



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

Implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como chancado cuaternario para incrementar la capacidad de molienda

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Daniel Martin DELGADO SECLÉN

Angel Hernán MACHADO YONG

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Delgado, D. (2021). *Implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como chancado cuaternario para incrementar la capacidad de molienda*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	DANIEL MARTIN DELGADO SECLÉN
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47945792
URL de ORCID	“__”
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	ANGEL HERNÁN MACHADO YONG
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47190726
URL de ORCID	“__”
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7411-3866
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07770007
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
Datos de investigación	
Línea de investigación	No Aplica
Grupo de investigación	«TECNOLOGÍAS METALÚRGICAS SOSTENIBLES»
Agencia de financiamiento	Sin Financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú. Departamento: Tacna. Provincia: Jorge Basadre. Distrito: Ilabaya. Coordenadas: Latitud: -17.273831 Longitud: -70.628027
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 - 2020
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia»

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

Mediante la plataforma virtual de Google Meet la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 27, del mes de septiembre del 2021 siendo las 18:09 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador.

Reunidos virtualmente para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA de Don: DANIEL MARTIN DELGADO SECLÉN Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentó la Tesis Mancomunada Titulada: «IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE RODILLOS DE ALTA PRESIÓN (HPGR) COMO CHANCADO CUATERNARIO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE MOLIENDA» para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: METALÚRGICO.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

El Jurado procedió a la calificación según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....QUINCE (15).....

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO, a Don: Daniel Martin Delgado Seclén.

Siendo las 19:30 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 27 de septiembre de 2021


Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Miembro Presidente


Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL
Miembro


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
Miembro



Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.09.2021 19:52:45 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://meet.google.com/rqo-kovh-nbb>

Grabación archivada en: <https://drive.google.com/file/d/116pNBA190XI774R4YDPXkO7nIZ3iSA-8/view?usp=sharing>



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia»

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

Mediante la plataforma virtual de Google Meet la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 27, del mes de septiembre del 2021 siendo las 18:09 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador.

Reunidos virtualmente para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA de Don: ANGEL HERNÁN MACHADO YONG Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentó la Tesis Mancomunada Titulada: «IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE RODILLOS DE ALTA PRESIÓN (HPGR) COMO CHANCADO CUATERNARIO PARA INCREMENTAR LA CAPACIDAD DE MOLIENDA» para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: METALÚRGICO.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

El Jurado procedió a la calificación según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....QUINCE (15).....

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO, a Don: Angel Hernán Machado Yong.

Siendo las 19:30 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 27 de septiembre de 2021

Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Miembro Presidente

Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL
Miembro

Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS
Miembro



Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.09.2021 19:51:49 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR
DIRECTOR
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

https://meet.google.com/rqo-kovh-nbb

Grabación archivada en: <https://drive.google.com/file/d/116pNBA19OXI774R4YDPXkO7nIZ3iSA-8/view?usp=sharing>

ÍNDICE

Contenido	Pág.
ÍNDICE.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	13
1.1. Situación Problemática.....	13
1.2. Formulación del Problema	15
1.3. Objetivos	16
1.4. Justificación	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Antecedentes de investigación.....	18
2.2. Bases teóricas.....	25
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	64
3.1. Hipótesis general	64
3.2. Hipótesis específicas.....	64
3.3. Identificación y operacionalización de variables	64
CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	66
4.1. Tipo de investigación.....	66
4.2. Unidad de análisis.....	68
4.3. Población de estudio	69
4.4. Muestra	69
4.5. Selección de muestra.....	70
4.6. Técnicas de recolección de datos	70

4.7. Análisis e interpretación de la información	70
4.8. Etapas de la investigación.....	71
CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
5.1. Determinar cómo el uso del HPGR logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario	84
5.2. Identificar como el uso del HPGR garantiza la capacidad de mineral requerido para ser tratado en la molienda	94
5.3. Determinar como la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda	99
5.4. Contrastación de hipótesis	102
CAPÍTULO VI. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	106
6.1. Discusión de resultados	106
6.2. Conclusiones	114
6.3. Recomendaciones	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
ANEXOS.....	124
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 1. Resumen de variables y parámetros del modelo de et al. (1997).	62
Tabla 2. Resumen de variables y parámetros del modelo de Schneider-Austin (2009).	62
Tabla 3. Resumen de variables y parámetros del modelo de Torres y Casali (2010).	63
Tabla 4. Rangos Típicos de Drop Weigth Test (DWT) y el tipo de tecnología de trituración o chancado que se recomienda utilizar.	74
Tabla 5. Resumen de variables y parámetros del modelo de Torres-Casali (2009) que fue utilizado en esta investigación.	81
Tabla 6. Datos de P80 y Razón de Reducción (R80) obtenidos de la Prueba Piloto HPGR para la Muestra-2.	88
Tabla 7. Datos de Capacidad Especifica y Consumo de Energia Especifico obtenidos de todas las Pruebas Piloto HPGR	90
Tabla 8. Valores Típicos de Operación de los Equipos HPGR	96
Tabla 9. Principales rubros de la inversión en función al costo total para cada caso o alternativa considerada.	100
Tabla 10. Distribución de los costos operativos para cada caso o alternativa considerada.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1. Prensa de rodillos moderna (Izq. Actual; Der. Esquemática).....	28
Figura 2. Rodillos de molienda de alta presión (HPGR)	29
Figura 3. Aspectos geométricos del proceso de trituración de HPGR	31
Figura 4. Microfracturas de un fragmento de mineral sulfuro sulfuro proveniente de una muestra tratada con HPGR.....	35
Figura 5. Operación de la prensa de rodillos de alta presión HPGR.....	36
Figura 6. Ejemplos de Equipos HPGR (Arriba-Izq.: Metso / Arriba-Der.: FLSmidth / Abajo: Koppern)	38
Figura 7. Etapas de la Conminutacion (Chancado y Molienda)	59
Figura 8. Ejemplo de Distribución Granulométrica.	75
Figura 9. Distribución Granulométrica de las muestras ensayadas.	85
Figura 10. Efecto del Work Index (Wi) en el Tonelaje o Capacidad de Molienda de Mineral.....	86
Figura 11. Distribución granulométrica del producto de las pruebas piloto HPGR para la Muestra-2.	87
Figura 12. Efecto del Torque (Presión de Torsión de los Rodillos) sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2.....	89
Figura 13. Efecto de la Velocidad de Operación de los Rodillos sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2	89
Figura 14. Efecto del Torque (Presión de Torsión de los Rodillos) sobre la la Capacidad Especifica	91
Figura 15. Efecto del Torque (Presión de Torsión de los Rodillos) sobre el Consumo de Energía Especifico	92
Figura 16. Relación entre el Consumo de Energía Especifico y la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2.....	93

Figura 17. HPGR en circuito abierto.....	95
Figura 18. HPGR en circuito cerrado.	96
Figura 19. Distribuciones Granulométricas de los Productos Simulados para un HPGR en Circuito Abierto (color marrón) y un HPGR en Circuito Cerrado (color verde).	98

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicamos a nuestros padres por su apoyo ilimitado y su paciencia infinita.

A Don Humberto Delgado y a Don Alberto Machado, quien en vida siempre nos motivaron a seguir adelante y luchar por nuestros sueños.

Y a Dios por siempre bendecirnos mostrándonos el camino correcto y las personas justas.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro agradecimiento, en primer lugar, a nuestra alma mater, La Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través de su Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Ha sido, es y será siempre un honor pertenecer a “La Decana de América”. En segundo lugar, un agradecimiento especial al Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas, catedrático, investigador, asesor, mentor y amigo nuestro que nos orientó y aconsejó durante casi toda la etapa de formación y lo sigue haciendo hasta la actualidad. Y, por último, a todos nuestros docentes de la Escuela por transmitir sus conocimientos, experiencias y valiosas recomendaciones. Muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo investigativo titulado: *“Implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como chancado cuaternario para incrementar la capacidad de molienda”*. Tuvo como objetivo determinar como la implementación de la tecnología de HPGR como el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país. El método fue analítico, deductivo, e hipotético, con un tipo de investigación aplicada con un diseño experimental, nivel descriptivo–interpretativo y enfoque mixto (cuali–cuantitativo). La población estuvo conformada por las actividades relacionadas con las etapas del chancado. La muestra estuvo constituida por las actividades relacionadas con el chancado cuaternario. Esta investigación se subdividió en tres etapas principales estructuradas para dar respuesta a los objetivos que planteados. Los resultados demuestran que es factible incrementar la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país con la tecnología HPGR, debido que se logra la disminución de la granulometría de alimentación los molinos de barras y bolas, desde un P80 actual de 12,2 mm a un P80 de menos de 6 mm (entre 5,7 y 3,2 mm). Además, las microfracturas generadas por el HPGR permitieron disminuir el Work Index (Wi) de 15,1 Kw-h/TC a 13,7 Kw-h/TC, lo que incrementa la capacidad de molienda y por ende las etapas de procesamiento del mineral posteriores al chancado. Los ensayos de laboratorio y evaluación de escenarios realizados confirman que la instalación de HPGR permite garantizar la capacidad de mineral requerido (60.000 Ton/día) para ser tratado en la molienda. Por otro lado, la evaluación técnica del estudio de factibilidad indica que el desarrollo de un proyecto de instalación HPGR en la cuarta etapa de chancado es la alternativa más viable para incrementar la capacidad de molienda de minerales de alta dureza, en comparación con otras tecnologías disponibles. Se concluye que: *“La implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país”*.

