

Influencia de la geología y geotecnia en parámetros de chancabilidad en yacimiento El Teniente

C. M. Gaete

Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Msc. L.A. Burgos

Unidad de geometalurgia y mineralogía, CODELCO, división El Teniente, Rancagua, Chile.

C. E. Portilla

Unidad de geometalurgia y mineralogía, Guíñez Ingeniería, División El Teniente, Rancagua, Chile.

ABSTRACT: Las etapas de chancado corresponden al primer eslabón dentro de la cadena de procesamiento para la extracción del mineral de mena en un depósito, el cual constituye alrededor de un 22% de los costos totales de una planta. Por lo anterior es de suma importancia la generación de estudios que agreguen valor al control del impacto de la competencia del mineral en el proceso, con el fin de generar y poblar un modelo geometalúrgico de bloques del yacimiento. El presente estudio tiene como objetivo determinar la influencia de la geología y geotecnia del material proveniente de la mina El Teniente sobre los parámetros de chancabilidad asociados al ensayo de Chancado LEIT (Cwi) e Índice de Chancado de SPI (CI). Para ello se utilizaron bases de datos de geología, geotecnia y geometalurgia realizando un estudio estadístico complementado con análisis petrográfico de las muestras. En base a los resultados obtenidos se determina una relación directa entre la chancabilidad de la roca y la abundancia de la asociación mineral mayor a un 23% wt de clorita-muscovita/sericita, filosilicatos que absorberían el impacto del chancador, aumentando su índice de chancado LEIT mayor que 18 kWh/t para los casos más extremos. Asimismo, se demuestra la asociación entre el resultado de índice de chancado de SPI y una mayor frecuencia de vetillas de relleno blando en el yacimiento. En base a lo anterior, se realizó una zonificación utilizando tanto los resultados obtenidos para Cwi, como para CI, generando tres clasificaciones de chancabilidad (Alta, Moderada y Baja), con el objetivo de consolidar las líneas base para la conformación de unidades geometalúrgicas en el yacimiento, asociados a la presencia de filosilicatos, y a la frecuencia de vetillas blandas en el macizo rocoso.

Keywords: Chancado, geometalurgia, geología, geotecnia, pórfido cuprífero.

1 INTRODUCCIÓN

El Teniente se caracteriza por ser la mina subterránea de cobre más grande del mundo (Leon, 2016), con una ley de cobre promedio de 0,8% asociada a la explotación de sulfuros de cobre, dispuestos en un abundante enrejado de vetillas o stockwork (Maksaev et al., 2004; Cannell, 2004; Cannell et al., 2005). La gran envergadura de esta operación se traduce en la producción de aproximadamente 465.000 toneladas métricas de cobre fino (CODELCO, 2019). No obstante, la gran producción está condicionada a altos costos operacionales reflejados en el alto requerimiento energético.

Dentro de la línea de procesos metalúrgicos, usualmente la conminución posee uno de los

mayores costos operacionales, llegando a abarcar hasta un 22% (Korman et al., 2014; Torres, 2017).

En El Teniente se ha buscado amortiguar el excesivo uso de los recursos energéticos en los procesos de conminución a través de la optimización de estos. Para ello, es necesario entender cómo se comportan las distintas rocas del yacimiento frente al proceso de chancado.

Parte importante dentro del proceso de disminución de tamaño de las partículas corresponde al chancado, donde las plantas de procesamiento en El Teniente manejan grandes volúmenes de material que provienen de distintos sectores de la mina. Por lo anterior es necesario tener en cuenta los procesos que ocurren dentro del chancador al interactuar con los distintos tipos de roca en el yacimiento y determinar los

controles geológicos que estén impactando en el desempeño de los equipos. El estudio realizado marca la línea base para la generación de un modelo predictivo de unidades geometalúrgicas de chancado.

Dentro de los estudios realizados se han obtenido resultados que relacionan de manera proporcional la dificultad de triturar la roca con la resistencia a la tracción (Bearman et al., 1997). También, se ha determinado que este parámetro se asocia a la dureza relativa de la roca (Köken & Özarslan, 2018), es decir, a una dureza ponderada con respecto a las distintas abundancias de minerales, donde existe una tendencia a aumentar la dificultad para triturar la roca a medida que aumenta la dureza relativa.

En general, se utilizaron distintos métodos para determinar la dificultad de chancado de la roca en los estudios anteriores, como el “Compressive Crushing Value” (Köken & Özarslan, 2018) o el JKDWT (Narayan & Whiten, 1988) que corresponden a ensayos que miden la energía necesaria para triturar la roca a un tamaño usualmente menor a ½ pulgada. En específico, en El Teniente se utilizan parámetros de conminución asociados al chancado llamados “Low Energy Impact Crushing Work Index” (Cwi) e “Crushing Index” (Ci). Estos corresponden a ensayos de laboratorios que simulan el proceso de chancado y sus mecanismos de fractura, donde Cwi entregaría la energía necesaria, en cambio, Ci sería un índice relativo adimensional.

En relación con estos parámetros, el artículo busca determinar la influencia de la geología y geotecnia de las rocas del yacimiento El Teniente sobre los parámetros Cwi y CI, con un alcance principalmente teórico, con el objetivo de poblar el modelo geometalúrgico actual. Para ello se compararán datos geotécnicos y mineralógicos con respecto a los geometalúrgicos, además de una descripción petrográfica de las muestras.

