ahorró un 28% en promedio de energía en la molienda con el mineral calcinado y luego templado en comparación con el mineral sin pretratar.

Según las investigaciones ya realizadas, el método tiene un gran impacto sobre el mineral, disminuyendo la resistencia de este de modo que se podría realizar una reducción de tamaño con mayor facilidad, optimizando los requerimientos energéticos para lograr el P_{80} deseado. Sin embargo, no existen datos concretos sobre el efecto que tiene este sobre la moliendabilidad, específicamente el parámetro de Work Index que es un parámetro importante al momento de dimensionar los equipos que se utilizarán a la hora de procesar el mineral.

Por otro lado, los resultados indican que el método no es económicamente factible utilizando energía eléctrica, sin embargo, sugieren que mejoras en la recuperación final podrían ser clave para suplir el costo energético de calentar el mineral gracias a la conminución intergranular.



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Se procederá a estudiar el efecto que tiene un flujo radiativo de calor sobre las propiedades mecánicas de un mineral procesado en una minera chilena, el impacto que tiene este en el proceso de molienda y, además, realizar una evaluación acerca de la factibilidad económica del proceso. Además de dar a conocer distintos estudios y métodos sobre el tema en cuestión.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar y analizar los distintos métodos de pretratamientos que se encuentran en la literatura y de la manera que estos impactan sobre el mineral.
- Realizar pruebas experimentales a distintas condiciones de temperatura con el fin de cualificar el efecto de calentamiento convencional sobre el mineral y además sobre su posterior paso por la etapa de molienda.
- Cuantificar en términos energéticos el efecto que tiene el calentamiento convencional sobre el mineral, y el posible impacto que tendría a escala de operación minera.
- Realizar un análisis económico sobre el gasto energético que se utiliza al calentar el mineral a nivel de escala minera y determinar si es o no factible el método de pretratamiento.

1.4 Antecedentes

1.4.1 El proceso de conminución

El proceso de conminución consta principalmente de dos procesos, en primera instancia el chancado y posteriormente el proceso de molienda. Estos difieren marginalmente en que el chancado libera partículas en rangos de tamaños más grandes en comparación con la molienda, que libera la partícula en tamaños más pequeños. Son procesos indispensables para obtener finalmente un concentrado libre de ganga.

La conminución es un proceso importante en muchas industrias de procesamiento de minerales. Al comienzo del siglo 20, la demanda de acero, hierro, plomo, cobre, entre otros metales, se hizo muy fuerte a gran escala y se debió aumentar la capacidad de los circuitos de conminución.

Este es un proceso energéticamente intensivo e ineficiente ya que solo utiliza apenas entre un 3-5% de la energía suministrada para la reducción de tamaño, el resto de la energía es disipada en forma de calor, energía cinética, ruido y rompimiento fallido del mineral [2].

En Chile, durante el 2017 del total consumo energético en minería, más del 50% de esta se ocupa en operaciones de concentración, la figura 2 muestra la distribución del consumo de energía eléctrica en minería durante el 2017.

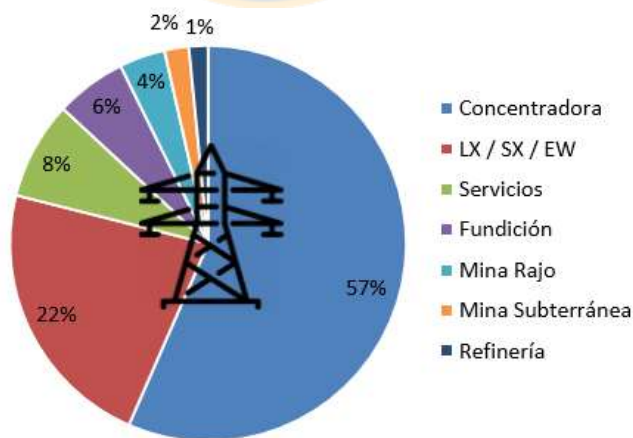


Figura 2: Distribución del consumo de energía total en minería año 2017 [1].

Como se puede observar en la figura anterior, un 57% del total consumo de electricidad en la minería es consumida por plantas concentradoras y esta, a su vez, representa cerca de un 1% del consumo total de energía eléctrica del país [1].

Entre los procesos de chancado y molienda, esta última es la que más consumo energético necesita, puesto que a medida que la cantidad de finos aumenta, también aumenta la cantidad de áreas superficiales a ser reducidas, por lo que esto conlleva a un mayor consumo energético. Otra razón de este mayor consumo energético se debe al hecho de que las fracturas de los materiales se realizan a partir de fallas, a medida que las partículas se hacen más finas durante la molienda, estas fallas desaparecen. Esto hace que moler el mineral sea aún más difícil, aumentando el gasto energético en la conminución.

Debido a esto, se hace necesaria una investigación sobre algún método de pretratamiento de un mineral correspondiente a la minería Chilena, antes de ingresar a la etapa de molienda, con el fin de facilitar el proceso y abaratar costos en términos de energía eléctrica.

Los estudios actuales se centran en la generación de altas temperaturas en la molienda. Esta temperatura debería ser suficiente para crear grietas en la superficie, facilitando la molienda y disminuyendo el consumo energético.

Muchas son las investigaciones que se han realizado sobre este tema, por ejemplo, el trabajo de Tavares and King [10] que estudiaron los efectos de la liberación asistida térmicamente a nivel de la microestructura y que se presenta un breve resumen en esta memoria, además del trabajo de Scheduling et al. [15] que estudiaron el efecto del pretratamiento térmico sobre las características de la conminución usando un mineral de casiterita bloqueado con cuarzo, clorita, turmalina y hematita. En ambos casos, se observó una mejora en la liberación del mineral de interés y una disminución en la resistencia, sin embargo, también en ambos casos, el ahorro de energía que se obtiene en la conminución no es suficiente para suplir el gasto energético de pretratar el mineral.

Por otro lado, se sugiere que mejoras en la liberación debido al rompimiento preferencial y mejoras en el molino podrían ser fuertes áreas de estudio para compensar este gasto energético. Actualmente, se cuentan con los siguientes desafíos y oportunidades para lograr llevar este método a escala comercial [3]:

- Mejorar el alto costo de energía de precalentar el mineral.

- Estudiar posibles problemas medioambientales debido a emisión de gases (CO_2 , SO_2 , etc) y polvos.
- Explorar su uso para minerales de distintas composiciones, con el fin de cuantificar efectos y posibles mejoras en su procesamiento.
- Desarrollar métodos eficientes de precalentamiento, tales como por lecho fluidizado, calentamiento con luz solar, aprovechar la energía de otros procesos, etc.



Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Optimización de energía y pretratamiento

La optimización de la energía ha sido siempre foco de estudio cuando se desarrollan circuitos de reducción de tamaño a larga escala. Todo esto debido al incontrolado gasto de energía, que atrajo la atención de numerosos investigadores e industrias como consecuencia del gran aumento de las demandas mundiales, cambios constantes en el precio de la energía y, además, el aumento del calentamiento global.

Para esto, métodos de pretratamiento de mineral antes de la conminución han sido estudiados por décadas, con el fin de mejorar la eficiencia de este proceso. Hoy en día existen numerosos de estos métodos, tales como, aditivos químicos, microondas, ultrasonido, tratamientos térmicos, ondas de radio, choque de ondas, tratamiento de pulsos eléctricos, conminución por “wáter jets” y tratamientos con plasma, han sido estudiados particularmente en las últimas décadas.

Muchos de estos aún no se han llevado a escala comercial debido a que siguen existiendo desafíos técnicos y económicos inconclusos. Hoy en día es necesario realizar una revisión en cuanto al desarrollo de estos métodos con el fin de evaluar el potencial y los problemas asociados con las técnicas mencionadas anteriormente. Por otro lado, han sido numerosas las investigaciones en el último siglo, sin embargo, aún no se ha llegado a una etapa avanzada, la mayoría de estas investigaciones se han enfocado en un método o en un mineral en particular, por lo que no nos entrega una visión holística o comparativa de los progresos en esta área.

El calentamiento convencional o la liberación asistida térmicamente ha sido estudiado como posible método para disminuir el consumo energético en la conminución, y además, mejorar la recuperación de metales valiosos de algunos minerales apropiados con el procedimiento, debido a que se ha observado una mejor liberación producto del quiebre preferencial en la etapa de conminución.

En algunos casos el tratamiento ha mostrado reducción en la resistencia del mineral, promoviendo mayormente la fractura intergranular que la fractura transgranular, lo que explica la mejora en la liberación y posterior recuperación. Desafortunadamente, en la gran mayoría de los estudios, se ha demostrado que el proceso no es económicamente viable ya que el gasto económico

utilizado en calentar el mineral no es suficiente para compensar el ahorro energético que se obtiene de la reducción de tamaño

La liberación asistida térmicamente trabaja principalmente debido a la tensión generada en la estructura del material gracias al calentamiento. Los componentes del minerales que se descomponen, por ejemplo, (CaCO_3 , MnO_2 , CuFeS_2 , etc), se deshidratan ($\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, etc) o presentan arreglo cristalino ($\alpha \rightarrow \beta \text{SiO}_2$), ($\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \text{CuFeS}_2$) durante el calentamiento debido a cambios estructurales, resultan finalmente en nuevas grietas o aumento de las existentes, mejorando la eficiencia en la molienda y en la liberación. [3].

Para comenzar a evaluar métodos u optimizar el proceso de molienda, se hace necesario revisar en la bibliografía, fundamentos sobre la fractura de minerales como se verá a continuación.



2.2 Fundamentos de fractura de roca

La conminución puede ser definida como el rompimiento de grandes partículas sólidas en partículas más pequeñas. La iniciación de la fractura y propagación de grietas existentes juegan un rol vital durante la conminución, especialmente en el control de la liberación de los minerales y el consumo de energía. En la red cristalina, los átomos están unidos a través de enlaces químicos y físicos. Para producir una fractura mecánica debe ser sometido a un esfuerzo crítico, donde la tensión excede la tensión local para romper tales enlaces. Cuando una carga es aplicada sobre una roca, los defectos de la roca ayudan a la propagación de la grieta y pueden actuar como concentradores de tensión, lo que conlleva a menores resistencias a la fractura. Tal como lo explica Griffith en los siguientes párrafos.

2.2.1 Fracturas de Griffith en rocas

Materiales frágiles como rocas o minerales al momento de la fractura, lo hacen con una pequeña deformación plástica (únicamente tienen deformación elástica hasta el momento de la fractura). Por otro lado, la resistencia a la tracción de ciertos materiales es mucho menor a la predicha teóricamente, lo que le permitió a Griffith postular la teoría de grietas, en la que señala que las bajas resistencias observadas eran debido a la presencia de pequeñas fallas o grietas, en la cual los extremos de esas grietas se encuentran actuando como “nidos” de tensión. La fractura, entonces, ocurre cuando la tensión generada sobre esta grieta excede el esfuerzo de cedencia teórico, y cuando esto ocurre, la grieta es apta para expandirse de manera catastrófica. [12]

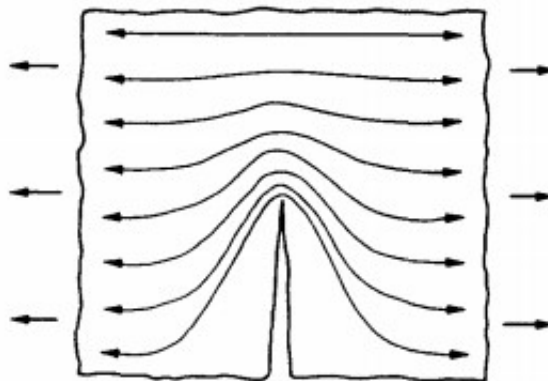


Figura 3: Concentración de tensión sobre la punta de la grieta [12].

Entonces, la fractura de un sólido frágil es causada, por lo tanto, por una extensión de una grieta de Griffith, que son inherentes al material. La energía requerida para para crear una nueva grieta es suplida por el trabajo realizado por fuerzas externas, por la liberación de la energía interna acumulada en el sólido o una combinación de ambas.

La deformación plástica cercana a la punta de la grieta y la necesidad de superar la energía de la superficie de la nueva grieta puede asegurar el crecimiento de esta bajo la aplicación de fuerzas externas, pero sobre un “largo crítico de grieta” la energía potencial acumulada tras la deformación plástica) comienza a ser mayor que la resistencia a la tracción (energía superficial) y por lo tanto, la grieta comienza a acelerarse (propagación inestable) y la ruptura será inevitable.

Todas las rocas contienen grietas inherentes, derivadas de numerosas fuentes, debido a las apreciables acciones mecánicas, térmicas y químicas que han sido sometidas durante millones de años. También existe evidencia que muestra que cuando la roca es removida de la tierra, particularmente desde la superficie, el “alivio” de la tensión (generada desde la superficie) comienza con la nucleación de una nueva grieta, debido a la liberación de energía acumulada por la compresión generada interiormente.

Por otro lado, nuevas grietas son generadas durante el proceso de conminución, pero a medida que el tamaño de partículas comienza a disminuir, la proporción de grietas por sobre el largo crítico de grieta también disminuye, por lo tanto, partículas finas son más difíciles de reducir su tamaño.

2.2.2 El rol del límite de grano

El borde, frontera o límite de grano es la superficie de separación entre dos cristales de un mismo grano policristalino. Surge como consecuencia del mecanismo de crecimiento de grano o cristalización, cuando dos cristales que han crecido a partir de núcleos diferentes se “encuentran”. A pesar de tener la misma estructura cristalina, las orientaciones, debido al azar, serán diferentes y unos cristales compensarán a los otros.

En otras palabras, son regiones que separan desordenes o falencias entre cristales, y se puede esperar que dichas áreas sean relativamente débiles en relación a las celdas cristalinas ordenadas. Debido a esto, actúan como barreras de propagación de grietas, de la misma manera

en que los límites de grano en metales impiden el movimiento de las dislocaciones a través de los planos de deslizamiento.