Palabras claves: HPGR, Chancado Cuaternario, Molienda, Empresa minera.

ABSTRACT

This research work entitled: *“Implementation of High Pressure Roller Technology (HPGR) as quaternary crushing to increase grinding capacity”*. Its objective was to determine how the implementation of HPGR such as quaternary crushing affects the increase in grinding capacity in a mining company in the south of the country. The method was analytical, deductive, and hypothetical, with a type of applied research with an experimental design, descriptive - interpretive level, and quantitative approach. The population was made up of activities related to the stages of crushing. The sample consisted of activities related to quaternary crushing. This research was subdivided into three main stages structured to respond to the objectives that were set. The results show that it is feasible to increase the grinding capacity in a mining company in the south of the country with the technology of high-pressure grinding rollers (HPGR), due to the fact that the granulometry of feed to bar mills is reduced and balls, from a current P80 of 12.2 mm to a P80 of less than 6 mm (between 5.7 and 3.2 mm). In addition, the microfractures generated by the HPGR allowed the Work Index (Wi) to be reduced from 15.1 Kw-h / TC to 13.7 Kw-h / TC, which increases grinding and flotation capacity in the processing stages. of the ore after crushing. Laboratory tests and evaluation of scenarios carried out confirm that the HPGR installation guarantees the required mineral capacity (60,000 Ton / day) to be treated in milling. On the other hand, the technical evaluation of the feasibility study indicates that the development of an HPGR installation project in the fourth stage of crushing is the most viable alternative to increase the capacity for grinding high-hardness minerals, compared to other available technologies. It is concluded that: *“The implementation of high pressure roller technology (HPGR) in quaternary crushing affects the increase in grinding capacity in a mining company in the south of the country”*.

Key words: HPGR, Quaternary Crushing, Grinding, Mining Company.

INTRODUCCIÓN

La demanda de minerales en todo el mundo está creciendo debido al ciclo de expansión de la economía mundial, incluso teniendo en cuenta que a pesar de estos últimos años de retracción en los precios de los principales productos minerales. Las empresas mineras presentan inconvenientes en la extracción óptima de los depósitos de minerales; es decir, las etapas de fragmentación y concentración conducen a mayores costos para la implementación y operación de la planta, por lo que la conminución, siendo la etapa más costosa del procesamiento del mineral, se convierte en un campo muy atractivo para las nuevas tecnologías que apuntan a reducir costos.

El propósito del estudio de aplicación de prensas de rodillos, es obtener una posible reducción en la granulometría; por ende, aumentar la capacidad de molienda en comparación con las trituradoras de cono y molinos de bolas convencionales. El proceso de trituración en la prensa de rodillos, representa desde un punto de vista energético, el más eficiente, un hecho que ocurre debido a la lenta aplicación de carga sobre las partículas, lo que provoca el colapso estructural de los granos, minimizando el ruido y la energía perdida en forma de calor.

El presente trabajo de investigación se estructuró en los siguientes capítulos:

El capítulo I, describe el planteamiento del problema enfocado en la presente investigación, es decir, se ha desarrollado la situación problemática, para luego llegar a la formulación del problema de investigación mediante el problema general y los problemas específicos que permiten el planteamiento de los objetivos general y específicos de la investigación que pretenden dar respuesta a lo que el investigador desea averiguar, finalmente el capítulo comprende la justificación teórica, práctica y metodológica.

El capítulo II, a su vez, describe los antecedentes de la investigación, tanto nacionales como internacionales, que abordan las mismas variables del presente estudio, para luego presentar todo lo referente a las bases teóricas como son la tecnología de rodillos de alta presión, el chancado cuaternario y los modelos y simuladores para diseño de equipos de HPGR.

El capítulo III, presenta las hipótesis que enmarcan la investigación como parte esencial desde el punto de vista epistemológico, a su vez también se desarrolla las variables de la investigación, dimensiones, definiciones conceptuales y operacionales de las mismas.

El capítulo IV, presenta la metodología de la investigación como tal, es decir, describe el tipo de investigación, la unidad de análisis, la población de estudio, la muestra, la selección de la muestra, las técnicas de recolección de los datos, el análisis e interpretación de la información, las etapas de la investigación a detalle puesto que representan una parte esencial del proceso investigativo.

El capítulo V, presenta los datos y el análisis de los resultados de la presente investigación, tanto en cuanto, describe como se realiza el uso del HPGR para lograr los niveles de granulometría en el producto deseado, mediante la evaluación física de las muestras, presentando los resultados de las pruebas piloto HPGR, posteriormente se identifica de qué manera el uso del HPGR permite un mayor nivel de capacidad de mineral requerido para el proceso de molienda, a su vez, este desarrolla el proceso mediante el cual se llevó a cabo la implementación de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario, finalmente se desarrolla la contrastación de hipótesis tanto para la general como las específicas.

Por último, el capítulo VI, presenta la interpretación, discusión de resultados, conclusiones y sugerencias que se plantean mediante la presente investigación, para posteriormente indicar las referencias bibliográficas y anexos importantes como la matriz de consistencia.

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Situación Problemática

La explotación minera en América Latina presenta un gran atractivo para las inversiones de capitales nacionales y transnacionales. Según datos de Comisión Económica Para América Latina y el Caribe – CEPAL (2018), Chile es uno de los mayores productores de cobre, mientras que Brasil es el tercer mayor productor de hierro y Perú es uno de los principales productores de plata, cobre, oro y plomo. La región también tiene el 61% de las reservas de litio y está ubicada en la frontera de Bolivia, Argentina, Chile y Perú.

Así mismo, México, Chile, Brasil y Perú representan el 85% de las exportaciones de minerales y metales de la región. Por lo general donde hay operaciones mineras, casi siempre ocurren conflictos. La CEPAL (2018) afirmó que América Latina es la región con los conflictos sociales y ambientales más graves provocados por la minería.

En la actualidad la industria minera se enfrenta a diversos problemas gracias a la necesidad de mejorar los procesos de explotación ya que los actuales presentan una gran demanda de espacio y tiempo para obtener las metas establecidas.

Los minerales metálicos que se explotan en Perú son oro, plata, cobre, zinc, estaño, plata, hierro y plomo. Como se detalla existen diversos tipos de minerales con propiedades y algunos problemas complejos, tales como la dureza del mineral y la baja ley, estas propiedades de dureza son un factor que perjudican no solo la recuperación de los metales sino también compromete la capacidad y eficiencia de las plantas concentradoras.

Con el pasar del tiempo los costos de producción de concentrados en la minería de Cobre y Molibdeno se han incrementado debido a que se evidencia una subida del precio de la energía eléctrica y una baja en la ley de los minerales tratados, también existe una alta competitividad del mercado actual peruano, hay que destacar también que las características mineralógicas en las que se encuentran hoy en día los yacimientos mineros son un gran reto para el mercado.

Estos factores obligan a la industria minera a buscar alternativas para mantener, por lo menos los actuales niveles de producción. Ocasionando que trabajen continuamente en la búsqueda de mejoras operacionales y de diseño que optimicen los procesos de la minería con el fin de obtener el mayor beneficio económico.

En la Planta, ubicada en la parte sur del Perú, mantiene un proceso de chancado de tres líneas A, B y C, cada línea una con una Chancadora MP-800, una zaranda secundaria, dos chancadoras HP-600, y 02 zarandas terciarias; el producto de estas es llevado a la etapa de molienda primaria. De acuerdo con el diseño que se tiene, el producto de chancado debe estar cerca a la $\frac{1}{2}$ pulgada; sin embargo, el problema actual se encuentra en que este producto de $\frac{1}{2}$ pulgada, en condiciones de alta dureza, no garantiza el tonelaje de 60 000 toneladas por día que se debería pasar por los molinos.

Existen diversas posibilidades para aumentar la capacidad de producción en la molienda aun con un tipo de mineral de alta dureza; sin embargo, se presentan, en este caso, diversas condiciones que hacen inviables algunas de ellas tales como: espacio disponible en la planta, tamaño del producto (P80), aplicaciones de ciertos equipos convencionales en el mercado actual, generación de cargas circulantes, análisis del CAPEX y OPEX, y garantía de un aumento en la capacidad de molienda.