2 CONMINUCIÓN Y MECANISMOS DE FRACTURA

Naturalmente, las menas de cobre están asociadas a otros minerales que presentan un bajo o nulo potencial económico en su extracción. El proceso que corresponde a la separación y disminución de tamaño del material es la conminución.

Los factores que influirán en este proceso, se basan en los tres principios de conminución que fueron propuestos por Kick en 1865 y Von Rittinger en 1867, para luego ser modificados y

puestos en práctica por Bond en 1951. Estos corresponden a:

1. Todas las partículas poseen un nivel de energía base que debe ser considerado en el cálculo de la energía total necesaria para fragmentar.
2. El trabajo necesario para fragmentar es proporcional la longitud de las nuevas fracturas producidas.
3. La facilidad para fragmentar un material está relacionada a los planos de debilidad propios del material.

Estos principios son aplicables para las dos etapas que componen la conminución, siendo estas el chancado y la molienda. El presente estudio se enfocará en el primer proceso, el cual consiste en procesar la roca disminuyendo su tamaño desde rocas de un metro a partículas menores de media pulgada.

El yacimiento El Teniente posee una alta heterogeneidad en la composición tanto de las rocas como en sus estructuras. Por lo cual la complejidad de los procesos que ocurren al interactuar la roca con las paredes del chancador es muy alta. Existen distintos mecanismos (Figura 1) que ocurren en los procesos de conminución entre los cuales se encuentran la abrasión, la compresión y el impacto (Torres, 2017).

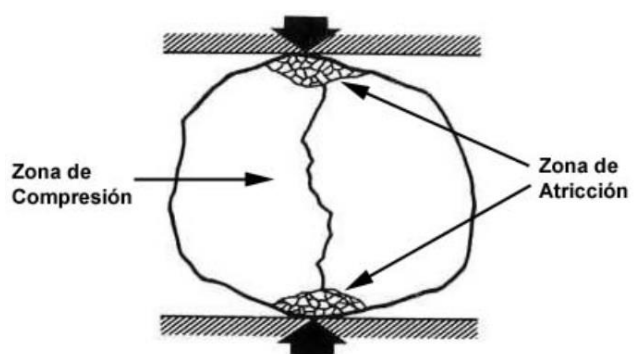


Figura 1 Mecanismo de fractura por atricción, compresión e impacto asociado al chancado. (Extraído de Tapia, 2010).

Para parametrizar este proceso Bond en 1951 obtuvo de forma empírica una ecuación para medir la potencia requerida para que los equipos pudieran fragmentar una roca determinada. De esta forma la potencia (P_{Motor}) se expresa en la ecuación 1:

$$P_{Motor} = \frac{10}{\eta} * G_s * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} \right), \quad (1)$$

Donde η es la eficiencia del motor, G_s la gravedad específica, W_i (kWh/t) el índice de Bond, F_{80} (micrones) es el tamaño bajo el cual se encuentra el 80% de la alimentación y P_{80} (micrones) es el tamaño bajo el cual se encuentra el 80% del producto.

De estos factores, el más relevante corresponde al índice de Bond (W_i), parámetro que depende netamente del tipo, composición y textura de la roca (Bond, 1951; Torres, 2017). En el caso del chancado se utiliza el ensayo de Chancado LEIT o C_{wi} para determinar la energía necesaria para fragmentar los distintos tipos de rocas presentes en el yacimiento.

3 GEOLOGÍA LOCAL DEL YACIMIENTO EL TENIENTE

El Teniente corresponde a un yacimiento hipógeno de cobre y molibdeno, cuya formación está asociada a sucesivos eventos de intrusión, deformación, mineralización y alteración que ocurrieron hace 5.3 millones de años. No obstante, su mineralización de cobre característica, asociado a un denso stockwork data de 1.2 millones de años (Canell et al., 2005).

3.1 Rocas presentes en el yacimiento

El Complejo Máfico El Teniente (CMET) de edad Mioceno Superior (Munizaga et al., 2002), que corresponde a un complejo subvolcánico compuesto por diabasas, gabros y pórfidos basálticos (Burgos, 2002), posee una extensión vertical de más de 2 km. y corresponde a la unidad litológica más abundante en el yacimiento. En este se alberga el 80% de la mineralización de cobre-molibdeno asociado al stockwork.

Las unidades del complejo félsico que se compone de Tonalita (TO), Pórfido Diorítico (PDI) y Pórfido Dacítico (PDA), intruyen al CMET. La TO se asocia a una edad en un rango de 5.47 ± 0.12 Ma.- 5.63 ± 0.12 Ma. El PDI, entre 6.11 ± 0.13 Ma.- 6.28 ± 0.6 Ma. Finalmente, el PDA que posee una edad de 5.28 ± 0.10 Ma. (Maksaev et al., 2004).

El complejo de Brecha Braden (CBB) considerada una diatrema magmática-hidrotermal con una edad de 4.8 M.a. (Ojeda et

al., 1980; Cuadra, 1986) intruye a las demás unidades emplazadas.

3.2 Etapas de alteración

La mineralización se produce a partir de la sobreimposición de tres eventos principales de alteración, relacionados al emplazamiento de los distintos componentes del complejo félsico y de la Brecha Braden (Howell & Molloy, 1960).

La etapa Tardimagmática (TM) cronológicamente ocurre como el primer evento y se define como una alteración potásica pervasiva en el CMET con un enrejado intenso de vetillas de cuarzo, anhidrita, bornita, calcopirita, pirita y molibdenita, sin halo de alteración (Zúñiga, 1982). Esta etapa está asociada al emplazamiento del pórfido Dacítico (Arévalo & Floody, 1995; Arévalo et al., 2003).