Muchas de las grietas en las rocas se mueven por planos de exfoliación en los cristales, que es la tendencia de los materiales cristalinos para dividirse a lo largo de planos estructurales cristalográficos definidos, y es muy difícil para una grieta, pasar desde el plano de exfoliación de un grano hacia otro con una orientación diferente. La figura 4 nos muestra evidencia de esto, mostrando el agrietamiento por exfoliación en un mineral de hierro policristalino que es agrietado únicamente en los granos, debido a la barrera de los límites de grano.

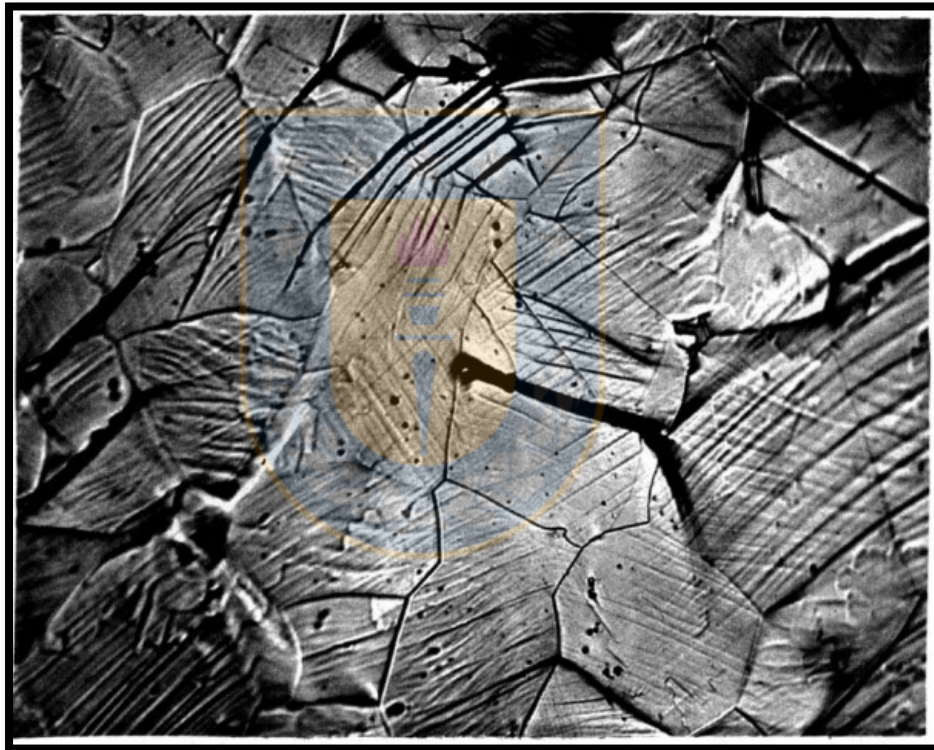


Figura 4: Propagación de grietas por los planos de exfoliación [12].

Los límites de grano actúan como inhibidores de la propagación de grietas, como es evidenciado por la gran resistencia a la fractura de los granos más pequeños comparado con los granos más grandes, es decir, debido a la resistencia que oponen los límites de grano, estas grietas no se dan en mayor proporción en granos pequeños, como lo hacen en granos de mayor área.

En la mayoría de los procesos de conminución, la propagación de grietas pareciese estar pequeñamente influenciados por los límites de grano, ya que generalmente, el quiebre se produce a través de estos, obteniendo como producto un bajo grado de liberación. Sin embargo, como se ha mostrado, grietas existentes, y otras desarrolladas por fallas en la matriz, se pueden propagar a muy alta velocidad cuando se le suministra excesiva energía de deformación (energía usada por el material para recuperar su forma original una vez que la tensión es removida) sobre la celda cristalina. Este es el caso de la mayoría de los actuales procesos de conminución en el cual las grietas se mueven a alta velocidad, por lo tanto, tienden a ignorar los obstáculos en su camino aun cuando existen vías de menor resistencia. Esto es análogo a un hacha, impactando a alta velocidad sobre madera, tiende a ignorar las fallas moviéndose únicamente en línea recta. Una sierra moviéndose a baja velocidad, tiende a tener sus hojas desviadas por tales áreas.

Se espera que una grieta que se mueve lentamente en una roca (propagación estable) prosiga su recorrido preferencialmente sobre las debilidades del límite del grano ya que estos son caminos de menor resistencia, particularmente cuando las grietas se propagan a lo largo de los límites del grano a bajas velocidades. El agrietamiento transgranular, también se inhibiría (aparte de la razón en que la grieta se mueve por caminos de menor resistencia) debido a la dificultad de transferir una deformación plástica por medio de la punta de la grieta a los planos de los granos vecinos.

La Figura 5 muestra el camino de una grieta propagándose de manera estable en un mineral (ya que se logran observar claramente los límites entre los granos) de sulfuro en la corteza terrestre, probablemente, durante millones de años. Únicamente existió la suficiente energía de deformación solo para propagar la grieta, al contrario de lo que ocurre en conminución, donde la masiva energía de deformación suministrada sobre la partícula en un corto periodo de tiempo causa una explosiva e inestable propagación de las grietas. Esto está en acuerdo con la observación de que la fractura intergranular de metales es más pronunciada a razones de deformación lentas.

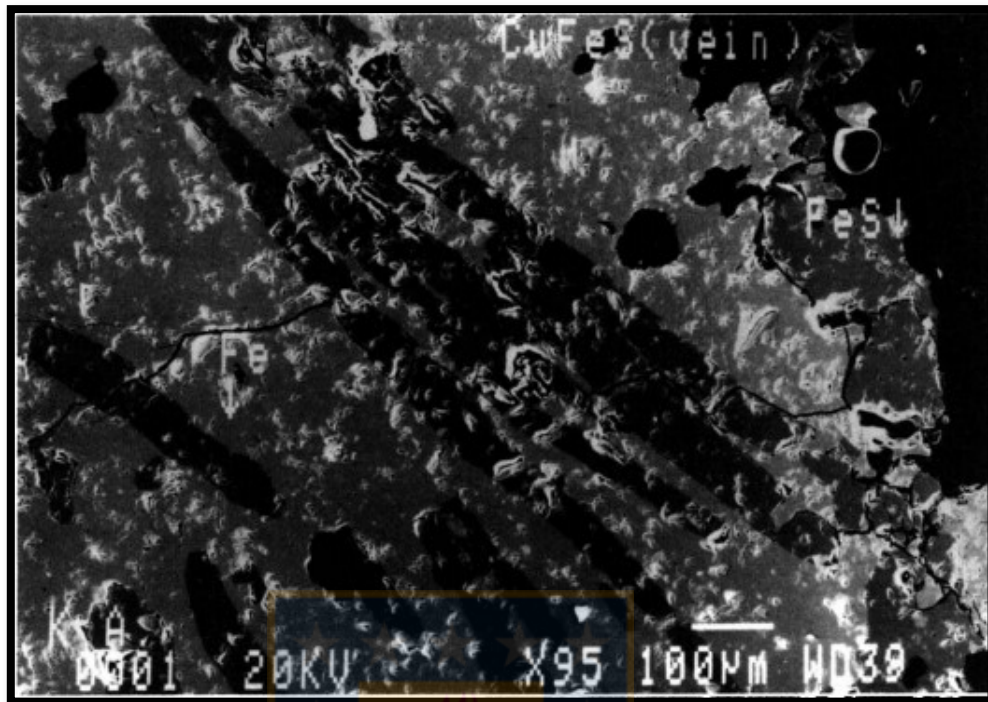


Figura 5: Propagación estable de grietas por medio de límites de grano [12].

Gran evidencia de propagación estable de grietas desarrollándose en la debilidad de los límites de grano da cuenta del alto grado de liberación encontrada en los depósitos aluviales secundarios. Los minerales en esos depósitos han sido liberados de la fuente primaria tras millones de años de desgaste químico y mecánico, las mínimas energías de deformación extienden las grietas de manera estable, quebrando la roca eventualmente alrededor de los límites grano. Es probable que la energía de deformación es suficiente solo para mover las grietas existentes en lugar de producir grietas nuevas, de modo que el resultado final no es solamente la liberación, sino que también un mineral libre de grietas. Una buena evidencia de esto es la gran proporción de diamantes encontrados en depósitos aluviales secundarios, tales como los de Namibia, transportados por ríos a muchos cientos de kilómetros de la fuente primaria.

Por lo tanto, un proceso de conminución ideal debería impartir la suficiente energía para crear una propagación estable de las grietas existentes para liberar el mineral en los límites de grano, además de dejar el material libre de tensiones después de la conminución, previniendo nucleación de nuevas grietas que podrían afectar la matriz.

2.3 Métodos de pretratamiento

Las investigaciones que se han realizado se han enfocado en debilitar el material, aumentar las grietas existentes o en iniciar conminución intergranular con el fin de reducir el consumo energético, además de un mejor rendimiento y de obtener una mejor ley de concentrado. Los métodos de pretratamiento del mineral se pueden dividir en dos categorías, como se muestra en la Figura 6.

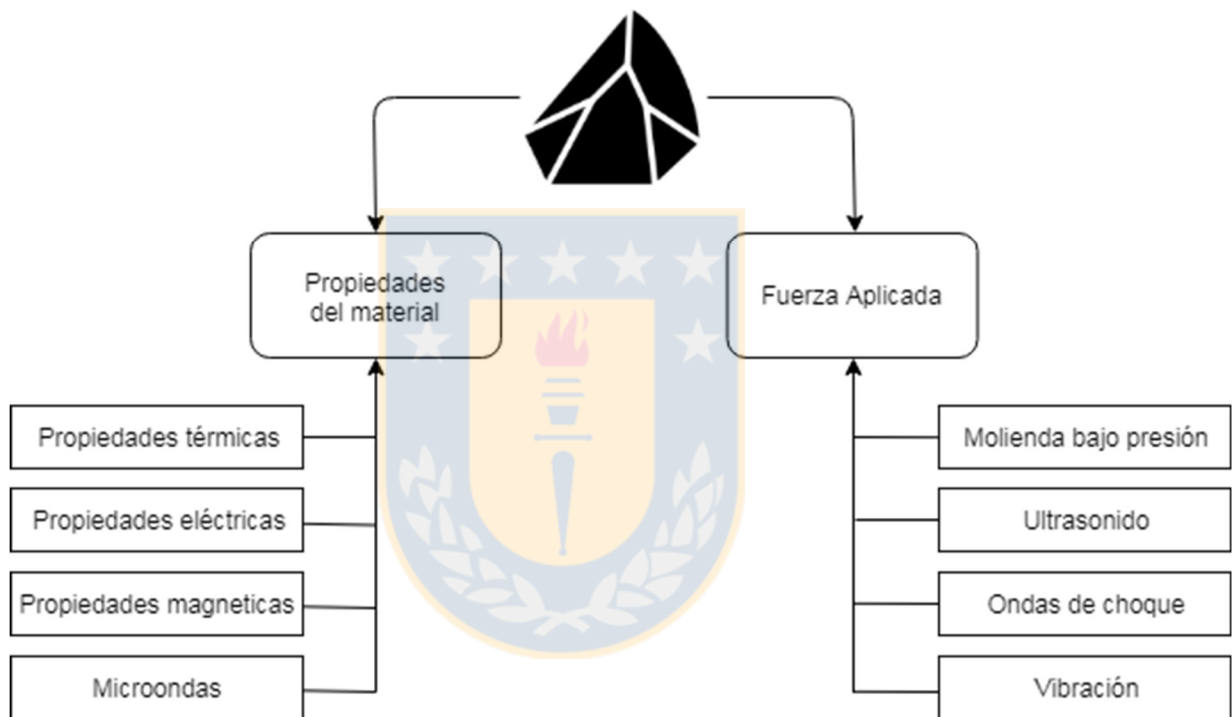


Figura 6: Clasificación de distintos tipos de pretratamiento.

La primera categoría está relacionada con métodos que se aprovechan de las diferencias en las propiedades del mineral, como propiedades superficiales, conductividad térmica y permitividad eléctrica con el fin de debilitar las interfaces del mineral o desarrollar nuevas fracturas. La otra categoría utiliza métodos de carga/esfuerzo como ultrasonido, carga cíclica, para mejorar la eficiencia en la transferencia de energía al momento de la molienda. A continuación, se presenta un breve resumen de los métodos mencionados.

2.3.1 Aditivos químicos

El uso de aditivos químicos en la molienda es una de las técnicas más antiguas. Estos aditivos de molienda trabajan bajo cinco conceptos básicos, modificación de las propiedades del flujo, desaglomeración de partículas, minimización de la espuma, interacción medio-partícula, modificación y debilitación de la superficie. Las propiedades de los sólidos y la tensión superficial del líquido imponen interacciones solido-sólido y solido líquido, que impactan en la creación de fracturas y propagación. Así que, varios aditivos se han explorado en el último siglo para mejorar la moliendabilidad de los materiales. Se presenta un breve resumen de algunos aditivos, y su efecto sobre la molienda [3].

Tabla 1: Aditivos químicos y su efecto [3]

Efecto	Aditivo
1. Modificación del flujo de la pulpa en el molino	Agua
2. Influencia en la re-aglomeración de los finos producidos	Alcohol, Glycol
3. Modificación de las características de la espuma durante la molienda	Amina, Aceite de coco, ácido oleico, soda caústica
4. Influencia en las interacciones del mineral con los medios de molienda, la pared del molino y entre las mismas partículas	Sales férricas ($MgCl_2$, $CaCl_2$ y $FeCl_2$ y $FeCl_3$)
5. Influencia la resistencia del material debido a: <ul style="list-style-type: none"> • Iniciación y extensión de la grieta • Retardo energético en la unión o sellado de grietas recién creadas 	Reductores de dureza: $NaCl$, $NaOH$, Na_2CO_3 , $MgCl_2$, $CaCl_2$, $AlCl_3$, Na_2CO_3 Químicos orgánicos: moléculas polares, xileno y benceno, alcohol.

i) **Desafíos y oportunidades**

Está bien establecido que los aditivos pueden mejorar la eficiencia en la moliendabilidad, además, estos tienen el potencial para reducir el consumo energético hasta incluso la mitad. De todos modos, el uso de los aditivos aún no se utiliza a escala comercial. La principal razón sobre este problema tiene que ver con:

- El costo de los aditivos químicos.
- Contaminación del producto (concentrado) debido a estos elementos
- Consumo de agua, contaminación de esta y problemas de seguridad.