Para cumplir con el objetivo se plantea la implementación de una etapa de Chancado Cuaternario con la tecnología de HPGR para obtener un producto

que garantice las 60000 toneladas por día en la siguiente etapa de molienda con un P80 adecuado para la flotación.

Con la finalidad de superar el problema actual que radica en la planta concentradora, referente a la dureza del mineral que expresado en valores de Work Index, cuando se incrementa sobre 15 Kw-h/TC, la capacidad de molienda es afectada considerablemente y disminuye hasta tonelajes menores de 57,000 toneladas por día, perjudicando la productividad de la planta.

Se pretende la viabilidad de implementar una cuarta etapa de chancado con la finalidad de revertir este problema y cumplir con el tonelaje proyectado.

En base a lo expuesto surge la interrogante de investigación.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema general

P_G: ¿La implementación de un chancado cuaternario con la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país?.

1.2.2. Problemas específicos

P_{E1}: ¿Cómo la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) en la etapa de chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país?

P_{E2}: ¿El uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) garantiza la capacidad de mineral requerido tratado en la molienda en una empresa minera al sur del país?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

O_G: Determinar que la implementación de un chancado cuaternario con la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país

1.3.2. Objetivos específicos

O_{E1}: Determinar como el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario logra la granulometría del producto deseado (P80) en una empresa minera al sur del país.

O_{E2}: Identificar como el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementa la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

Actualmente, los proyectos mineros para ser desarrollados deben ser técnicamente factibles y económicamente viables; requiriendo no sólo de modelos de simulación matemática para darle soporte teórico, sino que también debe contener ensayos de laboratorio para ser aceptados. Es este caso, la aceptación de un proyecto requiere de diferentes vías, siendo una de ella la teórica, lo cual es un desafío para la industria minera actual, por lo que resulta necesario demostrar y asegurar que las opiniones de los expertos sean consistentes con el desarrollo del proyecto. La tecnología y el cumplimiento del

marco legal pueden optimizar el proceso de las operaciones mineras para el máximo provecho de extracción de minerales.

1.4.2. Justificación práctica

La explotación racional donde se pueda implementar nuevas tecnologías para el máximo beneficio de los minerales, representa un desafío para las empresas mineras. Es por ello que, esta investigación representa un modelo a seguir para ser llevado a la práctica del uso de los rodillos de alta presión (HPGR), el cual podría ser responsable del incremento de la capacidad de molienda.

1.4.3. Justificación metodológica

El actual trabajo investigativo se sustenta metodológicamente por el uso de las normas de estilo o formato de la Asociación Estadounidense de Psicología (APA), fundamentado en la doctrina vigente en la sociedad actual, a través de un diseño metodológico que permite la fácil comprensión y la solución de una temática planteada; además, se está cumpliendo con la normativa estipulada por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, desarrollando un método científico de investigación actualizado.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Medina (2019) en su investigación titulada: “Análisis de desviación de P80 en etapa de clasificación en planta de molienda”, se muestra la constante necesidad de mantener y mejorar la productividad en la industria minera mediante cambios en los procesos, se debe a alta competitividad del mercado actual chileno y a las características mineralógicas en las que se encuentran hoy en día los yacimientos mineros. Debido a esto, se trabaja continuamente en la búsqueda de mejoras operacionales y de diseño que optimicen los procesos de la minería con el fin de obtener el mayor beneficio económico. En la Planta Concentradora de Codelco División Andina se encuentra, por una parte, la etapa de Molienda Unitaria I, y por otra la Molienda Convencional, la cual se compone de tres secciones A, B y C, cada una con un molino de barras, tres molinos de bolas y clasificación de tamaño mediante hidrociclones; el producto de estas etapas es llevado a una flotación colectiva para obtener el concentrado de cobre. De acuerdo con el diseño de la molienda convencional y molienda unitaria se debe obtener un producto de mineral con un tamaño de partícula igual o menor a los 240 [μm], sin embargo, el problema actual se encuentra en una desviación en el P80 de estas plantas superando los 240 [μm]. Analizando la problemática mencionada en la planta concentradora, se propone en este trabajo de memoria como objetivo principal analizar la desviación del P80 en las plantas afectadas y entregar propuestas de trabajo que permitan llegar a tener un tamaño de producto por debajo de los 240 [μm]. Para cumplir con el objetivo se plantea una metodología a seguir que considera el estudio del circuito y equipos de la planta, un análisis de la desviación del P80, planteamiento de un árbol de hipótesis al problema, y finalmente un análisis estadístico de las variables, junto a muestreos en planta para la

generación del plan de trabajo y recomendaciones. En base al análisis de la desviación del P80 se encuentra que el problema se presenta en el tamaño del producto de la sección B de la molienda convencional y MUNI, específicamente en el producto de las baterías BHC5, BHC6 y MUNI con una media de 243, 268 y 258 [μm], respectivamente. Una vez estudiadas las posibles causas, se llega a que en la sección B existe un problema en la etapa de Análisis de desviación de P80 en etapa de clasificación en planta de molienda clasificación debido a falta de manejo del agua en el proceso y al estado estructural de los hidrociclones; mientras que en el MUNI existe un problema en la etapa de clasificación debido a una desviación en el control operacional en la presión de la batería y en la configuración actual de diseño del hidrociclón. Se recomienda la revisión de los sensores de flujo de agua en las plantas de molienda debido a las diferencias encontradas entre balance de masa y datos del sistema, esto permite tener un mayor control operacional en los circuitos de molienda y clasificación.

En este antecedente, dicho estudio busca garantizar el P80 de la molienda por debajo de las 240 micras. De forma análoga y buscando el mismo objetivo de tener un P80 adecuado en la etapa de molienda, sin perjudicar o afectar el tonelaje de planta, esta investigación permitirá verificar si la implantación de las tecnologías de HPGR permitirán alcanzar el P80 deseado para este fin.

Basaez (2018) en su investigación “Estudio de factibilidad técnica y económica de aumento de capacidad del proceso de chancado, en la compañía minera Altos Punitaqui – Chile, en cuyo trabajo se podrá obtener información concreta respecto a los ámbitos técnicos y económicos, de un aumento de capacidad de 4000 TPD a 6000 TPD en la planta chancado. Para ello se han obtenido indicadores del proceso actual, logrando cuantificar los porcentajes de utilización respecto a la capacidad máxima de cada equipo, obteniendo como primera conclusión que el cuello de botella se genera en la línea terciaria del proceso. En base a lo anterior, y agregando a ellos los “KPI”¹ de disponibilidad y utilización, se proponen cuatro opciones técnicas para lograr el aumento de capacidad en las cuales se muestran las ventajas y desventajas

de cada caso. Estas alternativas son, trabajar en un plan de mejora respecto a disponibilidad y utilización de la planta, agregar un nuevo chancador terciario a la línea crítica, agregar una etapa cuaternaria al proceso compuesto por chancadores de impacto, reemplazar la línea crítica por un chancador de rodillos de alta presión (HPGR). Tras obtener los parámetros técnicos de cada opción, se trabaja evaluando el ámbito económico, calculando el CAPEX para cada alternativa, el plan de mejora operacional se cuantifica en una inversión de \$4,500 USD por mes, en la opción de agregar un nuevo chancador terciario se obtiene un valor de \$700,000 USD, para la opción de crear una línea cuaternaria con chancadores de impacto se obtiene la cifra de \$1,770,000 USD y para la tercera opción que hace referencia a la incorporación de un chancador HPGR en remplazo de la línea terciaria actual se obtiene el valor de \$10,870,000 USD. Con los valores obtenidos se ha realizado un análisis sobre el impacto en el plan de negocios de la empresa, para cada una de las opciones. Finalmente se realiza un análisis combinando los puntos de vista técnicos y económicos, concluyendo cual es la mejor opción para la empresa, respetando los parámetros “HSEC”, logrando una mejora de costos en la producción y cuál de las opciones se adecua de mejor forma al plan de negocio de la empresa.

En este estudio, se busca garantizar por lo menos las 60.000 TPD que actualmente no se puede lograr cuando se tiene mineral de alta dureza, y la capacidad de los molinos solo llega a 56.000 o 58.000 TPD. Asimismo, la investigación de Basaez (2018) habla sobre la disponibilidad y utilización de los equipos, algo muy importante a considerar en esta investigación, ya que al garantizar un producto adecuado a la molienda, podría contribuir a tener una mayor disponibilidad y utilización de los equipos. Por último, la investigación de Basaez contempla la implementación de un chancador de rodillos de alta presión (HPGR), en ese sentido coincide con la presente investigación, que pretende analizar la factibilidad de implementar el HPGR como una etapa adicional de chancado cuaternario.