Posterior a esto se sobreimpone sobre la alteración TM la alteración Hidrotermal Principal (HP), asociada a la reacción de los fluidos magmáticos con aguas meteóricas. Esta corresponde a una alteración de tipo fílica, con mineralogía característica de cuarzo-sericita en el CMET y en menor proporción anhidrita y clorita. Además, con ella está asociada una mineralización de sulfuros como calcopirita, pirita y molibdenita.

La etapa siguiente a esta corresponde a la Hidrotermal Tardía (HT), asociada al emplazamiento de la brecha hidrotermal de turmalina alrededor a la Brecha Braden (Villalobos, 1975). La mineralogía de alteración está conformada por calcopirita-bornita-pirita-molibdenita-tenantita/tetahedrita, que se desarrolla a través de halos de vetas y vetillas.

4 METODOLOGÍA E INFORMACIÓN UTILIZADA

La primera etapa consiste en la recopilación y depuración de datos extraídos de la base de datos de geometalurgia (2018-2019). Se dispone de 195 muestras con ensayos de chancado, los que provienen de testigos de sondajes de tamaño Nq y Pq, con un soporte de muestreo de 12 metros lineales.

También se utiliza el modelo fragmentación de la mina con el objetivo de correlacionar el chancado con la caracterización geotécnica de la roca.

Seguido a lo anterior, se realizaron descripciones petrográficas para determinar abundancia y ocurrencia de los minerales de alteración y

correlacionarlos con los resultados obtenidos para este parámetro.

4.1 Ensayos geometalúrgicos de chancado

Se utiliza el ensayo “Low Energy Impact Crushing Work Index”, del cual se obtiene la energía necesaria por una masa determinada de material para fragmentar la roca, a través de un índice expresado en kWh/tc, el cual consiste en una muestra entre 2-3 pulgadas que es impactada por dos péndulos. El objetivo es realizar la medición del esfuerzo necesario al momento de fragmentar la roca. Se utiliza para calcular directamente la potencia del chancado, propuesta por Bond en 1951.

El “Crushing Index” (CI), se asocia a un índice de chancado que se obtiene de la preparación de la muestra para el ensayo “SAG Power Index”. Si bien, corresponde a un valor adimensional, esta entrega una referencia a la “dureza” de la roca frente al proceso de conminución.

4.2 Mineralogía QEMSCAN®

Los datos mineralógicos corresponden a valores obtenidos a través de la metodología de mineralogía automatizada (QEMSCAN®), que consiste en la cuantificación de la mineralogía de mena y ganga a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) y detectores espectroscópicos EDX.

4.3 Modelo Geotécnico del yacimiento El Teniente

El modelo geotécnico o de fragmentación de la mina El Teniente (González, 2018) define la calidad geotécnica del macizo rocoso, el cual se basa en zonas asociadas a la frecuencia de vetillas blandas, las cuales corresponden a planos de debilidad que poseen un relleno mayor a un 60% de minerales con una escala de Mohs menor a 4,5. Esto implica la presencia de minerales tales como anhidrita/yeso, muscovita/sericita, clorita, calcopirita o piritita.

En base a lo anterior, se determinan 5 zonas geotécnicas, denominadas de manera correlativa donde la primera corresponde a la de mejor calidad geotécnica y una fragmentación muy gruesa, pasando a zonas de menor calidad geotécnica y una fragmentación fina.

5 INFLUENCIA DE LA ALTERACIÓN HP EN ENSAYO DE CHANCADO LEIT

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al ensayo de chancado LEIT (Cwi), parámetro obtuvo una mejor relación con respecto a la presencia de mineralogía de alteración en la roca. Con esta información se realizaron modelos categóricos para cumplir con el objetivo de clasificar los distintos sectores de la mina en base a índice de chancado Bond necesario para fragmentar la roca.

5.1 Alteración HP asociada a Cwi

Un resultado relevante obtenido en el estudio corresponde a la asociación encontrada al relacionar el parámetro Cwi con respecto a la alteración HP de las muestras. Se observa un aumento en el índice de chancado LEIT (Cwi) a mayor presencia relativa de alteración HP (Figuras 2 y 3), en la zona oeste y norte de la mina.

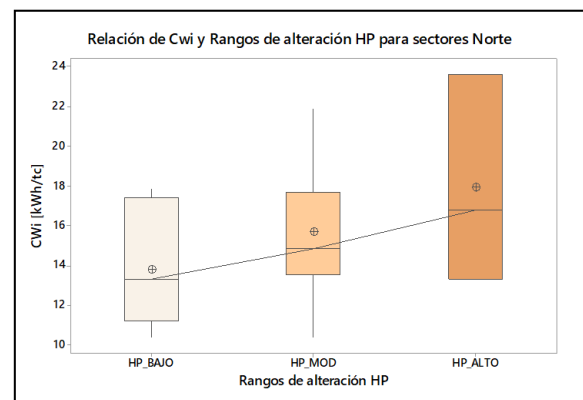


Figura 2 Gráficos BoxPlot de la relación existente entre alteración Hp y el índice de Chancado LEIT (Cwi) para sector oeste.