Es necesario desarrollar nuevos y efectivos aditivos de molienda que no solo sean capaces de reducir el consumo energético, sino que también puedan mejorar la liberación y el desempeño del molino. Futuras investigaciones deben enfocarse en las siguientes áreas:

- El uso de tecnologías emergentes como modelación molecular y caracterización avanzada de las superficies, con el fin de proveer una comprensión más profundizada de los mecanismos envueltos.
- Una molienda en seco efectiva y la necesidad de molienda no convencional para combatir desafíos medioambientales (problemas con el agua, depósitos de colas) asociados con la molienda húmeda.

2.3.2 Tratamiento por ultrasonido

El ultrasonido es una onda de presión 3D con frecuencia mayor a los 20 kHz y está conformada por sucesivos ciclos de compresión y rarefacción. Existen tres fenómenos principales que contribuyen en la conminución; cavitación, erosión superficial por micro transmisión y fractura debido a la frecuencia de resonancia. La ocurrencia de todos esos fenómenos es afectada por la composición del material y la morfología de la partícula. Cuando una onda acústica se propaga en un sólido, esta se refleja y refracta en las fallas, fracturas e interfaces. La tensión generada en estos procesos ayuda a la propagación de la grieta. La velocidad de una onda de ultrasonido pasando a través de un mineral varía antes y después de la interacción con microporos o con las interfaces. Variaciones en las propiedades de la onda en las interfaces determinan el patrón de fractura y deformación. El efecto de fragmentación de campos de ultrasonido en sólidos ha sido investigado desde los años 50 [3].

i) Experimentos y resultados

El tratamiento por ultrasonido de minerales es mayormente llevado a cabo en un medio acuoso, condición requerida para mejor utilización de la energía y seguridad de la unidad de ultrasonido. Durante el tratamiento de ultrasonido por vibración, existe nucleación de burbujas generadas por cavitación, estas crecen y colapsan generando “micro jets” (micro chorros). Estos micro jets, en consecuencia, impactan sobre las partículas generando micro grietas. Las ondas de ultrasonido pueden mejorar la nucleación, crecimiento y coalescencia de estas micro grietas, causadas por la tensión.

Sin embargo, la mayoría de los estudios llevados a cabo en molienda asistida por ultrasonido revelan que este tiene un impacto en la superficie de las partículas e impactan en la moliendabilidad de partículas blandas y partículas finas. Por otro lado, este tratamiento no produjo resultados notorios en minerales duros y rocas.

ii) Desafíos y oportunidades

Los mayores desafíos tecnológicos para la implementación de este tratamiento son los siguientes:

- Energía insuficiente de intensidad de las ondas de ultrasonido para fragmentar rocas
- Desafíos tecnológicos asociados con materiales secos, partículas gruesas, partículas más finas.

Las potenciales áreas de exploración en esta área son:

- Desarrollar ondas de ultrasonido focalizadas de alta intensidad con propósitos de conminución de minerales
- Desarrollar un medio adecuado para transferencia energética eficiente desde el líquido al sólido durante el tratamiento del material.

2.3.3 Calentamiento con microondas

¿En qué se diferencia el calentamiento con microondas de otros tipos de calentamiento?

Desde la invención del fuego, la única forma de calentamiento radicalmente diferente a cualquier otra es la del calentamiento por microondas

Cualquier tipo de calentamiento convencional implica siempre una transmisión de calor desde un cuerpo de mayor temperatura (fuente de calor) a uno de menor temperatura. Esta transmisión de calor puede tener lugar mediante tres tipos de mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación. De esta manera, siempre existe un gradiente de temperatura donde las partes más externas o más expuestas, de cuerpo que se calienta tienen una temperatura superior a las más internas o menos expuestas. La conducción dentro del propio cuerpo tiende, con el tiempo, a hacer desaparecer este gradiente y homogeneizar la temperatura

En el caso del calentamiento mediante radiación de microondas la situación es totalmente distinta. Las microondas transmiten energía directamente a las partículas (a aquellas que sean capaces de interactuar con microondas) del propio cuerpo. Por tanto, el calentamiento se produce en el interior del cuerpo (lo que se conoce como calentamiento volumétrico) y en principio, no existe gradiente de temperaturas, tal como se muestra en la Figura 7. De hecho y dado que las pérdidas de calor son mayores en las superficies del cuerpo, podríamos considerar que el calentamiento se produce de adentro hacia afuera; al revés del calentamiento convencional [13].

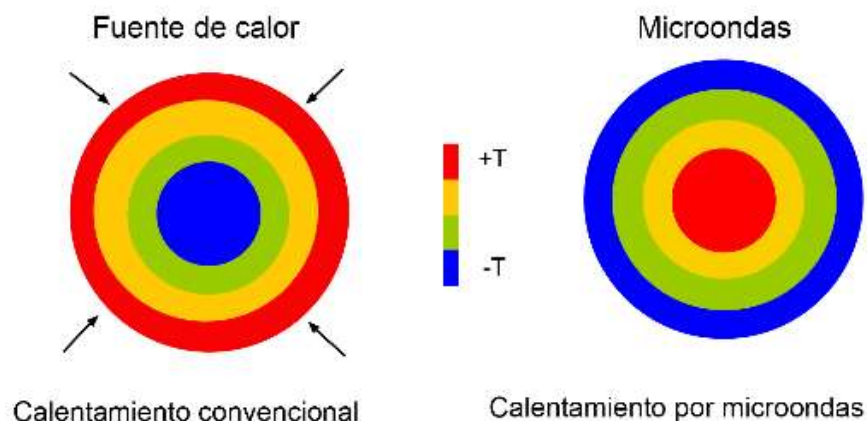


Figura 7: Diferencias de gradientes de temperatura entre microondas y calentamiento convencional [13].

i) Ejemplos de molienda asistida con microondas

El calentamiento con microondas, además de ser capaz de inducir un calentamiento rápido, selectivo y efectivo, lleva asociado costos energéticos inferiores a los procesos de calentamiento convencional. La ventaja de utilizar tecnología con microondas en los procesos de molienda industrial, se debe a que este tipo de radiación penetra sobre el mineral y las rocas, que al ser no uniformes, presentan zonas que absorben mejor la energía. Estas zonas son las que promueven la aparición de grietas que van a favorecer la posterior fragmentación del mineral.

Las diferencias entre el coeficiente de expansión térmica en los distintos puntos promueven la aparición de grietas y la fractura de la roca, haciendo más fácil la liberación del valioso mineral contenido en su interior. Según investigadores, el requerimiento energético del proceso va a depender de las propiedades dieléctricas del mineral, es decir, de su capacidad para convertir energía de microondas en calor. Algunos ejemplos de minerales tratados de forma exitosa fueron óxidos o sulfatos de metal, los cuales se lograron calentar fuertemente mientras que el material que los rodea apenas sufre modificación debido a que es relativamente transparente a la radiación de microondas. Otro ejemplo que representa el éxito de la molienda de minerales asistida con microondas es la kimberlita. Mediante la utilización de microondas se favorece la molienda de kimberlita y la extracción del diamante, ya que únicamente es la ganga la que se calienta. De esta manera, el diamante se daña mucho menos que en el proceso de molienda convencional ya que no se ve afectado por la radiación, y la kimberlita necesita mucho menos tiempo de residencia en el molino. Como resultado, el producto final son piezas menos dañadas, y, por tanto, de mayor valor [13].

2.3.4 Calentamiento convencional.

El tratamiento térmico por calentamiento convencional fue identificado tempranamente como un potencial método para mejorar la conminución y liberación de los minerales por medio de la debilitación de la roca induciendo fractura a través de los límites de grano. Este toma ventaja de las diferencias en la expansión y contracción térmica de un mineral de una sola fase en los granos anisotrópicos o en los granos adyacentes así como la rápida contracción debido al temple (disminución rápida de temperatura), resultando en el desarrollo de tensiones localizadas y daño en el material. Del mismo modo, si existen apreciables diferencias en los coeficientes de expansión térmica de una con roca con múltiples fases minerales, se esperaría obtener resultados similares al calentar la roca [14].

Además, la posibilidad de causar descomposición del mineral en la roca con el fin de promover la fractura intergranular también ha sido considerado por los investigadores [11].

Por lo tanto, en resumen, existen las siguientes formas de causar tensión entre la roca, para así lograr la fractura intergranular:

- Tensión generada en los límites de grano debido a anisotropías en los coeficientes de expansión térmica.
- Tensión generada en los límites de las fases minerales debido a diferencias en los coeficientes de expansión térmica
- Tensión generada debido a descomposición de las distintas fases minerales que componen la roca, gracias al aumento de la temperatura.
- Tensión generada gracias a la rápida contracción de las fases presentes en la roca, tras aplicar un temple esta.



2.4 Estudios anteriores

A continuación, se presentan algunos resúmenes de pruebas experimentales tomadas de la literatura, con el fin de informar sobre el tipo de implementación utilizada y obtener una base para los experimentos a realizar en esta memoria de título.

2.4.1 Scheduling et al. [15]

Se estudió el efecto del calentamiento de un mineral de casiterita cubierto principalmente con cuarzo, clorita, turmalina y hematita. (temperatura inversión cuarzo- 573°C)

Al calentar el mineral a 650°C seguido de un temple (aprovechando la inversión del cuarzo, acompañado de un cambio de volumen), se encontró una disminución significativa en el Work index y además una disminución en la producción de finos. Un análisis económico informo que el costo de calentar el mineral no era suficiente para cubrir el ahorro energético de la molienda, sin embargo, la mejora en la liberación podría obtener un aumento en la recuperación global del mineral de interés para finalmente lograr suplir el gasto energético de precalentar el mineral.

Conclusiones:

- Se podría reducir el requerimiento energético de la molienda en un 55%
- Se ha estimado que solo una mejora de un 1% en la recuperación de estaño sería necesario para cubrir los costos del calentamiento del mineral
- Se sugirió fuertemente que la liberación podría ser mejor aprovechada cambiando el equipo de molienda.

El estudio realizado por Scheduling et al. da a entender que el tratamiento no es económicamente factible para los minerales que utilizaron. Sin embargo, realizó un trabajo importante para futuras investigaciones ya que dio posibles soluciones para lograr revertir este déficit entre la energía que se utiliza en el pretratamiento y el ahorro que se obtiene. Una mejor recuperación metalúrgica, cambios en los equipos de molienda y distintos métodos de calentamiento son posibles escenarios para que este pretratamiento sea factible.

2.4.2 Tavares and King [10]

Experimentos de pretratamiento utilizando calentamiento convencional y por microondas, seguido de un temple con el fin de analizar el efecto sobre la microestructura, y en la fractura de distintos materiales, realizando medidas de densidad de la grieta y de fractura por pruebas de indentación. Se observaron grandes disminuciones en la energía de fractura y en la integridad del material.

Lo novedoso de este estudio, es el efecto del calor observado a nivel de microestructura, el cual se puede distinguir claramente el agrietamiento producido sobre el mineral, de manera directamente proporcional con el aumento de la temperatura de pre-tratamiento.

Además, se utilizó un método alternativo al test de Bond llamado "single particle fracture". Estos experimentos son llevados bajo condiciones reproducibles y proveen información fundamental que caracteriza la fractura de la partícula. Mediante un equipo llamado Ultrafast Load Cell (UFLC) desarrollado en el Utah Conminution Center, es posible realizar, en general, un método para medir la energía mínima para fracturar, el parámetro de daño y single particle breakage function. Estos entregan una base para el cálculo de la razón de fractura (rate of breakage) y función de fractura (breakage function) que son utilizadas en modelación y simulación de máquinas de conminución a larga escala.

Un dato interesante del UFLC, es que al realizar mediciones de energía de fractura sobre una quartzita térmicamente tratada, este entregó resultados consistentes en relación al Bond Work Index. Además, se obtuvieron mayores reducciones en la energía mínima de fractura (medida con UFLC) que en el Work index. Esto nos muestra que cambios pequeños pero significativos, que no pueden ser detectados mediante ensayos estándar de moliendabilidad, pueden ser precisamente medidos dada la alta calidad del equipo UFLC. Observación para tomar en cuenta para futuras investigaciones en cuanto a pretratamiento previo a la etapa de conminución y modelación de equipos.

Parte experimental

- Se utilizaron muestras de cuarzo, fluorapatita, hematita, mineral de hierro, titanio y mineral de cobre.
 - Se tomaron muestras de 10 gramos, calentadas a distintas temperaturas sobre crisoles de porcelana.
 - Se realizaron a bajas velocidades de calentamiento ($20^{\circ}\text{C}/\text{min}$) con el fin de asegurar un calentamiento uniforme a través de la muestra
 - El monitoreo de los experimentos se hizo utilizando una termocupla tipo K
 - Las muestras fueron templadas con aire o agua inmediatamente después de ser retiradas del horno (entre $15\text{-}25^{\circ}\text{C}$).

Principales trabajos realizados en la investigación:

- Se midió la densidad aparente de las grietas usando un sistema óptico de análisis de imágenes.
- Se calculó la dureza de Vickers, y la energía de fractura superficial mediante test de indentación
- Se llevaron a cabo ensayos de impacto-fractura para estimar la energía de fractura y la rigidez de la partícula.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados de pretratamiento, mediante un microscopio sobre muestras pulidas de cuarzo, con el fin de analizar el impacto del calentamiento y posterior templado con agua en la microestructura de la partícula.

Para realizar este tipo de análisis, se montaron varios gramos del material en resina epoxy, para finalmente ser pulidos con materiales abrasivos.