Cepeda (2016) realizó una investigación para crear un modelo matemático dinámico de rodillo triturador de alta presión (HPGR), y con base

en un mejor cálculo del tamaño final de partícula del producto, se revisó teóricamente el modelo actual. La derivación de este modelo se basa en consideraciones derivadas de las condiciones fenomenológicas y la física newtoniana. El pronóstico de la granulometría de los productos triturados mediante la aplicación del balance de población constituye la base del modelo matemático de trituración que se utiliza actualmente. El modelo matemático se puede verificar comparando permanentemente los datos experimentales versus los datos obtenidos a través del modelado. Las variables utilizadas para la verificación y el ajuste provienen de otra investigación denominada "Modelado y simulación dinámica de HPGR para trituración de mineral de cobre". El propósito de validar el modelo es lograr una representación matemática lo más cercana posible a la planta real.

En esta descripción se muestra la importancia de los modelos matemáticos para predecir la granulometría final del producto en el HPGR, así como también sirve para ayudar a determinar todas las variables que están involucradas en el proceso, y que ayudarán a mantener un control adecuado del chancado cuaternario mediante programas matemáticos, lo cual es recomendable para obtener el máximo beneficio de la implementación de estas tecnologías.

Pizarro (2015) en su investigación "Análisis Comparativo de Modelos Fenomenológicos de HPGR, se presenta la tecnología de molienda con rodillos de alta presión (HPGR), que surge como una alternativa atractiva en las operaciones de trituración, debido al uso eficiente de la energía en el mecanismo de ruptura. En la actualidad existen modelos para la simulación de la operación del HPGR lo suficientemente desarrollados para predecir la distribución de tamaños del producto, la capacidad de tratamiento y el consumo de energía. El objetivo de esta memoria es evaluar las fortalezas y debilidades de dos (2) modelos fenomenológicos para este equipo, el desarrollado por Morrell et al. (1997) y el desarrollado por Torres y Casali (2009). Estos modelos se han implementado en diversos softwares de simulación de procesamiento de minerales, tales como JkSimMet y MolyCop Tools respectivamente. Para lograr lo anterior se utilizará al software Microsoft Excel. Al programar ambos

modelos bajo la misma plataforma de ejecución se procede a realizar el ajuste de los parámetros y a validar la capacidad de predicción de cada uno. En el desarrollo de este trabajo se utiliza una base de datos construida con pruebas piloto, escala de laboratorio e industrial, que fueron recopiladas de revistas científicas y tesis. Al trabajar con los datos obtenidos, se realiza una validación cruzada, con el fin de lograr una buena comparación entre los modelos, en donde un 68% del total del set de datos se utiliza para realizar el ajuste de los modelos y el 32% para calcular la capacidad predictiva de los mismos. Para el modelo de Morrell es posible afirmar que presenta una buena capacidad de ajuste y de predicción para la granulometría del producto obtenido en el borde de los rodillos, esto debido al supuesto que utiliza en la formulación del modelo de granulometría, en que asume que la ruptura es como la de un chancador. A diferencia del modelo de Torres y Casali, en que se modela como una serie de molinos de bolas que trabajan a distintas potencias. En el caso del modelo de Torres y Casali se destaca los bajos errores, tanto de ajuste como de validación, en la estimación del consumo específico de energía, presentando errores menores a un 7%. La principal razón de esta diferencia es que el modelo mencionado incorpora la presión en el cálculo de la potencia, en cambio el modelo formulado por Morrell no la considera en sus cálculos, siendo necesario utilizar el torque del motor del equipo.

Esta descripción contribuye en la investigación debido a que se resalta el uso de los programas de simulación de procesamiento de minerales para realizar las pruebas piloto y la evaluación de los escenarios, tanto a escala de laboratorio como a escala industrial. A su vez, este estudio indica las fortalezas y debilidades que presentan dichos programas y que se deben tener en cuenta

2.1.2. Antecedentes nacionales

Chávez (2019) en su investigación realizada en la Sociedad Minera Brocal se encuentra optimizando sus operaciones y mejorando sus procesos. Es así que la planta de chancado terciario tiene más de diez años operando y actualmente se tiene problemas respecto a la granulometría del producto y al

manejo de un mayor porcentaje de carga circulante de tal manera disminuyendo la eficiencia del circuito de chancado terciario. Estamos en el proceso de mejorar los tiempos de mantenimiento en los circuitos de chancado, pero la planta actualmente tiene muchas paradas debido al mantenimiento de la chancadora terciaria debido a la antigüedad de las instalaciones, por tal motivo se realiza el cambio de la chancadora terciaria. Con los cambios realizados se tiene un incremento en la cantidad de mineral tratado en la planta de chancado habiendo aumentado en 19 TMHD, pero a la vez se tiene una reducción de tamaño del P80 a 8.33 mm el cual permitirá el ahorro de energía en la siguiente etapa de molienda y una mayor liberación del mineral deseado.

Este antecedente contribuye a la investigación, ya que se realiza un estudio de la granulometría del chancado y demuestra los beneficios que genera para los procesos siguientes el contar con un adecuado y controlado sistema de chancado. Asimismo, nos habla del ahorro de energía, lo cual también es muy importante y es una de las virtudes en la implementación del HPGR que se propone analizar.

Salazar (2018) en su trabajo sobre la idoneidad de la molienda de minerales mixtos para liberar oro a nivel experimental, tiene como objetivo evaluar la carga de molienda, la velocidad crítica y el tiempo de liberación del mineral. Se trata de un estudio cuantitativo experimental realizado en el laboratorio MACDESA en el departamento de Arequipa, provincia de Caraveli, distrito de Chala. Los minerales tratados provienen de partículas que se liberan y pasan del 10% al 100% de la malla. Los resultados obtenidos se pueden utilizar para verificar que para la velocidad crítica, el mejor resultado se puede producir cuando se alcanza el 90% de la velocidad crítica, y el 85.64% se logra a través de malla 200, con un análisis de varianza de $p = 0,010$ (menor a $\alpha = 0,05$) y una significancia de 5,76. Para la carga moledora, el mejor resultado se produjo cuando se alcanza el 31,30% de la carga moledora, y teniendo 79,54% pasante a malla 200, con análisis de varianza $p = 0.001$ (menor a $\alpha = 0,05$) y una significancia de 12,85. Para el tiempo de molienda, el mejor resultado se produjo en un tiempo de 16 minutos, con un 84,12% pasante a malla 200, con un análisis de varianza $p = 0,001$ (menor a $\alpha 0,05$) y una significancia de 11,60.

Este antecedente está más enfocado a la etapa de molienda y considera las variables de dicha etapa. Una contribución que se puede considerar está en el hecho de que uno de los factores importantes en la etapa de molienda es la potencia consumida y el grado de liberación de las partículas, esto es de interés para la presente investigación, ya que si el material de alimento para los molinos llega con una granulometría adecuada y con presencia de microfracturas (ventajas del HPGR), los factores de molienda mencionados resultarían ser óptimos.

Zumaran (2017) concluyó en su estudio "Evaluando la influencia de las variables en la distribución del tamaño de partícula de los productos minerales de molienda de bolas" que el aumento en el tiempo de molienda y la disminución en el índice de trabajo de Bond (W_i) de los minerales aumentan el % que pasa por las mallas 16 y 200. Adicionalmente se observó que los minerales con Índice de Trabajo de Bond (W_i) más altos y las partículas más gruesas requieren de mayor impacto y de bolas más grandes.

Este antecedente va enfocado directamente a la etapa de molienda y a optimizar su collar de bolas (medio moedor). Una contribución de este análisis a la presente investigación, es el hecho de mencionar que los minerales con Índice de Trabajo de Bond (W_i) más altos (relacionados con valores de dureza más altos) requieren alto impacto y bolas grandes, es decir, confirma la problemática de la tesis de que cuando tenemos mineral de alta dureza, disminuye nuestra capacidad de molienda.

Echavaudis y Pérez (2017) en su tesis sobre "Determinación del tamaño de partícula óptima en molienda para la concentración por flotación de sulfuro de plomo a partir de un mineral polimetálico" concluye que, se puede observar que los resultados de los análisis granulométrico (tamaño de grano) indican que existe un tamaño óptimo de partícula de mineral de sulfuro de plomo que se libera en mayor proporción, considerando tiempos de molienda comprendidos entre 4 y 16 minutos, cuyo valor se da en la malla -100. Durante el paso del tiempo de 7, 10, 13 y 16 este valor va en aumento. A partir de estos

resultados, se pudo determinar que el tamaño de partícula más adecuado para la mejor recuperación de plomo de minerales polimetálicos es el 67,60% acumulado a través de la pantalla de referencia de -100, y el tiempo de molienda apropiado es de 16 minutos. Estos datos deben tenerse en cuenta al diseñar equipos industriales para la producción continua de plomo obtenida de la galena.