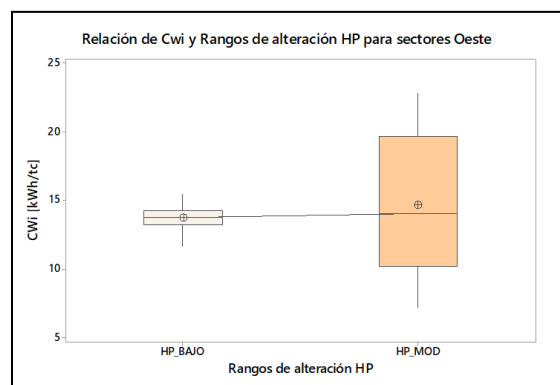


Figura 3 Gráficos BoxPlot de la relación existente entre alteración HP y el índice de Chancado LEIT (Cwi) para sector norte.

desprende fácilmente al contacto de la roca con otra superficie (Figura 8).

Los resultados obtenidos para ambos estudios indican que la abundancia de la asociación mineral clorita-muscovita/sericita sería un indicador de la dificultad para triturar este tipo de rocas. Lo anterior se fundamenta en que la clorita, muscovita/sericita corresponden a filosilicatos, los cuales poseen una estructura cristalina en “hojas” propia de este grupo de silicatos.

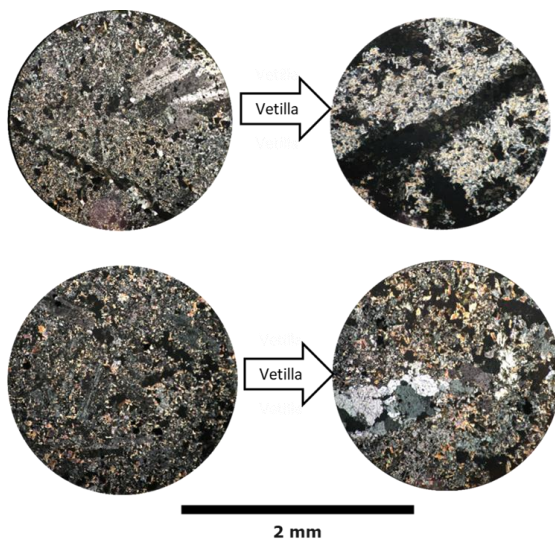


Figura 7 Cortes transparentes de CMET asociados a rangos de Cwi 14-18 kWh/t. A la derecha se observan las vetillas relacionadas al corte.

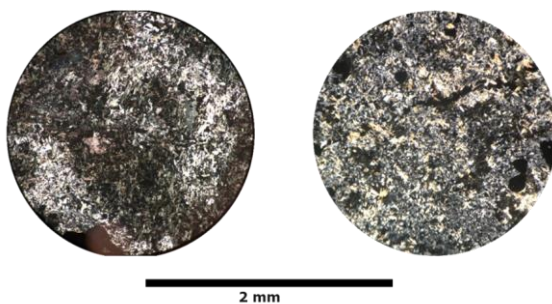


Figura 8 Fotografías de cortes transparentes de CMET con Cwi mayor a 18 kWh/t.

Esta estructura se compone de cadenas de Si_2O_4 formando cada capa, entre las cuales se intercalan aniones de OH^- y distintos cationes. A modo de ejemplo se muestra la estructura de muscovita (mica blanca) en la Figura 9. Esta disposición espacial de cationes y aniones generan a nivel macroscópico texturas de mica que poseen una resistencia anisótropa a los esfuerzos, es decir la resistencia será mayor a

esfuerzos perpendiculares a las capas de los tetraedros de sílice que paralelos a estos.

Para fundamentar este comportamiento dentro del chancador se podría hacer alusión a lo que expone Urizar (2018) acerca del efecto que tienen los filosilicatos sobre el proceso de molienda de bolas, donde explica que la alta presencia de estos minerales provocaría una absorción de los impactos generados por el molino. Esto ocurriría debido a que este tipo de material muy fino, al desprenderse de la roca, se aglomerara en las paredes, bolas y en la misma roca, generando una masa de comportamiento plástico que amortiguaría los impactos del molino. Este efecto se podría producir dentro del chancador a consecuencia de disminución del mecanismo de fractura de impacto, donde la mayor presencia de esta asociación mineral en forma de alteración recubriría la roca y generaría una cierta cantidad de material fino, provocando que el impacto de la pared contra la roca sea menor por la absorción de este por parte de los minerales de clorita-muscovita/sericita, necesitando más energía para triturar la roca (Urizar, 2018). Esto se vería reflejado en el ensayo de chancado LEIT donde muestras que posean una mayor alteración se encuentren con un mayor revestimiento de estos minerales y podrían generar este efecto al impactar con los martillos.

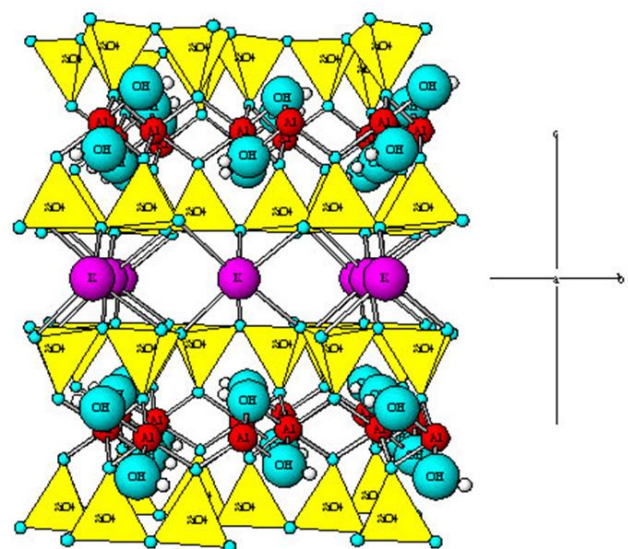


Figura 9 Representación de la estructura cristalina de la muscovita, donde se observan las capas de sílice y los iones intermedios. (Extraído de Marcos, 2010)