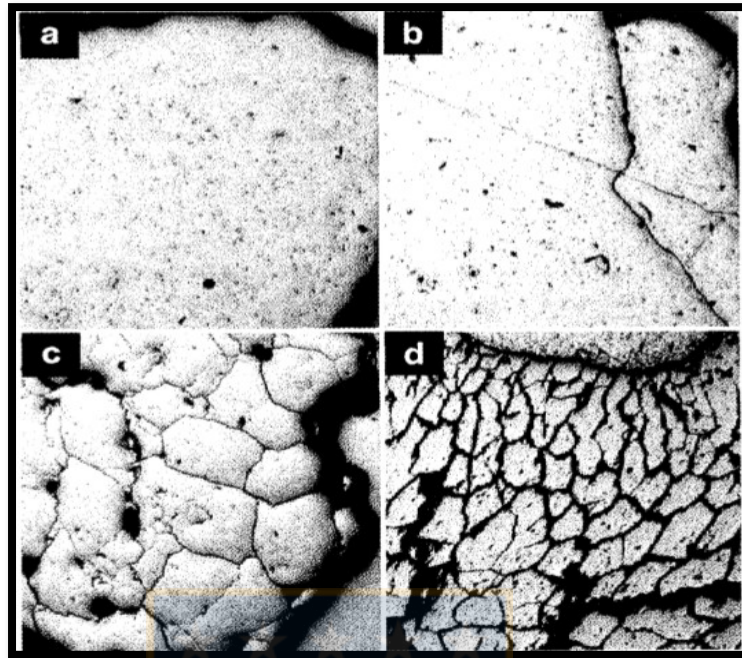


Figura 8: Micrografías de partículas de cuarzo; (a) no tratado. Calentado y templado con agua: (b) calentado a 200°C, (c) calentado a 300°C y (d) calentado a 1000°C [10].

En la Figura 8, se examinaron muestras pulidas mediante un microscopio óptico, se observa que el pretratamiento permite inducir grietas que pueden ser identificadas fácilmente, y además, como se puede observar en la secuencia de las micrografías, el grado de calentamiento determina la intensidad del agrietamiento.

Para medir la densidad de estas grietas, se utilizó un sistema óptico de análisis de imágenes. Este consiste en un microscopio óptico, una cámara CCD y un microcomputador. El análisis de la imagen se realizó mediante un software de análisis de imagen llamado VIDAS. La densidad aparente fue calculada por la razón entre el largo total de la grieta y el área escaneada.

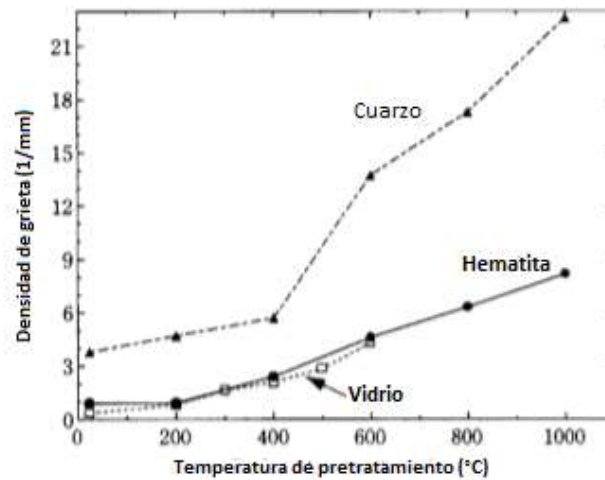


Figura 9: Efecto del calentamiento del mineral a distintas temperaturas, seguido de un temple con agua sobre la densidad de grieta [10].

Se observa un claro aumento de la densidad de la grieta sobre las muestras a medida que aumenta la intensidad de la temperatura en el pretratamiento, avalando lo observado en las microfotografías de la Figura 9.

Como se mencionó anteriormente, las Figuras 8 y 9, muestran efectos que tiene el pretratamiento a nivel de microestructura.

A continuación, se presentarán los efectos del calentamiento de mineral a nivel de fractura, que nos entregarán una idea de cómo afecta la temperatura sobre la integridad del mineral, con el objetivo de una idea más cuantitativa sobre la evolución del mineral a medida que aumenta la temperatura de pretratamiento

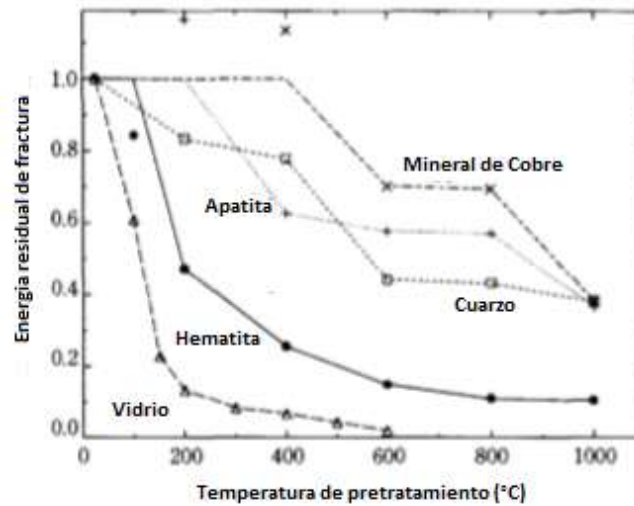


Figura 10: Efecto del calentamiento del mineral y temple con agua sobre la energía residual de fractura de la partícula de diferentes minerales [10]

Cabe señalar, que la energía residual de fractura está determinada por la razón entre la energía de fractura antes y después del pretratamiento.

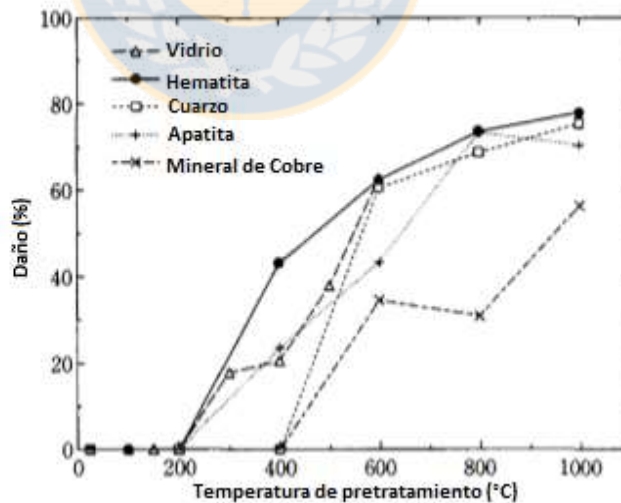


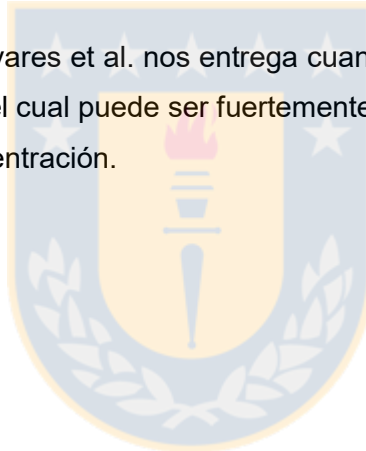
Figura 11: Efecto del calentamiento y temple con agua de distintos minerales en el parámetro de daño de mineral [10].

De la Figura 10, se observa una gran disminución de la energía residual de fractura de la partícula a medida que aumenta la temperatura de pretratamiento, sin embargo, esto solo asegura

una mayor facilidad de conminución en las partículas madres y no necesariamente una disminución en la conminución en general. Un agrietamiento sustancial en todo el volumen de la partícula asegura no solo poco gasto energético en el rompimiento de las partículas madres, sino que también en un gran número de la progenie. Por lo tanto, para lograr esto, se debe tener un importante aumento en el parámetro daño del material (Figura 11) que está definido por la razón entre la rigidez (medida con UFLC) antes y después del pretratamiento,

De la Figura 11, se observa que, para lograr cambios importantes en el daño, se debe pretratar a altas temperaturas. El significado de todo esto, es que, para lograr ahorros importantes en la energía de la conminución, se debe realizar grandes gastos en energía de pretratamiento. Esto ha sido la mayor limitación para la aplicación industrial del calentamiento convencional, puesto que mientras mayor sea la energía suministrada, hay mayor aumento en los costos del pretratamiento.

El estudio realizado por Tavares et al. nos entrega cuantitativamente el gran efecto que tiene la temperatura sobre el mineral, el cual puede ser fuertemente aprovechado para lograr mejoras en procesos de conminución y concentración.



Capítulo 3: Diseño experimental

Se realizaron pruebas a partir de un mineral típico de la minería Chilena; CMET (Complejo Mafico El Teniente) y Dacita, los cuales a partir de muestras representativas se procederán a calentar por medio de una velocidad de flujo de calor constante, con el fin de asegurar un calentamiento uniforme y completo de la muestra.

Posteriormente, se procederá a calcular el Work Index, gramos de molienda por revolución del molino (GPR) y la energía necesaria para la molienda del mineral mediante las ecuaciones de Bond. Estos valores serán calculados para cada una de las muestras sometidas al calor con el fin de analizar los valores de este parámetro y como varían al ser expuestas a distintas temperaturas.

Debido a limitaciones de equipos, no fue posible realizar pruebas de concentración con el fin de analizar efectos de la temperatura en la ley final de concentrado, sin embargo, se analizarán experimentos de literatura bajo métodos de calentamiento análogos.

En tanto, se procederá a calentar las muestras a las temperaturas de 300, 400, 500 y 600°C. Estos valores de temperatura fueron escogidos de acuerdo con lo observado en los resultados de los experimentos anteriores, en los cuales comienzan a aparecer cambios notorios en la microestructura del mineral según los resultados de Tavares [10]. Cabe señalar que debido a limitaciones de equipos, no es posible realizar el calentamiento en atmosfera inerte.

El aumento de temperatura se realizó en un horno eléctrico, este está conectado a un panel de control el cual se puede fijar una temperatura deseada (set point) y esta va en aumento hasta que alcanza el nivel deseado (Figura 16), cifras en rojo indican temperatura dentro del horno y en verde indican el set point. Por otro lado, la temperatura del mineral se mide utilizando una termocupla tipo K y se indica en el medidor de temperatura mostrado en la Figura 18.

Una vez alcanzada la temperatura dentro del horno, el mineral se deja calentar durante un tiempo de 1.5 horas aproximadamente con el fin de asegurar el calentamiento completo y homogéneo del mineral. Para asegurar la homogeneidad de la temperatura del mineral, la muestra se irá mezclando manual y constantemente durante el procedimiento dentro del horno. Esto debido a que existen diferencias en la transferencia de calor entre la pared del recipiente (el cual está contenido el mineral) y el mineral y la transferencia de calor entre las mismas partículas del mineral hacia el centro del recipiente.

Es posible que al realizar el calentamiento, se generen reacciones no deseadas, por lo que será interesante analizar los nuevos elementos que podrían desenvolverse en el mineral y así, obtener un análisis más completo sobre los resultados obtenidos.

3.1 Caracterización de muestras

Las muestras para el trabajo experimental consisten en Dacita (Figura 12) y Complejo Máfico El Teniente (Figura 13), este último mineral es de la más amplia distribución en el yacimiento, albergando más del 80% de la mineralización de cobre presente en el depósito en la minera que se procesa.



Figura 12: Muestra de dacita utilizada en las pruebas de Bond.

Por otro lado, en cuanto a estudios de la roca, Burgos (2002) estudió petrográfica y geoquímicamente la roca de caja de este yacimiento (CMET) estableciendo que sus texturas predominantes son porfídicas e intersertal, con un contenido de fenocristales entre 5% y 30% y que su contenido de sílice varía entre 47.7% y 54.7% (Citado en [16]).



Figura 13: Muestra de mineral CMET utilizado en las pruebas de Bond.

3.2 Pruebas de Moliendabilidad

El objetivo de estas pruebas consiste en realizar el método de Bond convencional para determinar el índice de trabajo de los minerales a distintas temperaturas de pretratamiento, las que van desde 300°C a 600°C, con el fin de determinar el comportamiento de distintos parámetros como moliendabilidad, energía específica y work index y analizar el impacto que estos tendrían a escala de operación minera, específicamente en la molienda con bolas.

El test normalizado de bond está descrito en el Anexo C [17] el cual se procederá según lo descrito en el punto 3.2.1 para cada una de las muestras con y sin pretratar. Se utilizan las siguientes ecuaciones para obtener los valores de cada parámetro que será evaluado según la temperatura de acondicionamiento:

$$W_{i_t} = \frac{(44.5)}{p_1^{0.23} G b p^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{X_{QT}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{GT}}} \right)} \quad (1)$$

$$E = Wi \left[\frac{10}{\sqrt{X_Q}} - \frac{10}{\sqrt{X_G}} \right] \quad (2)$$

Donde (1) y (2) describen el cálculo para el índice de trabajo de Bond (Work Index) y energía específica respectivamente.

3.2.1 Procedimiento para los ensayos

- 1) Preparar el 100% de la muestra a bajo malla 6
- 2) Preparar 700cc de la muestra en una probeta graduada (alimentación).
- 3) Realizar análisis granulométrico de la alimentación (F_{80}). Tener en cuenta el porcentaje de mineral bajo la malla de corte (-#100 en este caso)
- 4) Calcular IPP (Producto Ideal) para obtener 250% de carga circulante

$$IPP (g) = \frac{\text{masa de la alimentación inicial (g)}}{3,5}$$

- 5) Dividir la muestra total hasta obtener 8 a 12 muestras un poco más pequeña que el IPP.
- 6) Alimentar al molino de bolas la Alimentación inicial y moler por un periodo de x revoluciones

x = número de revoluciones basadas en el work index estimado; usualmente 50,100,150 o 200 revoluciones

- 7) Vaciar el molino, separar bolas del mineral. Tamizar el producto en el Ro-tap durante 10 a 15 minutos. Masar y eliminar el mineral bajo tamaño (-#100).
- 8) Producto = masa de alimentación – masa del sobre tamaño.
- 9) Producto neto = Producto – masa de bajo tamaño en la alimentación al molino.
- 10) Gramos netos de producto por revolución (Gpr)

$$Gpr = \frac{\text{Producto neto (g)}}{\text{Numero de revoluciones (rev)}}$$

- 11) Agregar nuevo material al sobre tamaño (carga circulante) para volver a alimentar los mismos gramos de alimentación inicial, usando las muestras separadas del paso 5).
- 12) Calcular número de revoluciones del siguiente ciclo

$$No. rev = \frac{IPP (g) - \text{masa del bajo tamaño en alimentacion}}{Gpr \text{ del ciclo anterior}}$$

13) Repetir pasos 7-13 hasta que el Gpr o la carga circulante se mantengan constante (alrededor de 250%). Mínimo 5 ciclos

$$Carga \text{ circulante} = \frac{\text{Alimentación inicial (g)} - \text{Producto de últimos 2 - 3 ciclos}}{\text{Produco últimos 2 - 3 ciclos}}$$

Luego, las ecuaciones a utilizar para el cálculo del work index y energía específica son las (1) y (2).