Esta investigación ayuda a entender la importancia de la variable “tamaño de partícula” para garantizar el éxito en las etapas posteriores al chancado. Asimismo, se menciona el concepto del tiempo óptimo de molienda, el cual se reduciría notablemente al implementar la tecnología HPGR y reducir el tamaño del producto (P80) que ingresa a los molinos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Tecnología de Rodillos de Alta Presión

2.2.1.1. Reseña histórica

El desarrollo de la tecnología de los rodillos de alta presión (HPGR) comenzó a mediados de la década de 1950, cuando se utilizó en la briquetización de carbón (Pavez, 2013), pero sus aplicaciones se comenzaron a diversificar en la década de 1970, después de los estudios del profesor Dr. Klaus Schönert de la Universidad Clausthal de Alemania, sobre la compresión de partículas individuales y de capas de partículas. Los resultados mostraron que el consumo de energía se redujo a la mitad en las etapas después del aplastamiento en HPGR. Cabe mencionar que Schönert, en su estudio fundamental de los procesos de trituración, postuló que, cualquier proceso de trituración, hace que las partículas se rompan por las fuerzas de contacto que deforman la partícula y crean un campo de tensión. El nivel de tensión dará como resultado una deformación inelástica o rotura de las partículas. El número de puntos de contacto depende del modo de aplicación del estrés, ya sea en

una partícula a la vez o simultáneamente en un lecho de partículas (Schönert, 1988).

En su investigación, Schönert concluyó que a pesar de la mayor eficiencia energética que se observa en la trituración por compresión de partículas individuales, la eficiencia energética obtenida al romper un lecho comprimido de partículas es considerablemente mayor que la obtenida en los molinos tubulares. La compresión que se produce en un lecho de partículas se denomina también compresión interpartículas.

Los equipos de trituración fracturan los materiales por esfuerzos de compresión, de tracción o de cizalladura. La rotura se puede producir tanto en partículas aisladas como en lechos de partículas. Cuando un lecho de partículas se comprime y se fractura, el resultado es tal que el material se tritura más eficientemente que en un molino de bolas. Schönert determinó que el motivo por el cual sucede este proceso es debido a que el transporte está controlado y promovido por la compresión de los rodillos que resulta de una gran proporción de la energía disponible utilizada única y exclusivamente para fracturar el material.

En los molinos de bolas, el transporte de material dentro del volumen activo del molino y entre los cuerpos de molienda y las diversas zonas de compresión se produce al azar. Esto a menudo hace que las partículas se salgan de las zonas de tensión, lo que resulta en colisiones improductivas entre los cuerpos de molienda entre estos y el revestimiento del molino. Esta forma de usar la energía es bastante dispersiva debido a su naturaleza probabilística.

Para aplicaciones prácticas del principio de trituración eficiente por compresión de lechos de partículas, Schönert sugirió el uso de dos rodillos montados en una estructura muy rígida y alimentados de tal manera que se forme un lecho de partículas entre los rodillos a alta presión (> 50 MPa).

La tecnología HPGR se implementó rápidamente, a mediados de la década de 1980, en circuitos industriales para procesar materiales más blandos

que se encuentran en la industria del cemento, en los que se lograron reducciones de costos debido al ahorro de energía, el aumento de la capacidad del circuito y la larga vida útil. Las superficies de los rodillos, solo se aplicó en materiales más competentes que justificaban los altos costos de mantenimiento de los mismos, como en las rocas de diamante, ya que conservaba la yema debido a la fractura preferencial en los intersticios de partículas (Sampaio y Delboni, 2007).

Las aplicaciones de HPGR en el procesamiento de minerales más competentes y abrasivos se hicieron viables después de la introducción, desde la década de 1990, de nuevas tecnologías en la fabricación de la superficie de los rodillos. La principal innovación fue la adición de pasadores de alta resistencia a la superficie de los rodillos. Este cambio permite una capa autógena formada por el material mismo, para proteger los rodillos y reducir los costos de mantenimiento (Schumacher y Theisen, 1997).

En 1994, la tecnología de HPGR comenzó a abrirse camino en la industria del mineral de hierro, extendiéndose en su procesamiento, especialmente en la preparación de la alimentación de pellets. Desde entonces, la prensa de rodillos se ha aplicado progresivamente a materiales considerados duros y abrasivos. Las aplicaciones para la prensa de rodillos en las actividades mineras que más se destacan son el reemplazo de molinos autógenas (AG) y semi-autógenas (SAG) en las etapas de trituración o chancado terciario / cuaternario o pre-molienda para generar la superficie de granulación, es decir, antes de pasar a la etapa de molienda y flotación. Normalmente, la razón obligatoria para aplicar HPGR como alternativa a los circuitos convencionales de trituración y molienda es aumentar la eficiencia energética (Sampaio y Delboni, 2007).

Los fabricantes KHD, Krupp Polysius y Köppern obtuvieron los derechos de patente de Schönert y desarrollaron la idea basada en las tecnologías existentes. Esto dio como resultado la versión de las prensas de rodillos actuales, como se muestra en la Figura 1.

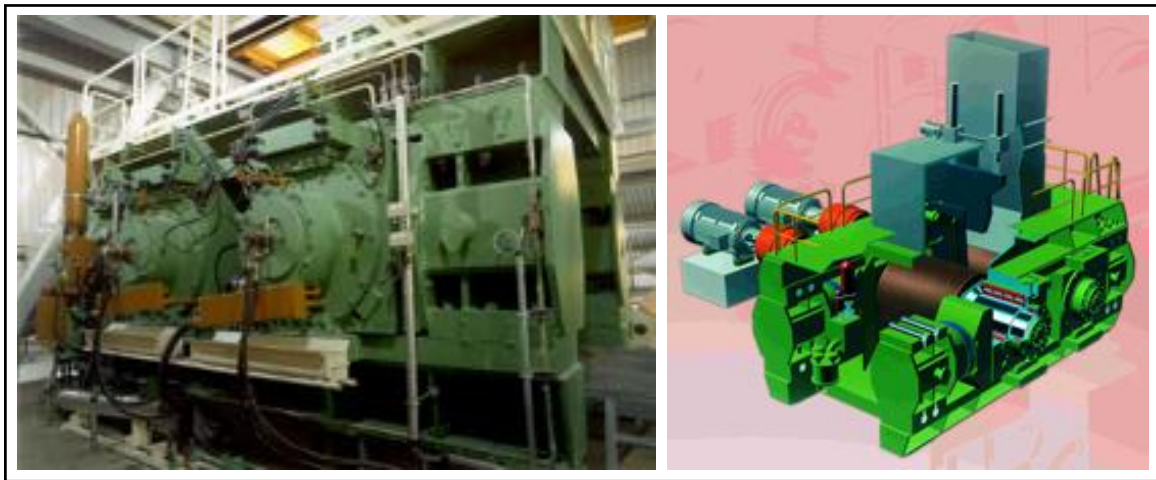


Figura 1. Prensa de rodillos moderna (Izq. Actual; Der. Esquemática).

Fuente: KHD Humboldt Wedag (s.f.)

Según KHD Humboldt Wedag (s.f.), la prensa de rodillos está disponible en ocho tamaños estándar que varían en fuerza de molienda de 2 a 20 meganewtons. Las prensas de rodillos KHD ofrecen una solución confiable para cada aplicación de molienda de cemento, escoria, materia prima o para aplicaciones especiales, como la preparación de mineral.

En el año 2005 se logra aplicar exitosamente la tecnología HPGR en el chancado y procesamiento de diamantes y oro (Koeppern, 2018).

2.2.1.2. Definición Rodillos de Alta Presión (HPGR)

Los rodillos de alta presión (HPGR) usan dos rodillos contra rotativos para triturar eficientemente el mineral. Los cilindros hidráulicos aplican una presión muy alta al sistema, causando trituración entre partículas, ya que el material alimentado se mueve entre los dos rodillos.

Los rodillos de molienda de alta presión, también llamado por su inglés High Pressure Grinding Rolls (HPGR), es un equipo utilizado para triturar materiales. Su principio de funcionamiento, que se muestra en la Figura 1, se produce mediante la aplicación de presión a un lecho de material por un par de rodillos que giran en la dirección opuesta, montados en un marco rígido. Un rodillo se fija y el otro se mueve sobre guías, posicionándose mediante cilindros

hidráulicos. El espacio de separación entre los rodillos (gap) es el que controla el torque (presión de torsión o de rotación de los rodillos). Mientras más pequeño es el espacio de separación, más alto es el torque. (Schönert, 1988)

La aplicación práctica de los resultados obtenidos por Schönert es un diseño de dos rodillos acoplados a una estructura rígida. Uno de los rodillos gira en una posición fija, mientras que el otro rodillo gira moviéndose linealmente, a través de la acción de un sistema de presión hidráulica. La alimentación se realiza normalmente por gravedad desde un silo instalado encima de los rodillos (Schönert, 1988). La Figura 2 ilustra un equipo HPGR con sus principales elementos.