Otro efecto asociado a la presencia de minerales de alteración sería lo observado

atascamiento del chancador, tal como ocurrió en un evento en el año 2018. Este atasco de la máquina fue generado por una pieza suelta que bloqueó la cámara de salida del material (Figura 10). El material fino alrededor de la roca desprendido, al no poder evacuar se aglomeró, generando una capa muy plástica alrededor de la roca, haciendo que fuera imposible triturar el material y además disminuyó la permeabilidad del chancador, dejando material muy grueso en sectores más altos de la cámara, sin llegar a hacer contacto con las paredes.

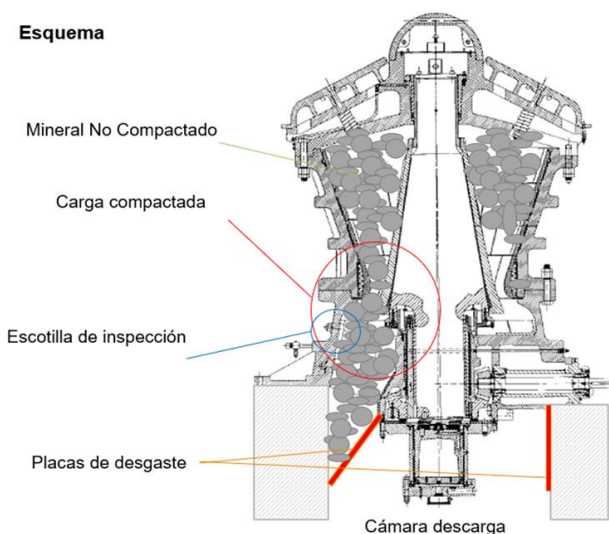


Figura 10 Chancador giratorio presente en plantas de chancado de mina El Teniente con problema de atollamiento.

Estas evidencias entregarían que el efecto que tendría la mineralogía de alteración sobre el parámetro de chancado LEIT en El Teniente estaría asociado a la presencia de una pervasiva de alteración clorita-muscovita/sericita que recubriría la roca.

5.2 Zonificación de Cwi en base a la asociación clorita-muscovita/sericita

Para poder estimar de forma preliminar el parámetro de chancado LEIT, se determinan ecuaciones para el sector oeste (2) y norte (3), donde los coeficientes de determinación para sus regresiones lineales corresponderían a 0,53 y 0,3 respectivamente. Debido a esto, al aplicar ambas curvas a los rangos de la clasificación de Young (2019) se observa que estos funcionan de mejor manera principalmente para el grupo de rocas muy duras, ya que sus rangos serían similares para ambos sectores (Tabla 1).

$$\text{Log}_2(\text{Cwi}) = 2.464 + 0.371 * \text{Log}_2(\% \text{wt}) \quad (2)$$

$$\text{Log}_2(\text{Cwi}) = 3.464 + 0.1567 * \text{Log}_2(\% \text{wt}) \quad (3)$$

Donde Cwi corresponde a la estimación del parámetro de Chancado LEIT en kWh/t y % wt es la abundancia de la asociación clorita-muscovita/sericita.

Tabla 1 Clasificación de Cwi en base a la asociación mineral Mv/Ser.

Clasificación	Rangos Cwi [kWh/tc]	Rangos Cl-Mv/Ser [%Wt] sectores Oeste	Rangos Cl-Mv/Ser [%Wt] sectores Norte
Blanda	0-8	0-2.7	0-0.13
Moderadamente dura	8-10	2.7-12.2	0.13-4.6
Dura	14-18	12.2-24.15	4.6-22.7
Muy Dura	> 18	> 24.15	> 22.7

Esto indicaría que existirían a grandes rasgos dos grupos relevantes. Uno estaría asociado a una roca muy dura con rangos mayores a 18 kWh/t, que generaría problemas críticos en el proceso de chancado. Además, debido a los resultados obtenidos en la petrografía, este rango más alto estarían asociados a rocas que presentarían una alteración Cl-Mv/Ser diseminado de forma masiva en la masa fundamental de la roca con una abundancia mayor a un 23%wt aproximadamente.

Por otro lado, el rango más bajo estaría asociado a rocas donde la asociación mineral estaría ligada a vetillas principalmente, que poseerían cantidades menores o iguales a un 23%wt de Cl-Mv/Ser. Dentro de esta clasificación se encuentran rocas con rangos de Cwi Moderadamente duro y duros. El primer rango correspondería a rocas con 6-10% en petrografía, con su alteración Cl-Mv/Ser en vetillas sin halos de alteración. Luego, se tendrían valores duros de Cwi ligados a rocas con entre un 10-15% en petrografía, con la asociación mineral en vetillas y halos de alteración gruesos.

6 INFLUENCIA DE LA CALIDAD GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO SOBRE EL ÍNDICE DE CHANCADO DE SAG POWER INDEX (CI)

A diferencia del parámetro de Chancado LEIT, el Índice de Chancado obtenido del ensayo SPI (CI) obtuvo resultados asociados a la calidad geotécnica del macizo rocoso. Hay que tener en consideración que este ensayo no entrega un dato

relacionado con el índice de chancado de Bond, ya que entrega valores adimensionales.