3.2.2 Simulación mediante Molycop-Tools

Moly-Cop Tools © 3.0 es un conjunto de 63 hojas de cálculo EXCEL fáciles de usar, diseñadas para ayudar a los ingenieros de procesos a caracterizar y evaluar la eficiencia operativa de cualquier circuito de molienda dado, siguiendo metodologías estandarizadas y criterios de evaluación ampliamente aceptados.

Moly-Cop Tools incorpora un conjunto completo de simuladores digitales para aplicaciones de molienda convencional y semiautógena con las correspondientes rutinas de balance de masa y estimación de parámetros; más hojas de cálculo complementarias con respecto a los cálculos de la Ley de Bond, el 'álgebra' de los medios de molienda y otras funciones de gran utilidad.

Una vez obtenidos los valores de Work Index para las distintas temperaturas, se procedió a simular la capacidad de procesamiento de la etapa de molienda de molino de bolas convencional mediante las planillas "Bond's Law Application" de Molycop Tools, utilizando datos reales de planta de la planta de molienda Sewell, El Teniente – Codelco de la memoria de Título "Optimización de tamaños de transferencia en chancado y molienda Sewell mediante simulación de procesos"

Esta planilla, nos permite obtener los valores de energía específica (kWh/ton) y capacidad de la planta (tmsd) dando valores de entrada de F80 provenientes, en este caso, de la etapa de molienda primaria, número de molinos y sus dimensiones y P80 deseado (óptimo para la etapa de flotación). Teniendo estos valores, se procederá a simular la capacidad de la etapa de molienda variando los valores de Work Index obtenidos tras el pretratamiento, como se muestra en la Figura 14.

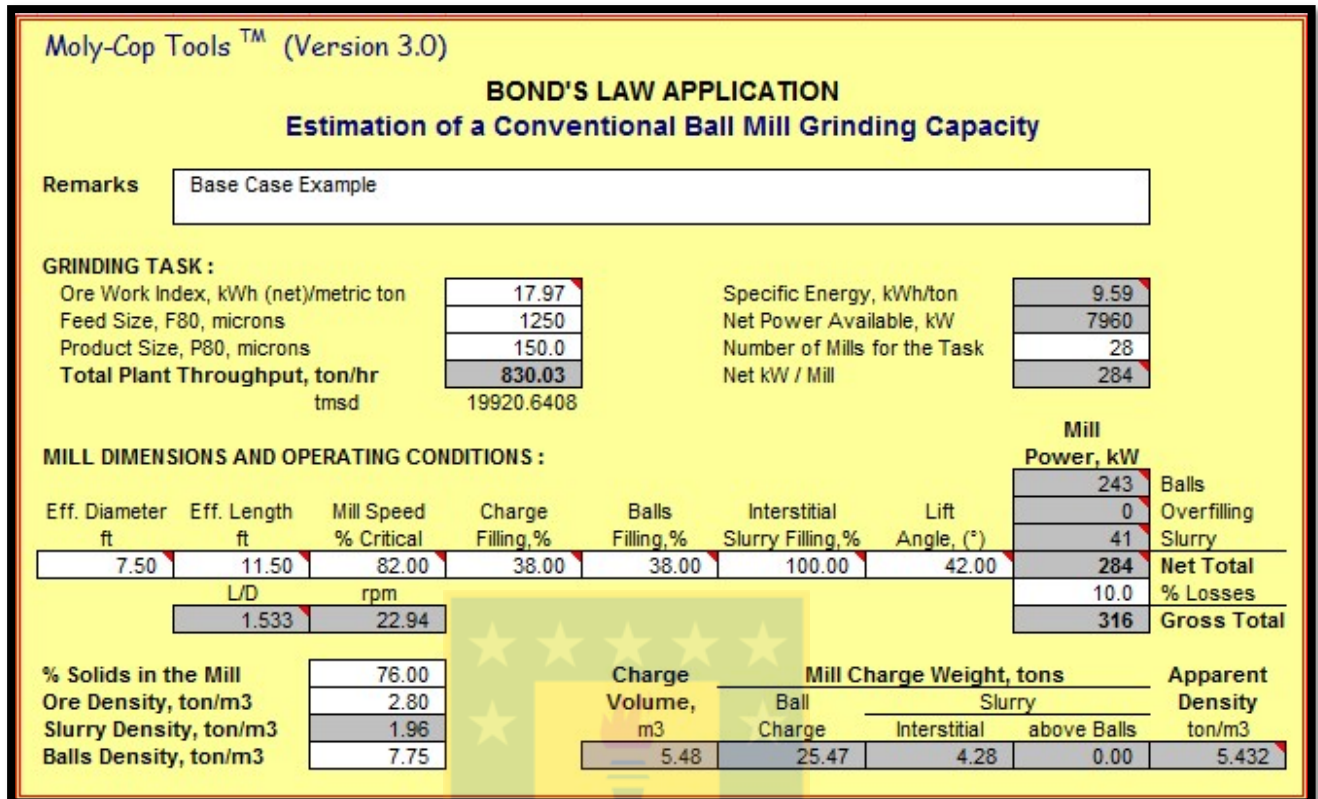


Figura 14: simulación mediante MolyCop Tools.

Para el presente caso se tomaron datos de la memoria de título “Optimización de tamaños de transferencia en chancado y molienda Sewell mediante simulación de procesos.” [18]. Fijando un F_{80} de 1250 micrones proveniente de la molienda de barras y un total de 28 molinos de bolas, se procedió a simular el comportamiento del tonelaje total diario de la planta mediante la variación del valor del Work Index según la temperatura de pretratamiento.

3.3.1 Preparación de las muestras

Se preparó el material de CMET y Dacita, reduciendo su tamaño en un chancador de mandíbula de laboratorio, hasta obtener un 100% bajo 6 mallas, que es el tamaño necesario para realizar este tipo de prueba. Posteriormente se obtuvieron muestras representativas de aproximadamente 7 kg de material mediante un divisor rotatorio, con el fin de obtener muestras con distribución de tamaño similares que posteriormente se calentarán en un horno eléctrico convencional (Figura 17) a las temperaturas de 300, 400, 500 y 600°C (definidas anteriormente) y además de una muestra sin pre tratar con el objetivo de realizar comparaciones en los Índices de Bond sin el acondicionamiento. Luego, se dejarán enfriar a temperatura ambiente para que una vez frías, poder comenzar con los ensayos.

Se utilizó un horno eléctrico industrial para realizar el calentamiento de las muestras, en un recipiente de acero inoxidable y durante 1.5 horas, mezclando el material continuamente con el fin de obtener una muestra lo más homogénea posible en cuanto a temperatura. La temperatura fue medida con una termocupla tipo K y se indica en el momento en el medidor de temperatura de la Figura 18.

El tiempo para calentar el mineral, como se mencionó anteriormente fue de 1.5 horas. Este fue determinado debido a que fue el tiempo mínimo que demoró el mineral, en todos los casos, en acercarse a las temperaturas establecidas anteriormente. En algunos casos no se llegó a la temperatura indicada y en otros casos la temperatura sobrepasó el nivel deseado por lo que se consideró una desviación aceptable de ± 25 °C en la preparación de las muestras (que fue el valor mas lejano a la temperatura deseada a lo largo del calentamiento, entre todas las muestras).



Figura 16: Panel de control de horno



Figura 17: Horno eléctrico utilizado para el calentamiento de las muestras.

Finalmente, una vez alcanzada la temperatura necesaria para cada muestra, estas se dejaron enfriar a temperatura ambiente como se puede observar en la Figura 19. Finalmente, se dividieron en 10 partes de 700g mediante un cortador rotatorio para posteriormente, dar inicio a los ensayos de Bond.



Figura 18: Medidor de temperatura



Figura 19: Material enfriándose, expuesto a temperatura ambiente.

Como se mencionó anteriormente, el calentamiento y enfriamiento se realizó bajo condiciones de atmosfera oxidante, es decir, el material estaba expuesto a que ocurrieran reacciones de oxidación no deseadas al momento de realizar el calentamiento de este. Reacciones las cuales se vieron reflejadas en fuertes emisiones de gases a medida que aumentaba la temperatura de pretratamiento, y además, un cambio de color tanto en la superficie, como al interior del mineral. Sin embargo, esto podría ser beneficioso ya que estas mismas reacciones podrían ser las responsables en las diferencias de moliendabilidad en los resultados finales. Sin embargo, estas mismas reacciones podrían entorpecer el procedimiento aguas abajo, específicamente en la flotación.

3.3.2 Test de Bond

Cada una de las muestras de 7kg de las diferentes temperaturas, se dividieron en 10 partes iguales de 700g mediante un cortador rotatorio, con el fin de obtener una distribución granulométrica similar en cada alimentación al molino de Bond. Esta cantidad de material (700g) se debe a que cada alimentación al molino es de aproximadamente 350 g, en el cual, mediante el método del cono y cuarteo se obtiene esta cantidad de manera fácil y rápida.

Una vez alcanzada la carga circulante de 250%, se procedió a hacer un análisis granulométrico de la alimentación y del producto final para que finalmente mediante ecuaciones 1 y 2 obtener los valores de sus respectivos índices de Bond y energía específica de molienda. Estas pruebas se realizarán en duplicado de manera cautelosa, debido a que por tiempo y limitación de equipos, es muy difícil realizarlas en triplicado. Se trabajó con planillas Excel con el fin de facilitar los cálculos. Ejemplo para el experimento número 1 en la Figura 20.

N° Prueba	1			
Mineral	CMET			
Temperatura	Ambiente			
N° de iteración	Carga Circulante (%)	Nueva alim. (g)	Bajo tamaño en alim. (g)	Revoluciones
1	225	1256	269.70	100
2	386	386.9	82.61	150
3	262	258.2	55.13	259
4	254	346.6	74.01	254
5	256	354.6	75.71	256
6	253	353	75.37	262
7	252	356	76.01	264

Sobretamaño en producto (g)	Bajo tamaño en producto (g)	Bajotamaño producido (g)	Gramos por revolución
869.2	386.9	117.20	1.172
997.8	258.2	175.59	1.171
909.4	346.6	291.47	1.123
901.4	354.6	280.59	1.107
903	353	277.29	1.084
900	356	280.63	1.073
899	357	280.99	1.066

Figura 20: Planilla Excel de la prueba N°1 del test de Bond.

Cabe señalar que únicamente se completan los cuadros de alimentación inicial (iteración número 1 de la columna de nueva alimentación) y el sobre tamaño de cada ciclo (columna de sobre tamaño en producto).

Cada ensayo se terminó de realizar cuando en las últimas 3 iteraciones se presentaban variabilidades cercanas a 250%

Para cada ciclo de alimentación, se tomó una de las muestras de 700g y mediante la técnica de cono y cuarteo, se obtuvieron las cantidades necesarias de alimentación para asegurar una distribución granulométrica similar en cada uno de los ciclos de alimentación al molino de Bond.

Capítulo 4: Resultados y discusión

Los resultados de los Work index y energía específica obtenidos de los test de bond para los minerales de CMET y Dacita están representados en la Figuras 21 y 22 con un tamaño de corte de malla 100 para cada test realizado (149 micrones). Los resultados obtenidos están en completo acuerdo según la literatura, a medida que aumenta la temperatura de pretratamiento el Work index tiende a disminuir de manera considerable para ambos tipos de minerales.

4.1 Work Index

A partir de la Ecuación 1 se construyó la Figura 21, gráfico que indica la variación del work index con respecto a la temperatura de pretratamiento de ambos minerales.

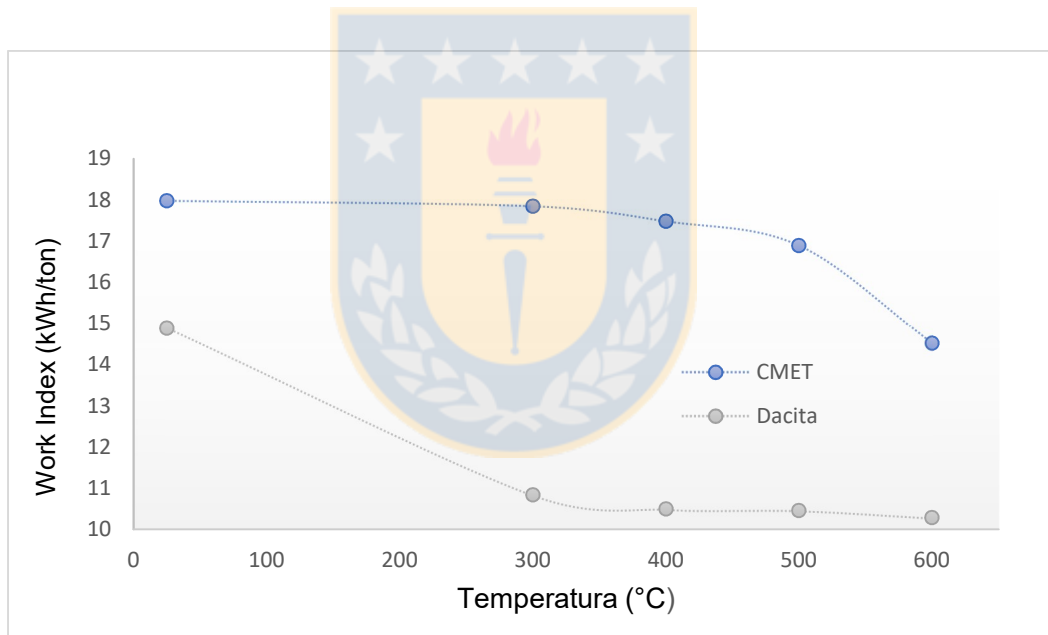


Figura 21: Variación del índice de Bond con respecto a la temperatura de pretratamiento para los minerales de CMET y Dacita.