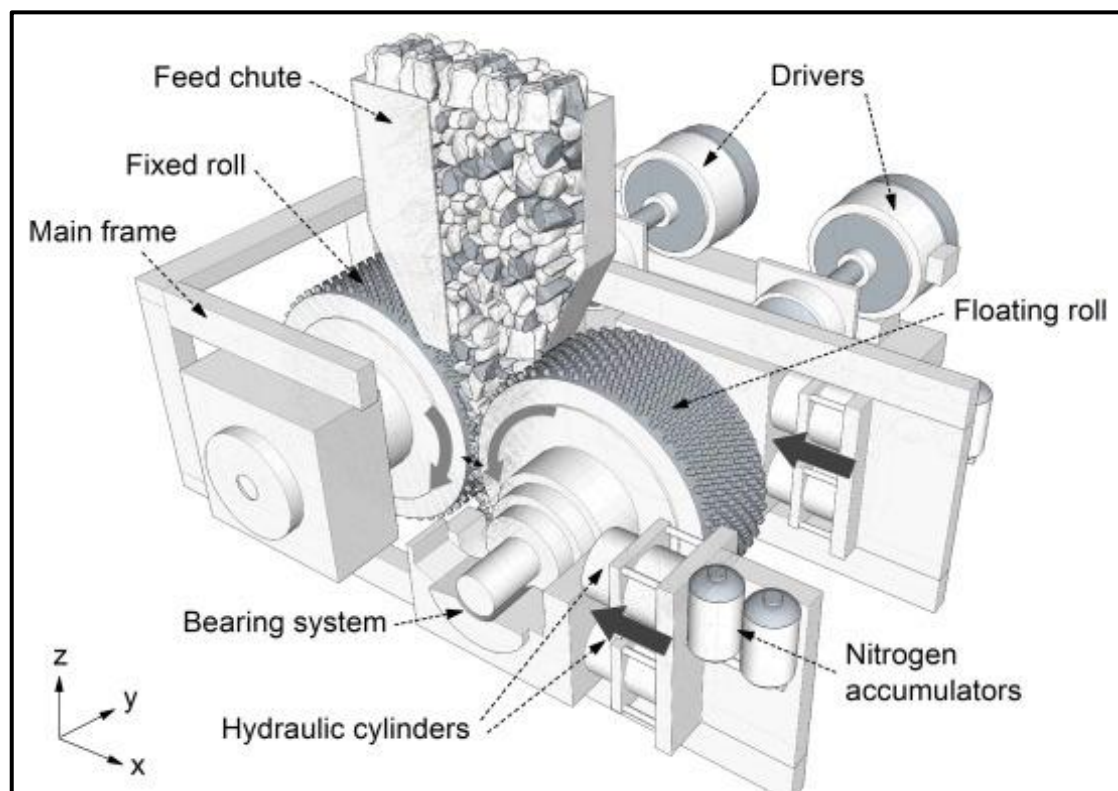


Figura 2. Rodillos de molienda de alta presión (HPGR)

Fuente: Barrios y Tavares (2016)

El sistema de presión hidráulica es responsable de introducir la fuerza de molienda en el lecho de partículas a través de un rodillo flotante. Generalmente consiste en uno o dos cilindros acumuladores de nitrógeno y uno o dos pistones a cada lado del rodillo flotante. Los cilindros acumuladores de nitrógeno son del tipo de pistón o vejiga. El aceite se introduce en el sistema a

través de una unidad hidráulica que consta de un depósito de aceite y una bomba, válvulas y elementos de temperatura (Klymowsky Patzelt, y Burchardt, 2002)

El sistema de presión hidráulica, empleado tradicionalmente por los fabricantes, comprende el uso de una fuerza de compresión similar a la ejercida por los pistones hidráulicos. Metso ha desarrollado un concepto en el que la fuerza aplicada por los pistones es la mitad de la fuerza de compresión. Esta particularidad es el resultado del desempeño de la estructura principal del equipo (ArchFrame) como brazo de fuerza y el posicionamiento de los pistones sobre la línea formada por el centro de los rodillos. Dicha configuración permite reducir el número y las dimensiones de los cilindros hidráulicos (Oliveira, 2015).

La operación de un HPGR comienza después del ajuste inicial del espacio entre los rodillos (gap inicial de cero), las presiones hidráulicas y de nitrógeno. Durante el proceso, se alcanza un torque (presión de torsión o de rotación de los rodillos) de funcionamiento ajustando el espacio entre los rodillos (gap) al lecho de partículas. Este parámetro se denomina brecha operativa entre los rodillos (brecha de trabajo).

El proceso de conminución (reducción del tamaño de las partículas minerales por trituración o chancado) en un equipo HPGR comienza con la alimentación de las partículas entre los rodillos en un área que se llama pre-trituración. En esta región, las partículas más grandes que un cierto espacio crítico (espacio crítico) son trituradas por el mecanismo de ruptura de partículas individual, similar al experimentado por las trituradoras de rodillos convencionales. Las partículas más pequeñas que esta abertura se dirigen a una región de alta presión (zona de compresión) donde ocurre la conminución interparticular (Torres, 2015).

La transición del material desde la zona de pre-trituración a la zona de compresión se caracteriza por la compactación, fricción y reordenamiento de las partículas, en las cuales las más pequeñas ocupan los huecos entre las más grandes. En este proceso, la densidad aparente del material aumenta

gradualmente, alcanzando hasta el 85% de la densidad real del material. Luego, las partículas se descomponen, dejando el equipo en formato de escamas o flujo libre (Rashidi, Rajamani; y Fuerstenau, 2017)

Se ejerce una presión sobre el lecho de partículas entre los rodillos de hasta un 85% la densidad real del material. Dicha compresión es alcanzada aplicando alta presión hasta 300 MPa, lo cual supera la resistencia de compresión del material de alimentación. La mayor presión entre los dos rodillos se logra donde el espacio entre los mismos (gap) llega al mínimo (Meraz, 2018).

La Figura 3 ilustra los aspectos geométricos del proceso de trituración de HPGR; es decir, la relación de los ángulos en la zona de trituración y sus variables geométricas.

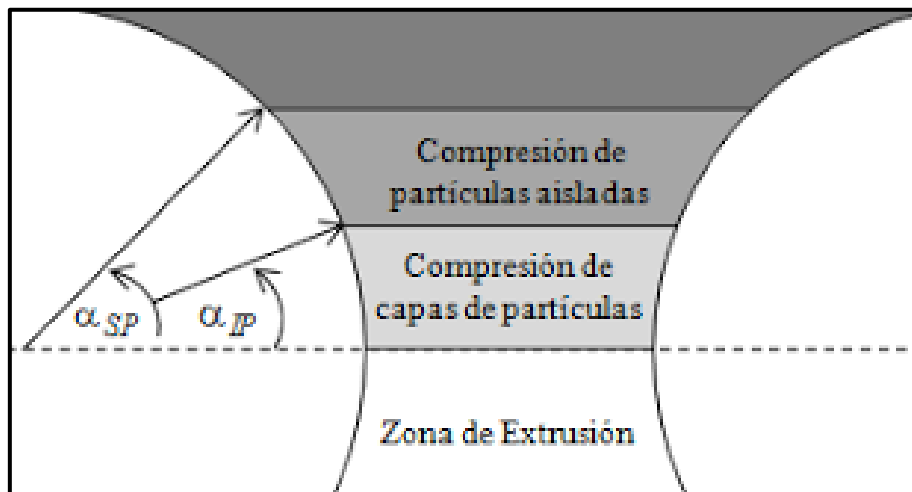


Figura 3. Aspectos geométricos del proceso de trituración de HPGR

Fuente: Barrios y Tavares (2016)

La determinación del ángulo de captura de las partículas para la zona de compresión es de fundamental importancia, ya que permite una definición adecuada del tamaño superior de la alimentación que minimiza la rotura de una sola partícula y, en consecuencia, dirige la mayor parte de la alimentación a la región donde conminución interparticular.

En la práctica, la definición del tamaño de alimentación superior que maximiza la conminución interparticular se basa en la experiencia de

fabricantes e investigadores basada en la relación entre este parámetro y la apertura operativa de los rodillos. Schönert (1998) sugirió que esta relación no debería exceder 2.5. Por otro lado, Van Der Meer (2010) mostraron que una buena estimación para esta relación sería 1.75.

2.2.1.3. Características de los Rodillos de Alta Presión (HPGR)

Según el portal web Metso Minería (s.f.), la trituradora de rodillos de alta presión (HPGR) tiene una tecnología basada de la trituración de minerales mediante rodillos de alta presión con un diseño simple pero robusto que maximiza la eficiencia, la disponibilidad y la confiabilidad. En este sentido, la trituradora de alta presión con esta enfocada hacia la eficiencia.