6.1 Frecuencia de vetillas blandas asociados a Índice de Chancado de SPI

Como se mencionó anteriormente el factor más relevante que indica la calidad geotécnica y el nivel de fragmentación de la roca en la mina El Teniente corresponde a la frecuencia de vetillas blandas. Estas se definen como vetillas que poseen un 60% del relleno asociado a minerales con durezas, respecto a la escala de Mohs, menores a 4.5, las cuales son muy comunes en el yacimiento debido a la presencia de un intenso stockwork.

La calidad geotécnica del macizo rocoso está categorizada en zonas (Tabla 2), que poseen rangos de frecuencia de vetillas blancas o tamaño de fragmentación de la roca asociado con el método de explotación de la mina.

Tabla 2 Clasificación de zonas geotécnicas en base a la frecuencia de vetillas blandas (ffVb) y al espaciamiento medio.

Parámetro	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
ffVb [1/m]	0.15	0.36	0.67	1.02	3.07
Espaciamiento medio [m]	6.67	2.77	1.49	0.98	0.33

Los resultados obtenidos a partir de esta comparación fueron encontrados tanto para la zona oeste, como para la norte y este, donde el aumento de la frecuencia de vetillas blandas (ffVb) indicaría una disminución en el índice de chancado de SPI (Figura 11). No obstante, debido a la forma en la que se realizó el estudio de los datos, esta relación no sería continua, sino más bien discretizada en rangos entre los cuales fluctúan los valores de CI. Estos rangos indicarían que para muestras asociadas a las zonas 2 y 3, los índices de chancado de SPI esperables serían mayores o iguales a 12, en cambio para muestras relacionadas a las zonas 4 y 5 lo esperable serían valores menores a 12.

Además, con respecto a lo expuesto en el modelo geotécnico de El Teniente, este aumento en la frecuencia de vetillas blandas también estaría relacionado a la disminución a la resistencia a la tracción indirecta del macizo rocoso (González, 2018), indicando una posible asociación con el mecanismo de fractura existente dentro del chancador.

Estos resultados poseen cierta representatividad acerca del comportamiento del parámetro CI frente a la frecuencia de vetillas blandas en el yacimiento, ya que estos están ligados a una disminución de los valores obtenidos de resistencia a la tracción indirecta asociados a vetillas con relleno mayoritariamente blando. También existen estudios externos que asocian el comportamiento mecánico de la roca a la capacidad de triturarla, donde a medida que estos disminuyen existe una menor dificultad para chancar la roca (Bearman et al., 1997; Young, 2019).

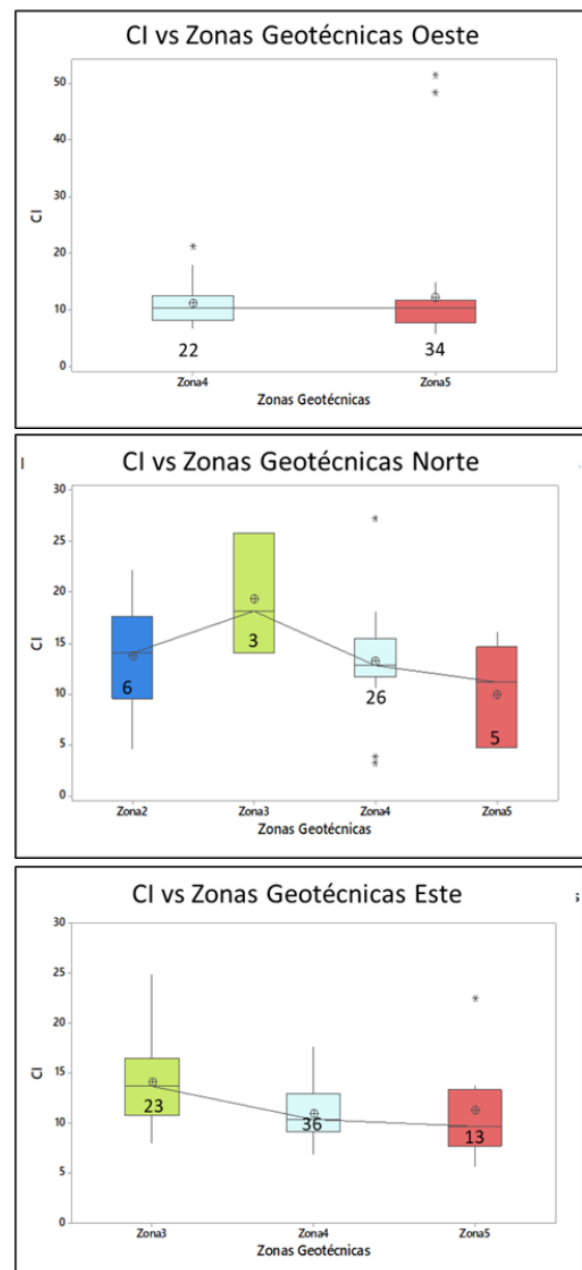


Figura 11 Gráficos de BoxPlot que relaciona zonas geotécnicas con el índice de chancado de SPI (CI), con su respectiva cantidad de datos, para sectores Oeste, Norte y Este. (*) Dato Outlier.