Se logran observar grandes disminuciones de Work Index para ambos minerales. Sin embargo, grandes disminuciones en este valor ocurren a partir de 500°C para CMET y de 25°C a 300°C para el caso del mineral de Dacita, luego de esto, existe una disminución mínima y casi constante (en comparación a la que ocurre de 25 a 300°C), caso contrario a lo que ocurre con CMET donde la gran disminución ocurre desde los 500°C. Esto podría deberse a que en dichos valores de temperatura, ocurren reacciones específicas según los componentes de cada mineral que darían

paso a las tensiones necesarias para causar el agrietamiento entre las distintas fases minerales que componen el material.

Se tiene conocimiento que el mineral CMET está compuesto en su gran mayoría por Sílice, por lo que los resultados coinciden con la temperatura de inversión del cuarzo (573°C), en la que se produce un aumento de volumen lo que explicaría la gran disminución del WI a esta temperatura.

Sería interesante realizar un análisis mineralógico para determinar cuál la fase mineral principal responsable de esta notoria disminución en el Work index. Por otro lado, las disminuciones pequeñas (y constantes) de este valor con el aumento de la temperatura podrían ser resultados de las expansiones térmicas debido al aumento de la temperatura, al existir diferencias en los coeficientes de expansión térmica de las distintas fases minerales que componen la roca.

Al tratarse de calentamiento convencional en un horno eléctrico, este aumento de temperatura ocurre de manera bastante lenta mediante gradientes de temperatura, en comparación a lo que podría ser un calentamiento por microondas, el cual ocurre de manera rápida, y además, se trata de un calentamiento selectivo, ya que no actúa sobre todos los minerales presentes, con lo que este “shock” de calentamiento sería más beneficioso para producir microfracturas debido a una expansión volumétrica rápida gracias a este fenómeno, el cual no da tiempo a las partículas para que se reordenen, produciendo agrietamiento entre los límites de grano, para posteriormente, facilitar la conminución integranular.

Por otro lado, investigadores sugieren someter el material a un proceso de templado (quenching) después del calentamiento, lo cual, al contrario de lo que ocurre con el aumento de temperatura, se produce contracción en el mineral, causando nuevamente tensiones entre las fases minerales, lo que daría lugar a microfracturas entre estas fases.

4.2 Moliendabilidad

La moliendabilidad (gramos de mineral molidos bajo malla 100 por revolución del molino) de los minerales se ve fuertemente afectada por la temperatura (Figura 22). A diferencia de los grandes cambios de work index observados en la Figura 21, este valor varía de manera más pequeña con el aumento de la temperatura. Es un gran indicador de que los efectos de la temperatura sobre el mineral debido a que si bien, existen disminuciones notorias en el work index a medida que aumenta la temperatura, la ecuación de Bond es muy sensible a cambios en el P_{80} y F_{80} . Mejoras en este parámetro podrían ser bastante beneficiosas para trabajo en planta, dado que esta disminución significaría un menor número de revoluciones para alcanzar el tamaño deseado en la conminución, por lo tanto, un menor tiempo de residencia del mineral en el equipo, y, en consecuencia, mayor capacidad de procesamiento de minerales en planta.

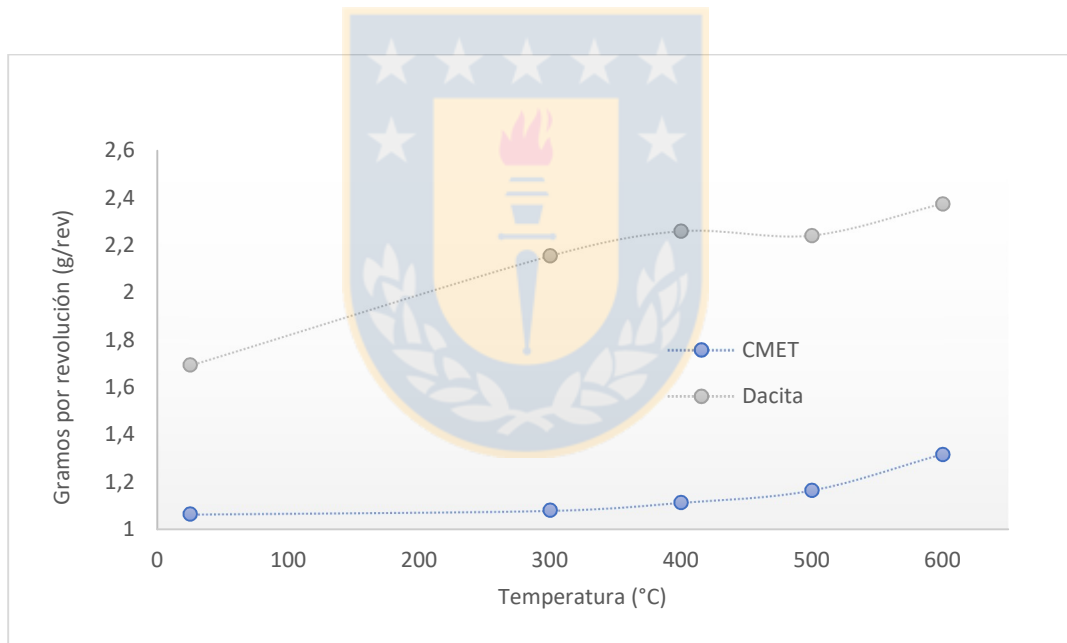


Figura 22: Variación de los gramos molidos por revolución del molino para ambos minerales.

El principal beneficio de lograr la conminución intergranular es que el tamaño final tras la molienda (P_{80}) sería mayor que el que se obtiene en la molienda convencional, puesto que el mineral de interés se encontraría liberado en un tiempo mucho menor. Esto, sumado a las mejoras en la moliendabilidad del mineral daría un tiempo de residencia del mineral mucho menor, lo que traería grandes beneficios en la producción.

4.3 Energía específica

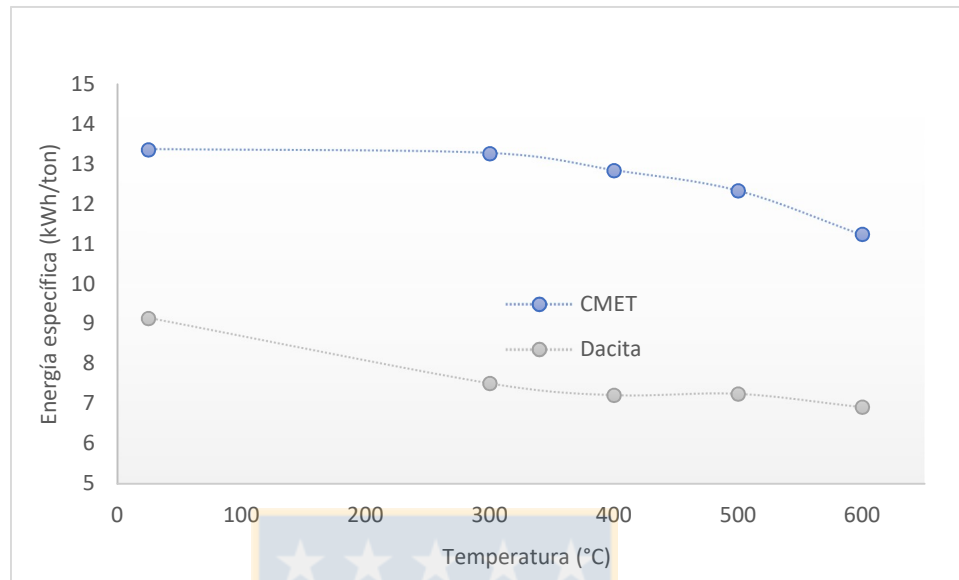


Figura 23: Variación de la energía específica con respecto a la temperatura para CMET y Dacita.

En términos de energía específica, este valor nos indica la cantidad de energía necesaria en kilovatios hora por tonelada (kWh/ton) para llegar desde un F80 (-6#) hasta el P₈₀ establecido en el test de Bond (100#) (Figura 23). Este valor ve fuertemente afectado por el pretratamiento realizado, pasando de valores cercanos al 13.5 y 9.2 kWh/ton a valores de 11.2 y 6.9 kWh/ton para CMET y Dacita respectivamente. Este es un indicador de gran importancia para los ahorros energéticos que se pretenden alcanzar con el pretratamiento.

En resumen, al realizar conminución asistida térmicamente conllevaría a grandes beneficios tales como:

- Disminución en el tiempo de residencia del molino, debido a mejoras en la moliendabilidad y disminución en el P₈₀ dado la fractura intergranular
- Menor desgaste en los medios de molienda
- Mejor recuperación del mineral de interés debido a mejoras en la liberación del mineral.
- Menores gastos de energía en la molienda debido a la disminución del índice de trabajo del mineral (Work Index) aumento del P₈₀.
- Disminución de la producción de finos que dificultan el proceso aguas abajo

A continuación, en las tablas 2 y 3 se presentan los valores resumidos de los gráficos anteriores para ambos minerales.

Tabla 2: Resumen del efecto de la temperatura para el mineral de CMET.

Temperatura de la muestra (°C)	Moliendabilidad (g/rev)	Work Index (kWh/ton)	Energía específica (kWh/ton)	Disminución Work index (%)
Ambiente	1.06	17.98	13.36	-
300	1.08	17.85	13.27	0.72
400	1.11	17.48	12.85	2.78
500	1.16	16.89	12.34	6.06
600	1.32	14.52	11.24	19.24

Tabla 3: Resumen del efecto de la temperatura para el mineral de Dacita.

Temperatura de la muestra (°C)	Moliendabilidad (g/rev)	Work Index (kWh/ton)	Energía específica (kWh/ton)	Disminución Work Index (%)
Ambiente	1.69	14.89	9.14	-
300	2.16	10.84	7.51	37.35
400	2.26	10.49	7.22	41.89
500	2.24	10.46	7.25	42.32
600	2.38	10.28	6.91	44.78

4.4 Resultados Molycop-Tools

Mediante la ayuda de las planillas Molycop-Tools “Bond’s Law Application” y con datos obtenidos en planta, se procede a simular el comportamiento del tonelaje y como varía este según el valor del work index para un F_{80} y P_{80} fijos.

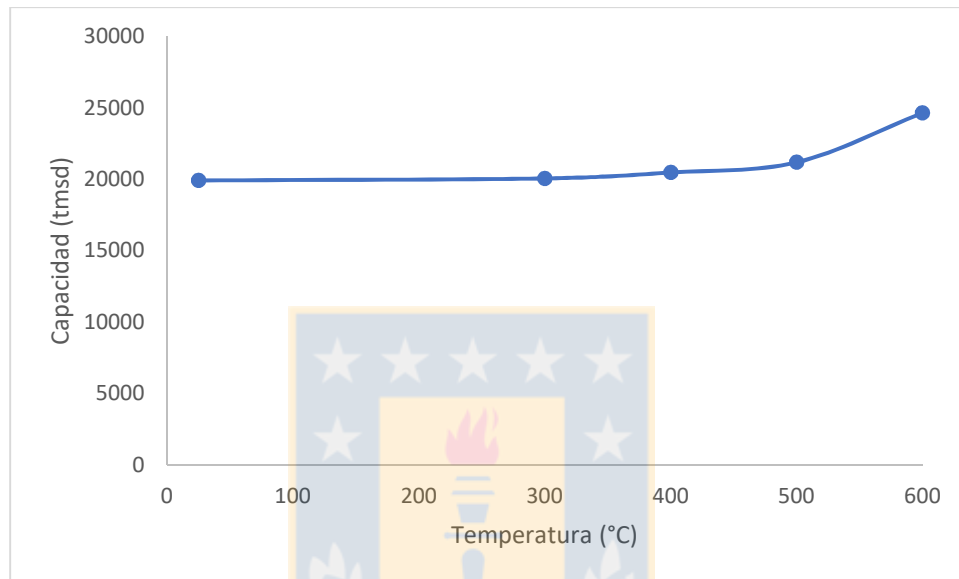


Figura 24: Variación de la capacidad de procesamiento en los molinos de bolas con respecto a la temperatura (CMET).

Como se muestra en la Figura 24, con el aumento de temperatura de pretratamiento, es posible lograr una mayor capacidad del molino de bolas, esto gracias a la disminución del Work Index del mineral por lo que es posible lograr el P_{80} de manera más rápida, así disminuyendo el tiempo de residencia del mineral en el molino, por lo tanto, lograr una mayor capacidad de procesamiento o bien, utilizar menor cantidad de molinos para el mismo tonelaje.

Este aumento de capacidad, se traduce finalmente en aumento en la producción por lo tanto mayores ganancias para la planta de molienda-concentración.

4.5 Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica, se procederá a analizar los datos de la planta de molienda Sewell, ya que se cuenta con las dimensiones y cantidad de molinos con las que opera, además del tonelaje y Work Index similares a los del mineral que se está estudiando en esta memoria de título. Todo esto en función de cuanto debería ser el gasto máximo energético en el pretratamiento, con el fin de que este método sea económicamente factible. Además, a partir de la capacidad calórica del mineral, se procederá a calcular cuanta es la energía necesaria que se debe suministrar al mineral para elevar su temperatura. Como sabemos (de la caracterización) que el mineral de CMET está compuesto en más de un 50% de sílice, se tomará este último mineral como comparación. Si bien, no es una comparación del todo correcta, esta puede servir como guía a lo que podría ser el costo del pretratamiento, puesto que no fue posible obtener los datos de composición del mineral.

En primera instancia, se consideraron nuevos ingresos por el aumento del tonelaje debido a la venta del cobre fino. Los parámetros utilizados para el cálculo de los ingresos son los de Tabla 4 (valores obtenidos de [18]):

Tabla 4: Valores necesarios para la evaluación económica.

Dato	Valor
Recuperación Sewell	82%
Ley Rajo Sur	0.685%
Precio Cobre	289 cUSD/lb
Precio energía eléctrica	110 USD/MWh

Tabla 5: Valores obtenidos tras la simulación mediante MolyCop-Tools.