La trituradora de rodillos de alta presión es una solución de trituración energéticamente eficiente, y ahora ha mejorado aún más esta tecnología. Según el portal web señala que el modelo HRC™ (HPGR) de la marca Metso tiene un enfoque innovador basado en las siguientes características principales:

- Marco (MetsoArch-frame) patentado, carcasa anti-distorsión.
- Rodillos de pasador de carburo de tungsteno con patente pendiente con bridas HRC™ HPGR.
- Tolva de alimentación con guía por placas para guiar la alimentación a la zona de trituración.
- Cilindros hidráulicos ajustables que proporcionan una fuerza de trituración óptima.
- Unidad de velocidad variable adecuada para operar entre el 110% y el 30% de la velocidad máxima. Es decir, los tamaños seleccionados se aplastan entre el 110% y el 50% de la velocidad máxima.
- Recinto antipolvo para proporcionar una barrera contra el polvo y el ruido, ofreciendo protección adicional a los cojinetes principales.

En cuanto a los beneficios de este modelo se tienen los siguientes:

- Mayor capacidad del circuito y eficiencia: las bridas conducen el material a la zona donde se lleva a cabo la trituración, aprovechando al máximo el volumen de mineral triturado. En un proceso de escala piloto de circuito cerrado, se obtuvo un aumento de más del 20 por ciento en la capacidad y una reducción de más del 10 por ciento en la energía específica del circuito
- Disponibilidad optimizada: el marco de arco patentado suprime el tiempo de paralización de la producción asociado con distorsiones
- Mayor confiabilidad: la carcasa anti-distorsión de marco de arco evita que los rodamientos se dañen debido a una desalineación
- Costes operativos reducidos: la eficiencia energética, la longevidad de los componentes sujetos a desgaste, incluidos los rodillos con pasadores, y la no utilización de medios de molienda contribuyen a la reducción de los costes operativos
- Parámetros de operación flexibles: la velocidad y la presión de los rodillos se pueden calibrar a las diferentes condiciones del mineral y a las demandas del circuito posterior al equipo

2.2.1.4. Funciones de los Rodillos de Alta Presión (HPGR)

Las funciones de los rodillos de alta presión (HPGR) son las siguientes:

- **Triturar** (siglas en inglés comminution). Las partículas de roca están formadas por minerales que tienen estructuras cristalinas específicas (Luz, Sampaio, y França, 2010). El proceso de fracturación, es necesario que estén sujetos a una fuerza que exceda su límite de ruptura. Varios factores contribuyen a la fragmentación de una partícula y, por lo tanto, el resultado nunca se predice con precisión. Sin embargo, la probabilidad de falla está relacionada con la cantidad de energía que se absorbe durante la solicitud. Después de un cierto valor, conocido como energía de ruptura de partículas, se rompe. Este límite es intrínseco al material, además de depender del tamaño, la morfología, la estructura y la intensidad en la dirección de la fuerza.

Incluso para partículas del mismo material y con las mismas propiedades, se observan diferentes energías de ruptura. (King, 2001)

- **Abrasión, compresión e impacto.** La trituración por abrasión, compresión e impacto consiste en métodos específicos para reducir el tamaño de partícula frotando la superficie de las partículas de mineral con la superficie de los cuerpos de molienda (abrasión), aplicando presión (compresión) o creando un impacto cinético entre mineral y cuerpo de molienda, el cual representa el impacto (Outokumpu, 2002).

La abrasión es el resultado de tensiones de corte en la superficie y una fuerza normal en la superficie de la partícula que es insuficiente para romperse. Como consecuencia, solo existe la fragmentación superficial de la partícula. La distribución granulométrica típica tiene dos picos (exceso de finos y partículas con tamaños cercanos al original) bien separados por bandas granulométricas que no tienen partículas (King, 2001). Es un proceso con alto consumo de energía.

Wills y Nappier-Munn (2016) señalan que, la compresión representa la característica principal de la fragmentación obtenida a través de la compresión es una distribución de tamaño bimodal, con una cantidad significativa de finos generados en la zona de compresión y con partículas más grandes resultantes de la rotura de tracción indirecta (dependiendo de la compresión diametral).

En el mecanismo de compresión, la aplicación de la fuerza es normal a la superficie de la partícula y lenta (en comparación con la ruptura de impacto), lo que permite al esfuerzo aplicado aliviarse con la aparición de la primera fractura. Este tipo de fractura ocurre en las trituradoras y produce pocos fragmentos de gran diámetro. En los molinos, se asocia con la compresión de partículas entre los cuerpos de molienda, y también a la compresión interpartículas en los rodillos de alta presión (HPGR).

La ruptura interpartícula se diferencia notoriamente de la ruptura por compresión de una sola partícula, lo cual ocurre entre las superficies de un chancador convencional. En la Figura 4 se observa la fotografía de una sección delgada de un fragmento de mineral sulfuro proveniente de una muestra tratada con HPGR, mostrando microfracturas que podría acelerar la biolixiviación (Baum, 1997).

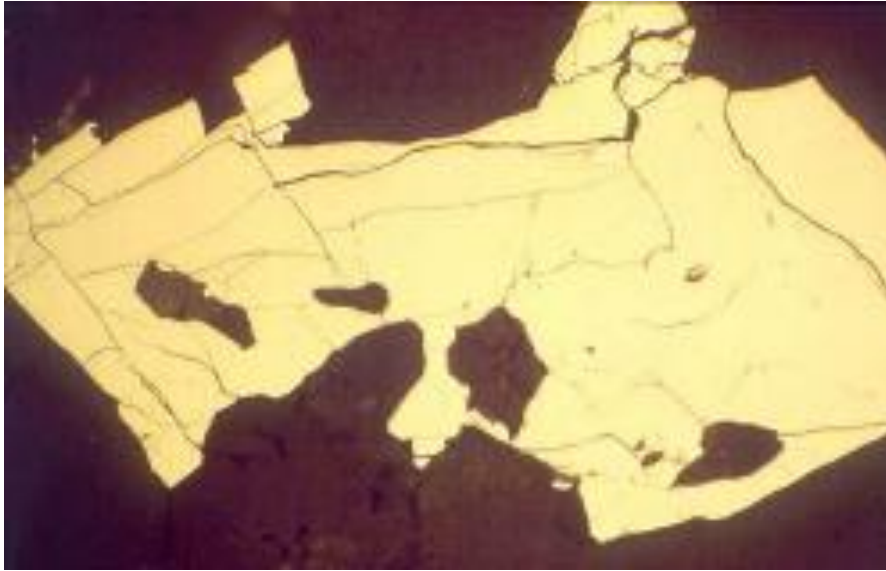


Figura 4. Microfracturas de un fragmento de mineral sulfuro proveniente de una muestra tratada con HPGR.

Fuente: Baum (1997)

La fragmentación del impacto se logra mediante la aplicación rápida de una fuerza de compresión, cuya intensidad es mucho mayor que la resistencia a las partículas. Mediante este mecanismo se obtienen varios tamaños de partículas y, una vez que se aplica una alta energía, el proceso de ruptura no es selectivo. Es el tipo de fractura que ocurre en las trituradoras y molinos de impacto en el área donde caen las bolas, y genera una distribución fina del tamaño de partícula. (Beraldo, 1987).

2.2.1.5. Principio de funcionamiento de los Equipos HPGR

La alimentación al equipo HPGR se produce por una tolva de alimentación que se ubica en la parte superior de los rodillos, mientras que el producto conminutado y microfracturado sale por la parte inferior de los rodillos.

El principio de funcionamiento de equipos HPGR ocurre aplicando presión a un lecho de material mediante un par de rodillos que giran en la dirección opuesta, montados en un marco rígido. Un rodillo se fija y el otro se mueve sobre guías, posicionándose mediante cilindros hidráulicos. Estas presiones aplicadas pueden superar los 250 MPa, dependiendo del tamaño de la máquina. La Figura 5 ilustra el funcionamiento del HPGR: el espacio (gap) formada entre el rodillo móvil y el rodillo fijo, el diámetro de los rodillos y la longitud de los mismos.