6.2 Zonificación de CI en base a Zonas Geotécnicas

Lo discutido anteriormente da pie a la oportunidad de utilizar la clasificación geotécnica del macizo rocoso en post de predecir el comportamiento del material en el CI. Por lo anterior al cruzar los resultados de CI versus la frecuencia de vetillas se obtienen dos categorías de clasificación, definidas como moderadamente dura la que corresponde a un rango menor a 12 de CI, con frecuencia de vetillas blandas de 1,02 a 3,07 por metro y una categoría de Dura aquella zona con CI mayor a 12 con frecuencia menor de 0,36 a 0,67 vetillas blandas por metro (Tabla 3).

Tabla 3 Clasificación de CI en base a la ffVb presentes en el yacimiento.

Clasificación	CI Esperado	Rango ffVb [1/m]	Espaciamiento medio [m]
Moderadamente Dura	menor a 12	1.02-3.07	0.33-0.98
Dura	mayor o igual a 12	0.36-0.67	1.49-2.77

6.3 Zonificación de chancado en base a Cwi y CI

Para integrar los distintos factores que influyen en el proceso del chancado, se procede a realizar clasificaciones en base a los resultados obtenidos para Cwi y CI.

El resultado final de esta zonificación del macizo rocoso arrojó tres grupos de clasificación, donde las rocas asociadas a una alta chancabilidad podrían poseer una abundancia de la asociación Cl-Mv/Ser ligada a vetilla entre los rangos de 6-10% aproximadamente en petrografía, presentando una frecuencia de vetillas dentro del macizo rocoso entre 1,02 y 3,07 m⁻¹. Luego, el material asociado a la categoría moderada correspondería a rocas que poseen concentraciones de Cl-Mv/Ser en vetillas gruesas con halos de alteración entre 10-15% aproximadamente en petrografía, con una frecuencia de vetillas de 0,35-1,02 m⁻¹. Finalmente, la categoría más crítica se vería asociada a la presencia de concentraciones mayores a 23% wt en mineralogía QEMSCAN o mayores a un 15% en petrografía de Cl- Mv/Ser de forma diseminada en la roca principalmente.

Tabla 4 Caracterización del macizo rocoso de El Teniente en base a la integración de categorías de Cwi y CI.

Chancabilidad	Zona Cwi	Zona CI	Índice de Bond [kWh/t]
Alta	Mod. Dura-Dura	Mod. Dura	8 a 14
Moderada		Dura	14 a 18
Baja	Muy Duro	Mod. Dura o Dura	mayor a 18

7 CONCLUSIONES

La gran variabilidad de las rocas y estructuras del yacimiento El Teniente presenta influencia en el comportamiento mecánico de las rocas frente al proceso de chancado, el cual se ve reflejado en los ensayos geometalúrgicos Cwi y Ci. Para el parámetro de chancado LEIT (Cwi) se pudo observar la existencia de una relación con la presencia de la asociación mineral de alteración clorita-muscovita/sericita. Su presencia pervasiva y de revestimiento en la roca generaría un efecto de absorción de los impactos producidos por los martillos en el ensayo, el cual también simularía lo que está ocurriendo dentro del chancador. Por otro lado, el Crushing Index (Ci) presenta relación con la fragmentación del macizo rocoso, que se define principalmente por su frecuencia de vetillas blandas, donde a medida que existe una mayor frecuencia de estas, existiría una menor dificultad para triturar la roca. Esto asociado a que estas corresponden a planos de debilidad del material.

Para relacionar los distintos factores que contribuyen al comportamiento de la roca dentro del chancador se utilizaron ambos resultados para caracterizar el material presente en el yacimiento. La combinación de las correlaciones y resultados obtenidos entregarían una categorización de zonas de alta chancabilidad, donde la mineralización ocurriría en vetillas sin halos de alteración, con una abundancia en petrografía entre 6-10% y una ffVb entre 1,02-3,07 m⁻¹. Luego procedería con una chancabilidad moderada que se asocia a una mineralización de Cl-Mv/Ser en vetillas con halos de alteración con una abundancia en petrografía entre 10-15% y una ffVb entre 1,02-3,07 m⁻¹. Finalmente, la zona más compleja se generaría en rocas con una abundancia de la asociación mineral mayor a un 23%wt o 15% petrográficamente, que se encontraría diseminada en la roca con una ffVb 0,35-1,02 m⁻¹

Los antecedentes presentados en este estudio pueden ser considerados como la línea base para la caracterización de las rocas en el yacimiento frente al proceso de chancado. El primer principio, que trata acerca del nivel de energía base para triturar la roca, se puede asociar con lo obtenido para el parámetro Cwi, el cual estaría asociado a la abundancia y ocurrencia de los minerales de ganga clorita-muscovita/sericita. Por otra parte, se determina que la zonificación geotécnica guarda relación con el parámetro CI, indicando que a mayor frecuencia de vetillas blandas menor es la energía necesaria para su fragmentación. Las diferencias entre los resultados para ensayos, que representan el mismo proceso, podrían estar asociados a las distintas metodologías empleadas, como por ejemplo al tamaño de las muestras y las herramientas utilizadas.

De esta forma se propone la generación de Unidades Geometalúrgicas a partir de la abundancia de filosilicatos que afectarían negativamente en el proceso de chancado, complementado con la zonificación geotécnica basada en el levantamiento de vetillas blandas en el yacimiento.

8 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CODELCO, División El Teniente por el financiamiento de la investigación y disponibilidad de información, para el desarrollo de este trabajo y a la Msc. Sofía Rebolledo, docente de la Universidad de Chile por sus aportes técnicos.