Work Index	Tonelaje	Total Cu	Recuperado	Diferencia	Ganancias
(kWh/ton)	(tmsd)	(ton/día)	(ton/día)	(ton/día)	(USD/día)
17.98	16947.63	116.09	95.19	0	0
17.85	17071.22	116.93	95.88	0.6943	4,426
17.48	17432.41	119.41	97.91	2.7231	17,361
16.89	18041.52	123.58	101.33	6.1445	39,174
14.52	20986.32	143.75	117.88	22.6855	144,631

El valor de las ganancias está calculado para el precio actual del cobre. Se desprecian los descuentos por TC/RC de la venta del concentrado a las fundiciones debido a que solo se está determinando la diferencia entre las ganancias con y sin pretratamiento.

En la tabla no está considerado el costo de calentar el mineral para realizar el pretratamiento. Por lo tanto, el costo de precalentar el mineral para cada valor de Work Index debe ser inferior al de las ganancias determinadas en la Tabla 5. Por ejemplo, el costo de calentar 20986 toneladas diarias de mineral de CMET a 600°C debería ser inferior a 144,631 USD, lo que es equivalente a calentar 706.15 toneladas de mineral por hora con un costo de 6,026 USD por hora para que el pretratamiento comience a ser beneficioso en cuanto a términos económicos.

Cabe señalar que en este estudio no se determinaron los efectos del pretratamiento en la liberación del mineral, por lo que también podrían existir mejoras en la recuperación y ley de concentrado final, lo que conllevaría a mejoras en las ganancias.

Considerando los estudios acerca de CMET en los que se indican que cerca del 50% de la roca corresponde a Sílice, se realizó un cálculo estimativo de cuanta es la energía para elevar la temperatura del mineral de 25°C a 600°C según el calor específico del mineral.

A través de la herramienta HSC Chemistry se obtuvieron los datos de calor específico para el SiO₂ luego, por medio de la ecuación (3), se obtuvo el valor de la energía total que se le debe suministrar al mineral para poder elevar su temperatura desde 25°C a 600°C. Cabe señalar que este cálculo es considerando una eficiencia del 100% en el calentamiento, por lo tanto, el costo de calentar el mineral es aún mayor considerando que siempre existirán pérdidas de energía en forma de calor.

$$\int_{T_1}^{T_2} C_p dT = E \quad (3)$$

Luego, mediante el calor específico para el SiO₂:

$$C_{p_{SiO_2}} = 13.882 - 0,008 * 10^{-3}T - 3.408 * 10^5 T^{-3} + 6.745 * 10^{-6} T^2 \quad (298-847 \text{ K})$$

$$C_{p_{SiO_2}} = 14.071 + 2.407 * 10^{-3}T + 0.028 * 10^5 T^{-3} \quad (847 - 1079 \text{ K})$$

Finalmente, integrando estos valores en la ecuación (3), se obtuvo que la energía necesaria para calentar el mineral desde 25°C a 600°C es de 166.41 kWh/ton, valor en acuerdo con los 100 kWh/ton estimados por Tavares [10] para los minerales de su investigación.

Este corresponde a un valor es muy grande en comparación al ahorro en energía específica de moler el mineral de CMET a 600°C tras el pretratamiento, el que apenas existe un ahorro de 2.12 kWh/ton. Este último valor corresponde apenas a un 1.27% de la energía que se debería utilizar para calentar el mineral, además, considerando que no se consideran las pérdidas en el calentamiento, el pretratamiento queda totalmente fuera de rango.

Por otro lado, considerando el precio de la energía eléctrica para las compañías mineras (cliente libre) abastecidas por el SIC, se obtuvo que el costo de calentar el mineral por hora de manera convencional es de 12,926 USD/h, valor que excede los 6,026 USD/h de ganancias al aplicar el pretratamiento.

Visto de otra manera, el precio que debería costar la energía necesaria para calentar el mineral a 600°C para cubrir el 100% de las ganancias al emplear el pretratamiento, debería ser de aproximadamente US\$50/MWh, basándose en la capacidad calórica del mineral. Notar que es un costo teórico, considerando un 100% de eficiencia del equipo durante el calentamiento, y además, sin considerar gastos iniciales de implementación e instalación de equipos.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Existe un gran impacto de la temperatura sobre el mineral, reflejado principalmente en el Work index para ambos minerales, lo que es bastante beneficioso al momento de procesarlos, sin embargo, se desconoce el mecanismo predominante por el cual se producen este tipo de mejoras. También existen mejoras en la energía específica de molienda, esto hace que el método sea aún más interesante, si se toman en cuenta los problemas actuales de la minería, como lo son la constante disminución de leyes y aumento en la dureza de las rocas lo que conlleva a un aumento en la energía necesaria para procesar los minerales.

Económicamente el método no es factible, puesto que el costo de realizar el pretratamiento con energía eléctrica del mineral excede las ganancias debido al aumento del tonelaje de procesamiento y el ahorro de energía específica en molienda. Sin embargo, en este caso no se estudiaron las posibles ganancias por aumento de recuperación o aumento de ley en el concentrado, ni tampoco el ahorro energético al aumentar el P_{80} tras la molienda, debido a la conminución intergranular en la que se esperaba obtener la liberación del mineral de interés a un tamaño mayor al convencional. Estos puntos podrían ser claves a la hora de realizar un estudio económico más detallado para otorgar factibilidad al método.

5.2 Recomendaciones

Es necesario un estudio en el que impliquen condiciones aún más similares a las que ocurren en planta, por ejemplo, realizar ensayos con pulpa de mineral, tal como se procesa el mineral en la molienda.

Además, investigaciones en nuevos métodos de conminución se hacen necesarias con el fin de promover la fractura intergranular y además obtener una mejora en cuanto a eficiencia en la energía utilizada en la molienda podría hacer de este método económicamente factible. También, el uso de la energía solar, en conjunto con lo anterior mencionado; estudios en la etapa de concentración del mineral pretratado y aumento del F_{80} en la flotación, estudiar el desarrollo de métodos eficientes de calentamiento tales como lecho fluidizado podrían hacer de este método un tratamiento interesante.

El uso de la energía solar podría ser bastante interesante para investigaciones futuras, puesto que el costo del MWh para la generación fotovoltaica se encuentra en el orden de US\$21 a US\$23 MWh, valor bastante bajo en comparación a los US\$100 a US\$120 del costo de la energía eléctrica para la minería, el cual es el principal limitante de la no factibilidad del pretratamiento estudiado. Por lo tanto, se hacen necesarias investigaciones que involucren el calentamiento del mineral netamente utilizando energía solar, con el fin de observar si es posible lograr temperaturas del nivel en el cual se aprecian mejoras en la moliendabilidad y en cuanto tiempo es posible lograr dichos requerimientos.



Referencias

- [1] Comisión Chilena del cobre, Ministerio de Minería (2017). *Informe del consumo energético en Chile*. Recuperado de: <https://www.cochilco.cl>.
- [2] G. WONNACOTT AND B.A. WILLS (1990). Optimisation of Thermally assisted liberation of a tin ore with the aid of computer simulation. *Minerals Engineering*, 3(1/2), 187-198.
- [3] Veerendra Singh, Prashant Dixit, R Venugopal & K Bhanu Venkatesh (2018): Ore pretreatment methods for grinding: journey and prospects, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, DOI: 10.1080/08827508.2018.1479697.
- [4] YATES, A (1918). Effect of heating and quenching Cornish tin ores before crushing. *Trans inst. Min. Metall.* 28, 41-45.
- [5] Myers, W.M. (1925). Calcining as an aid to grinding. *Journal of the American Ceramic Society*. Vol.8, 830-842.
- [6] Holman, B.W. (1927). Heat treatment as an agent in rock-breaking. *Trans inst. Min. Metall.* Vol. 36, 219-262.
- [7] Rao, R.B., Veeresh, M.B., and Banerjee, G.N. (2002). Effect of thermal pretreatment on grindability and upgradation of bauxite for refractory applications. *Light metals: Proceedings of sessions, TMS Annual Meeting*, 205-208.
- [8] Mitchell, W., Jr., C.L. Solleberger and F. F. Miskell. (1952). Factors in the economics of heat treated taconites. *Mining Engineering N.Y.* Vol 4, 962-967.
- [9] Djingheuzian, L.E. (1954). The influence of temperature on efficiency of grinding. *Trans inst. Min. Metall.* Vol. 57, 157-168.
- [10] L.M Tavares and R.P King (1999). Evaluation of Thermally Assisted fracture of particles Using microscale fracture measurements.
- [11] Brown, J.H., A.M. Gaudin and C.M. Loeb, Jr. (1958). Intergranular comminution by heating. *Mining Engineering*. Vol. 10. 490-496.

- [12] B.A. WILLS and K. ATKINSON (1993). Some observations on the fracture and liberation of mineral assemblies. *Minerals Engineering*, 6 (7), 697-706.
- [13] Menendez, J.A. y Moreno, A.H. (2017). *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas*. Latacunga, Ecuador. Editorial Universidad técnica de Cotopaxi, Primera Edición, pp 315, 7, 157-163.
- [14] T.J. VEASEY and B.A. WILLS (1991). Review of methods of improving mineral liberation. *Minerals Engineering*, 4 (7-11), 747-752.
- [15] Scheduling, W.M., Sherring, A.J., Binns, D., Parker, R.H. & Wills, B.A. (1981). *The effect of thermal pretreatment on grinding characteristics*. Camborne School of Mines Journal.
- [16] Rojas, I. (2014). Reología y fábrica de la mineralización primaria, yacimiento El Teniente (Memoria de Título). Universidad de Chile, Santiago.
- [17] Austin, L.G., Concha, F. (1994). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y tecnología.
- [18] Segura, J. (2016). *Optimización de tamaños de transferencia en chancado y molienda Sewell mediante simulación de procesos*. Codelco división El Teniente (Memoria de Título). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- .

Anexos

Anexo A: Procedimiento para realizar test de bond.

BOND BALL MILL GRINDABILITY LABORATORY PROCEDURE

1. Prepare sample to -6 mesh by stage crushing and screening.
2. Determine Screen Analysis
3. Determine Bulk Density Lbs/Ft³
4. Calculate weight of material charge

$$\text{Material Charge (gms)} = \frac{\text{Bulk Density (Lbs/Ft}^3\text{)}}{62.4 \text{ Lbs/Ft}^3} \times 700 \text{ cc}$$

$$\text{Material Charge} = \frac{\text{Bulk Wt. (gm/lit.)}}{1000} \times 700 \text{ cc}$$
5. Calculate IPP (Ideal Potential Product) for 250% Circulating Load

$$\text{IPP (grams)} = \frac{\text{Wt. Material Charge (gms)}}{3.5}$$
6. Split feed sample to obtain 8 to 12 samples slightly smaller than IPP. Also split out sample for Material Charge.
7. Place Material Charge and Ball Charge in Mill Run x revolutions

x = number of revolutions based on estimate of work index; usually 50, 100, 150 or 200 revolutions
8. Dump Mill, separate balls and Material Charge. Screen all the material at Mesh of Grind - Weigh Product.
9. Product = weight of Material Charge - weight of Screen Oversize.

10. Net Product = Product - weight of undersize in Mill Feed
11. Net grams of product per revolution = $\frac{\text{Net Product}}{\text{No. of Rev.}}$
12. Add new feed to Screen Oversize (circulating load) to bring up to original weight of Material Charge using split samples.
13. Calculate No. of Revolutions for next period.

$$\text{No. Rev.} = \frac{\text{IPP (gms)} - \text{Wt. undersize in feed}}{\text{Net grams/rev. for previous period}}$$
14. Repeat steps 8-14 until net gms/rev. comes into equilibrium (May be steady or jumping, minimum of 5 periods)

$$\text{Circulating Load} = \frac{\text{Material Charge} - (\text{Last 2-3 periods})}{\frac{\text{Average Product}}{\text{Average Product (Last 2-3 periods)}}}$$

ALLIS-CHALMERS BALL MILL

GRINDABILITY TABLE II

$$W_i = \frac{44.5}{(P_1)^{0.23} \times (G_{bp})^{0.82} \times \left(\sqrt{\frac{10}{P}} - \sqrt{\frac{10}{F}} \right)}$$

Anexo C: Test de Bond

El método de Bond ha encontrado amplia aceptación en la industria minera-metalúrgica. El método tiene dos grandes ventajas desde el punto de vista de la ingeniería. En primer lugar, es muy simple, y en segundo lugar, la experiencia demuestra que es efectivo para muchas (aunque no para todas) circunstancias [17].

Este test se utiliza principalmente para el diseño de un molino de bolas, el objetivo es seleccionar el diámetro y el largo de un molino para producir Q toneladas por hora de un material con un porcentaje X menor que el tamaño p1. Sin embargo, como el objetivo de esta memoria consiste únicamente en analizar el efecto del precalentamiento sobre el mineral, solo se procederá para obtener el valor del índice de trabajo del mineral (Work Index). Este valor es una característica de cada mineral y depósito, dependiendo de su composición mineralógica, por lo cual sería de bastante utilidad obtener el valor de este parámetro antes y después del pretratamiento. Para obtener este valor, se procederán a realizar el ensayo mediante las siguientes etapas:

7 Ensayo normalizado de moliendabilidad

El material se prepara con un tamaño de 100% menor a 6 mallas (3.350 mm), lo que corresponde aproximadamente a 80% menos de 2 mm. Se miden 700 cm³ a granel de este material, lo que da un total de W gramos, cuidando que la densidad aparente sea reproducible, y se carga en un molino de bolas de 305x305 mm (12x12 pulgadas), con bordes interiores redondeados.

La carga de 285 bolas de acero de 20.125 kg tiene la distribución que sigue:

Tabla A: Distribución de bolas para el ensayo de Bond.

Cantidad de bolas	Tamaño (mm)
43	36.83
67	29.72
10	25.40
71	19.05
94	15.49

El material se muele por un corto período, generalmente 100 revoluciones, tamizando el producto por una malla p1 seleccionada para eliminar el bajo tamaño y reemplazarlo por material fresco, simulando un circuito cerrado de molienda-clasificación. Esta nueva carga se vuelve a moler tratando de obtener una carga circulante de 250%.