REFERENCIAS

- Arévalo, A., Benado, D., Brzovic, A., Burgos, L., Celhay, F., Floody, R., Letelier, M., Marambio, F., Morales, A., Nazal, C., Pereira, J., Quezada, O., Rodrigo, J., Russo, A., Seguel, J., Urrutia, E., Zapata, J., 2003. *Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas*. Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, Superintendencia de Geología, CODELCO, Chile. Referencia Interna: SGL-I-123/03.
- Arévalo, A., y Floody, R., 1995. *Modelo global de alteración-mineralización. Estudio geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo*. Superintendencia Geología de El Teniente, CODELCO-CHILE.
- Bearman, R.A., Briggs, C.A., Kojovic, T., 1997. *The application of rock mechanics parameters to the prediction of comminution behavior*. Mineral Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 255-264
- Bond, F.C. 1951, *The Third Theory of Comminution*. Meeting of AIME in Mexico City, October 1951 in Mining Engineering, May 1952, pp 484-494.
- Brzovic, A. and Villaescusa, E. (2007) *Rock mass characterization and assessment of block-forming geological discontinuities during caving of primary copper ore at the El Teniente mine, Chile*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech., Abstr., 44(4), pp. 565-583.
- Burgos, L. 2002. *Petrografía y geoquímica de la diabasa y diques basálticos que constituyen las "andesitas de la mina" en el Yacimiento El Teniente, VI Región, Chile*. Memoria de Título, Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, 108 p.
- Cannell, J., 2005. *Geology, Mineralization, Alteration, and Structural Evolution of the El Teniente Porphyry Cu-Mo Deposit*. Economic Geology. Vol. 100, p. 979-1003
- Cannell, J. 2004. *El Teniente Porphyry Copper-Molybdenum Deposit, Central Chile*. Ph.D. Thesis, University of Tasmania, 317 pp., Tasmania.
- Cannell, J.C., Cooke, D.R., Hollings, P., and Stein, H., 2005. *Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit*. ECONOMIC GEOLOGY, vol. 100, p. 979-1003.
- Cuadra, P. 1986. *Geocronología K-Ar del Yacimiento El Teniente y áreas adyacentes*. Revista Geológica de Chile, no. 27, p. 3-26.
- De los Santos, C., 2011. *Efecto de la mineralogía, alteración y geometría en la resistencia mecánica de las vetillas, mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile*. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra. Concepción.
- González, R., 2018. *Modelo de zonación geotécnica para el macizo rocoso El Teniente*. Superintendencia de Geología, Gerencia de recursos mineros y desarrollo, COLDECO Chile. Referencia interna GRMD-SGL-INF-041-2018.
- Howell, F.H.; Molloy, J.S. 1960. *Geology of the Braden orebody, Chile, South America*. Econ. Geol., Vol. 55, No. 5, p. 863-905.
- Köken, E., Özarlan, A., 2018. *New testing methodology for the quantification of rock crushability: Compressive crushing value (CCV)*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, vol. 25, No. 11, pp 1227.
- Korman, T., Bedekovic, G., Kujundzic, T., Kuhinek, D., 2014. *Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher*. Physicochem Probl. Miner. Process. Vol. 51, No. 2, pp. 461-475.
- León, I., 2016. *Determinación del tamaño de las vetillas tipo stockwork mediante fotografía digital 3D y análisis*

- estocástico, mina El Teniente*. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología. Santiago, Chile. Recuperado de: repositorio.uchile.cl/handle/2250/140041.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams, M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J., Zentilli, M., 2004. *New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit*. Society of Economic Geologists, Special Publication. Vol. 11, pp. 0000-0000.
- Marcos, C., 2010. *Mineralogía: Tema 27-5: Filossilicatos*. [Apuntes del curso Cristalografía y Mineralogía]. Universidad de Oviedo. Oviedo, España. [En línea: <http://ocw.uniovi.es/course/view.php?id=94>]
- Munizaga, F., Maksaev, V., Mathur, R., Ruiz, J., McWilliams, M., and Thiele, K., 2002. *Understanding molybdenite Re-Os ages from the El Teniente porphyry copper deposit, Chile*. Geological Society of America Abstracts with programs, vol. 34, no. 6, p. 336.
- Narayanan S S. and Whiten W.J. (1988). *Determination of comminution characteristics from single particle breakage tests and its application to ball mill scale-up*. Trans. Inst. Min. Metall, vol. 97, p. 115-124.
- Ojeda, J., Hernández, E., Ossandón, G., Enrione, A. y Mestre, A. 1980. *El Pórfido Cuprífero El Teniente*. Informe interno, Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, CODELCO-Chile, División El Teniente. 76 p.
- Tapia, J., 2010. *Capítulo 4: Teoría de la conminución*. [Apuntes del curso Preparación Mecánica de Materiales]. Universidad Arturo Prat. Iquique, Chile.
- Torres, M., (2017), *Módulo IV: Fundamentos de procesos mineralúrgicos*. [Diapositivas de PowerPoint]. Extracto del diplomado de Fundamentos y Procesos de Conminución. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- Urizar, G., 2019. *Influencia de la mineralogía de ganga en parámetros metalúrgicos de molienda y flotación, División El Teniente- CODELCO Chile*. Trabajo integrativo final para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada a la Geometalurgia. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Concepción, Chile.
- Villalobos, J. 1975. *Alteración hidrotermal de las andesitas del yacimiento El Teniente, Chile*. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas & Matemáticas, Departamento de Geología. 125 p.
- Young, C., 2019. *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining & Exploration. Englewood, Colorado, USA. 2312 p.