Suponiendo que la fracción de finos producida es proporcional al número de revoluciones del molino, el número de revoluciones para la nueva etapa de molienda r2 se calcula de las revoluciones de la etapa anterior r1 mediante:

$$r_2 = r_1 \frac{100/3.5}{\psi_1(p_1)} \quad (i)$$

Donde $\psi_1(p_1)$ es el porcentaje del material en el molino que tiene un tamaño menor que p1 después de r1 revoluciones. Una vez alcanzada la carga circulante de 250%, se define como moliendabilidad, y se designa por Gbp, a los gramos netos de material menor al tamaño p1, producidos por revolución del molino:

$$Gbp = (\psi_1(p_1) - \psi_F(p_1)) W / 100r^* \quad (ii)$$

Donde $\psi_F(p_1)$ y $\psi_1(p_1)$ son el porcentaje menor que la malla de separación p1 en la alimentación fresca al molino y en la descarga respectivamente, W es la masa total de mineral cargada al molino y r* es el número de revoluciones necesarias para obtener la carga circulante de 350%. Finalizado el ensayo, se efectúa un análisis granulométrico completo del producto (bajo tamaño p1) y de la alimentación fresca (menor a 6 mallas)

8 Cálculo del Work Index.

Mediante la siguiente ecuación empírica desarrollada por Bond, al comparar ensayos experimentales de la etapa i) con resultados a escala piloto, es posible obtener el valor del índice de trabajo del mineral:

$$Wi_t = \frac{(44.5)}{p_1^{0.23} Gbp^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{X_{QT}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{GT}}} \right)} \quad (iii)$$

donde W_i es el índice de trabajo del ensayo expresado en kWh/ton, p_1 es el tamaño en micrómetros de la malla de separación, G_{bp} es la moliendabilidad, P_{80} es el tamaño del 80% en el producto y F_{80} es el tamaño del 80% en la alimentación fresca (cercana a 2000 μm), todos determinados en el ensayo de Bond.

9 Cálculo del consumo de energía específica

Bond estableció que la energía específica necesaria para la conminución se podía relacionar entre los tamaños de alimentación X_G y de producto X_Q mediante la expresión:

$$E = Wi \left[\frac{10}{\sqrt{X_Q}} - \frac{10}{\sqrt{X_G}} \right] \quad (iv)$$

Donde E es la energía específica de molienda en kWh/ton, X_G y X_Q son los tamaños del 80% de la alimentación y del producto en el circuito en μm y WI es el índice de trabajo en kWh/ton

Anexo C: Descripción de equipos

i) Ro-Tap

Los Ro-Tap, se utilizan para el análisis de laboratorio de granulometría y manejan una serie de tamices con diferentes diámetros que se ensamblan en una columna (Figura A).

La columna de tamices se somete a vibración y movimientos rotatorios intensos por el tamizador.

Cuentan con un temporizador mediante el cual es posible regular el tiempo de tamizaje de las muestras a realizar el análisis granulométrico. Generalmente funcionan bien para muestras entre 500 a 1500 gramos en seco.

Para este caso, el Ro-Tap se utilizó en el inicio de cada test de bond con el fin de determinar el valor F_{80} de la alimentación y al finalizar el test con el fin de obtener el valor del P_{80} del producto, ambos valores obtenidos mediante un análisis granulométrico.



Figura A: Ro-Tap de laboratorio.

ii) Molino de Bond

El Molino de Bond EDEMET (Figura B), está diseñado para realizar el test de Índice de Trabajo, para determinación de consumo energético en la molienda de diversos minerales. Por ser esta una prueba estándar, el diseño del molino se ha conservado a similitud del equipo tradicional. Sin embargo, se han agregado una serie de elementos que permiten la operación eficiente, silenciosa, segura y reproducible del equipo de molienda. Un motorreductor reemplaza al tradicional juego de poleas-correa o piñon-cadena, logrando un funcionamiento más silencioso y suave. Esto también implica reducir el mantenimiento necesario.

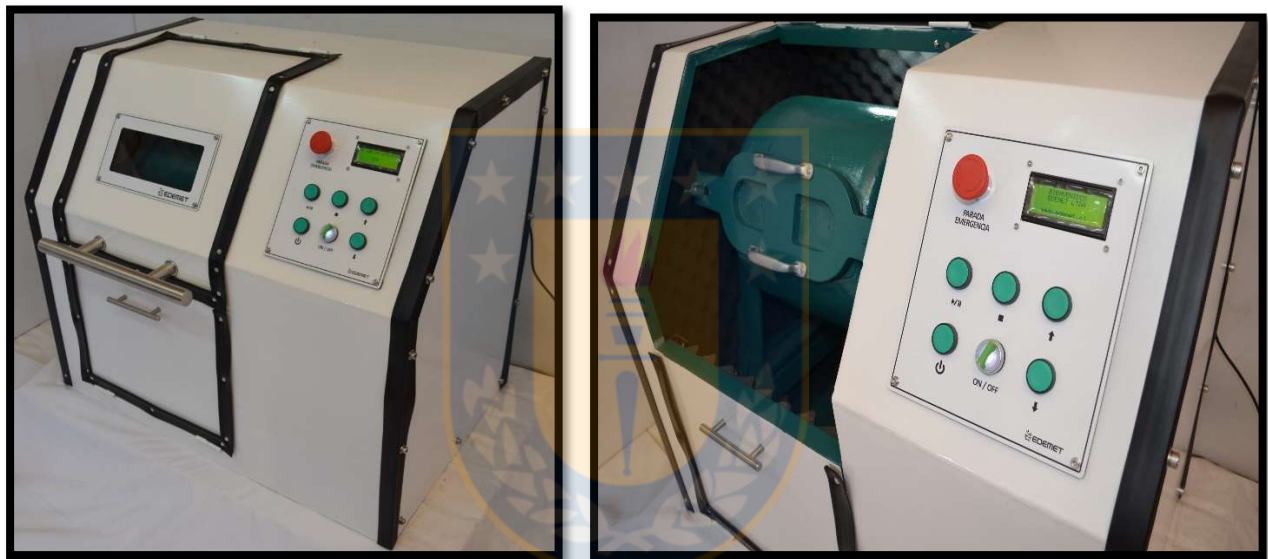


Figura B: Molino de Bond EDEMET.

Por ser este equipo usado habitualmente en laboratorios metalúrgicos, metalográficos o geológicos, de universidades e institutos, es de práctica común que sea operado por personas (estudiantes) que no están atentos a las normas de seguridad. Por este motivo se incluye un botón de parada de emergencia en caso de que alguien enrede el cabello o su ropa en el molino mientras este funciona.

iii) Técnicas de muestreo

Toda preparación mecánica del mineral a trabajar comienza con la toma de muestra de este, la cual tiene como objetivo tomar una parte representativa del total de material para realizar caracterizaciones físicas y químicas del mineral.

El muestreo se ha definido como la operación de extraer, una parte conveniente en tamaño, desde un total que es mucho más grande, en tal forma que las proporciones y distribución de las calidades a ser muestreadas (por ejemplo gravedad específica, contenido del metal de interés, distribución mineralógica, etc.) sean los mismos en ambas partes". Estas condiciones no son nunca completamente satisfechas cuando se trata de mezclas de minerales muy heterogéneos, y lo que se hace es establecer procedimientos (principios y técnicas), de modo de minimizar esas diferencias. Por lo tanto, Se denomina así a la obtención de una posible fracción pequeña, lo más representativa posible de un total de mineral que interesa analizar.

Aunque la preparación de muestras es un trabajo lento y tedioso, un cuidadoso muestreo y preparación de muestras asegura una uniformidad confiable, y los resultados de las pruebas son reproducibles en el proceso.

Cono y cuarteo

Es probablemente el más viejo de todos los métodos de muestreo probabilístico. También se le llama cuarteo cornisa, ya que se originó en las minas de estaño de Cornwall. Se ha empleado con lotes de hasta 50 toneladas, pero en la actualidad su uso se ha limitado a lotes de mesón de una tonelada con materiales a 50 mm. Los pasos típicos a seguir para llevar a cabo este procedimiento son tres, los cuales se resumen en la Figura C:

- El material se extiende en una placa lisa de fierro o una superficie de concreto fácil de limpiar. Se apila en forma cónica colocando cada palada exactamente en el ápex. Esta operación se repite 2 o 3 veces con el propósito de dar a las partículas una distribución homogénea respecto a un eje de revolución, esto es, homogeneidad giratoria o simetría respecto al eje vertical.
- El material se distribuye por medio de una pala para formar, primero, un cono truncado y, después, un pastel circular plano, respetando lo más posible la simetría lograda en el primer paso.

- El pastel circular se divide en 4 partes a lo largo de dos diagonales perpendiculares entre sí. Dos cuartos opuestos se separan como muestra y el par restante es el rechazo.

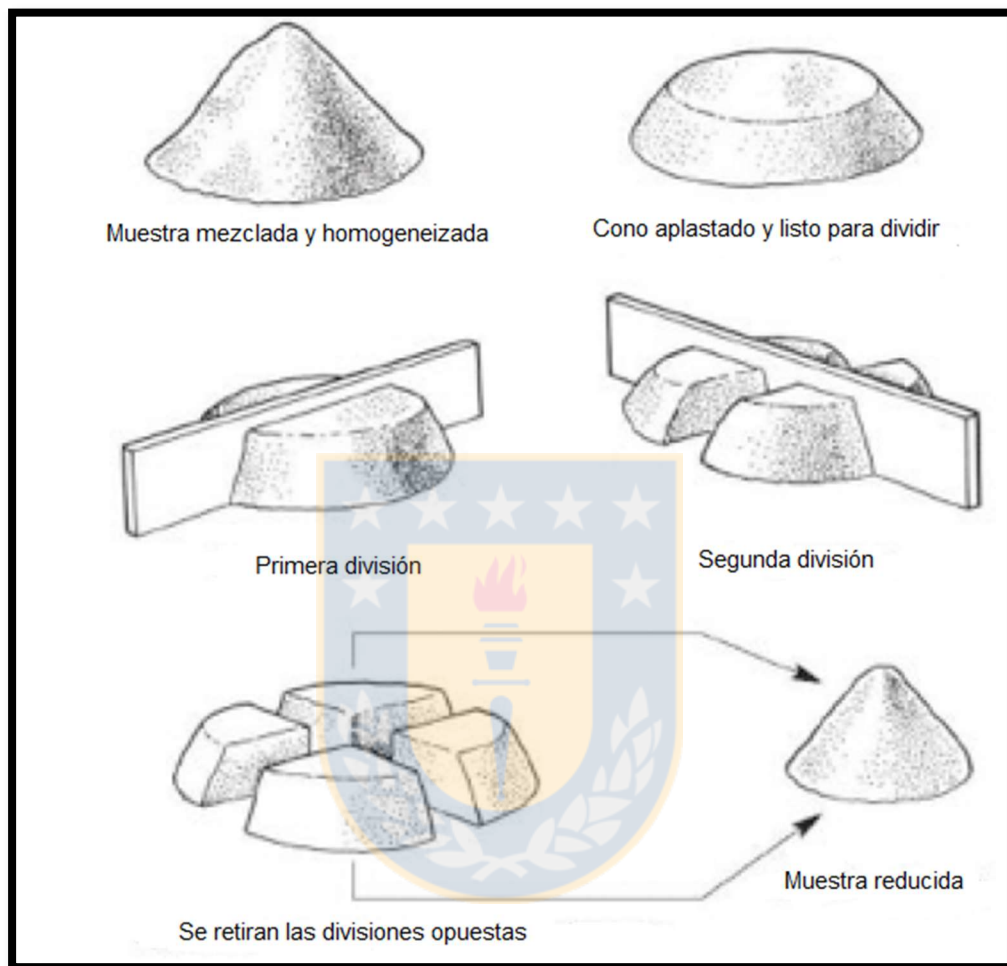


Figura C: Procedimiento de muestreo cono y cuarteo

Divisor rotatorio

Otra técnica de muestreo utilizada en esta memoria de título es el divisor giratorio, el cual fue utilizado para dividir las muestras de mayor tamaño (muestras de 7kg en 10 partes iguales). En este aparato el material es introducido como flujo por medio de un alimentador vibratorio desde una tolva de alimentación, para ser distribuido en una serie de cajas ubicadas radialmente como se muestra en la Figura D.

El mineral debe cumplir con una cierta granulometría, por lo general bajo 6#, las cajas receptoras de mineral están unidas por unas tolvas divisoras de flujo, en total son 20 cajas receptoras, la velocidad de vibración de la tolva alimentadora es variable, no así la velocidad de giro de la mesa.

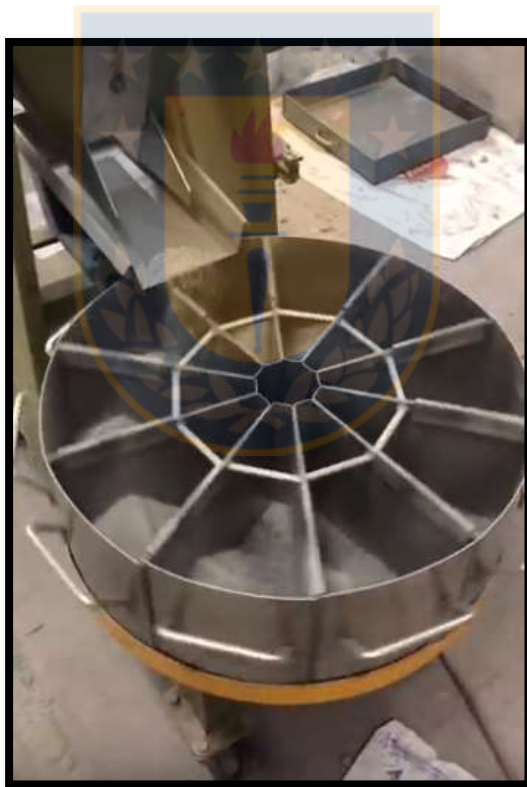


Figura D: Divisor rotatorio