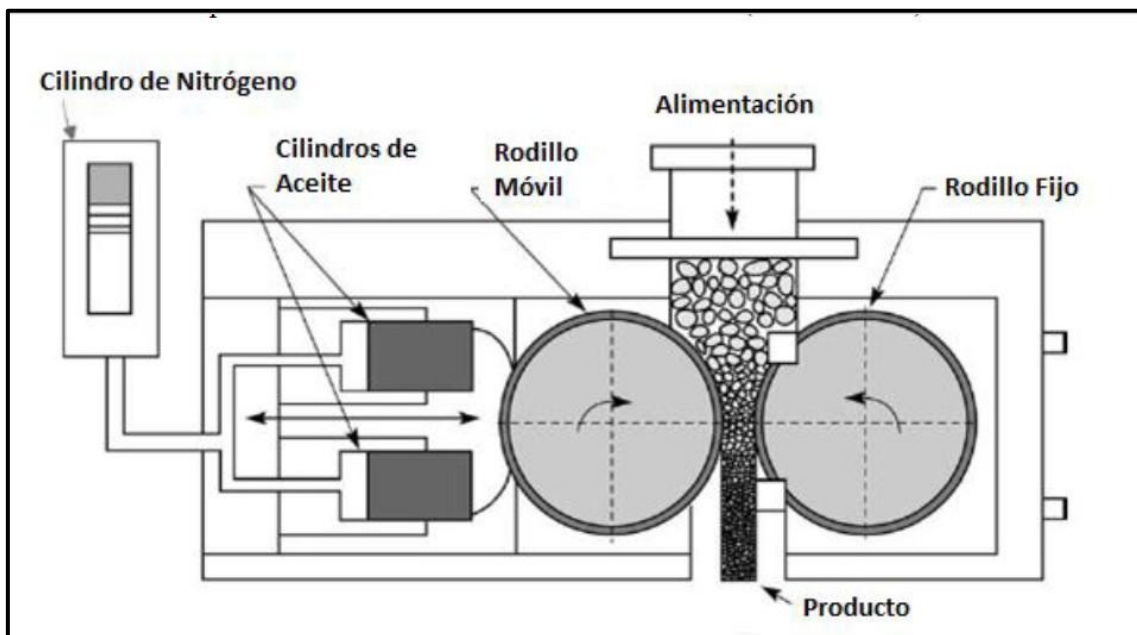


Figura 5. Operación de la prensa de rodillos de alta presión HPGR

Fuente: Napier-Munn (1996, en Meraz, 2018)

La fuerza total, responsable de mover el rodillo, empujándolo contra el lecho de material, se puede ajustar a través de un sistema hidráulico equipado con dos o cuatro pistones. La ecuación 1 introduce la fuerza específica (P) del

fresado que se define por la fuerza aplicada (F) a un área dada por la longitud (C) y el diámetro de los rodillos (D).

$$P = \frac{F}{CD} \quad \text{Ecuación 1}$$

Según Wills y Nappier-Munn (2016), los rodillos están soportados por cojinetes compactos y la presión que actúa sobre el lecho de material se limita a una estructura robusta. El área de presión está sellada en el lado del rodillo mediante placas de desgaste de acero responsables de contener el mineral en los bordes de los rodillos. El silo de alimentación se encuentra en la parte superior del equipo.

Como comparación, las trituradoras de rodillos convencionales operan a velocidades de rodillos periféricos mayores que las utilizadas en HPGR, y la alimentación del rodillo está restringida, con cada partícula triturada sin la influencia de otras partículas. Dentro de la zona de trituración de una trituradora de rodillos convencional, hay espacios vacíos, lo suficientemente grandes, que permiten que las partículas trituradas se muevan hacia estos espacios con una trituración entre partículas muy limitada. Por otro lado, los equipos HPGR se alimentan por gravedad, lo que provoca la formación de un lecho de partículas entre los rodillos. Este lecho confinado de partículas actúa como una palanca que genera una fuerte resistencia a la rotación.

La alta energía de los motores es capaz de generar suficiente torque para superar esta resistencia y forzar al material a pasar entre los rodillos. A medida que el lecho confinado se mueve entre los rodillos, la presión en el lecho aumenta y las partículas se muelen por compresión entre partículas a alta presión. El concepto de ruptura entre partículas se refiere a un proceso de trituración autógena, en el que las partículas se rompen por compresión con otras partículas dentro de un lecho de compresión confinado.

El sistema hidráulico permite variaciones en la posición relativa de los rodillos durante la operación de alta compresión, mientras que en las

tritadoras de rodillos convencionales solo la distancia mínima entre los rodillos es fija y predeterminada. Estos modos de operación completamente diferentes afectan significativamente la forma en que se transfiere la energía a las partículas, lo que resulta en una distribución completamente desigual en el tamaño de las partículas en los productos.

El proceso de trituración comienza con el enclavamiento de las partículas en la zona demarcada por el ángulo de enclavamiento σ , y termina en la zona de compresión máxima, delimitada por el ángulo de compresión α . Después de la compresión máxima, el producto experimenta una pequeña fuerza normal como resultado de su expansión, ya que hay un alivio en la presión ejercida por HPGR. En esta región no delimitada por el ángulo de alivio γ , no hay más trituración.

2.2.1.6. Componentes de los Equipos HPGR

Como se mencionó anteriormente, el HPGR consiste básicamente en dos rodillos paralelos que giran en la dirección opuesta, uno está fijado a la estructura del equipo y el otro es móvil y se desplaza sobre un riel, dependiendo de la presión solicitada por el mineral en los actuadores hidráulicos. En este sentido (Morley, 2006a), señala que la alimentación se realiza verticalmente sobre el espacio entre los rodillos. La

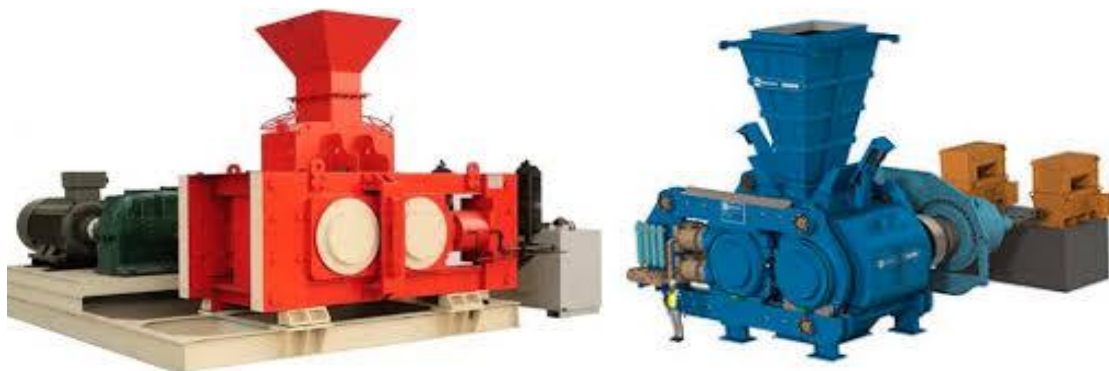




Figura 6 muestra tres ilustraciones de varios equipos HPGR.



Figura 6. Ejemplos de Equipos HPGR (Arriba-Izq.: Metso / Arriba-Der.: FLSmidth / Abajo: Koppert)

Fuente: Arriba-Izq.: Metso Minería (s.f.) / Arriba-Der.: FLSmidth (s.f.) / Abajo: Koppert (2018).

Por su lado, Kawatra (2006) describe que los rodillos son impulsados por motores independientes y conectados a ellos por reductores y pueden operar a una velocidad fija o variable, dependiendo de la demanda del trabajo. Por lo general, la superficie de los rodillos está protegida por pasadores de carburo de tungsteno, que ayudan a formar una capa protectora autógena. Sin embargo, el rodillo puede ser liso o protegido por una capa de metal de mayor resistencia. A

pesar de sus grandes dimensiones, se necesita una base más pequeña en comparación con los circuitos de trituración convencionales, ya que la vibración durante la operación se reduce.

A continuación, los principales componentes de HPGR:

- **Tipos de rodillos y recubrimientos.** Existen diferentes tipos de rodillos para HPGR. La mayoría de los equipos utilizados en la industria del cemento tienen rodillos de una pieza. Este tipo de rodillo está hecho de acero soldable y se forja en su forma final, para obtener buenas propiedades mecánicas. Se utilizan diferentes tipos de aleaciones como recubrimiento adicional para proporcionar una mejor protección contra el desgaste. La remodelación de los rodillos completos es una práctica muy habitual, que, llevada a cabo simplemente revendiendo la superficie, permite remodelar el rollo varias veces antes de reemplazarlo.

Una desventaja de los rodillos sólidos o sólidos es el hecho de que todo el componente es una parte susceptible al desgaste, por lo que el rollo completo debe reemplazarse por completo después de un cierto número de renovaciones, dependiendo de la fatiga del material.

Una desventaja de los rodillos sólidos o sólidos es el hecho de que todo el componente es una parte susceptible al desgaste, por lo que el rollo completo debe reemplazarse por completo después de un cierto número de renovaciones, dependiendo de la fatiga del material.

Para contrarrestar esta deficiencia, se introdujeron los rodillos de anillo, compuestos por el conjunto del eje de rodillo. Por lo tanto, cuando se produce desgaste, solo se debe reemplazar el rodillo y no todo el conjunto, por lo que el eje se puede usar durante un largo período de tiempo. Por otro lado, el diseño de este tipo de rodillo es similar al tipo de anillo, la diferencia es que, en lugar de que el montaje se realice a través de la expansión térmica requerida para el tipo de anillo, la

fijación para este tipo se produce a través de segmentos instalados a lo largo del rodillo. La característica principal de los rodillos segmentados es la objetividad de su intercambio, que ocurre mediante la aplicación de presión para desmontar el rodillo del eje, reduciendo el tiempo y la estructura necesarios para este evento.

En los últimos años, se han logrado avances significativos en los recubrimientos aplicados a la superficie de los rodillos. Este punto ha hecho que la aplicación de HPGR sea bastante atractiva para rocas más duras y abrasivas.

El desgaste del recubrimiento ocurre de manera diferente en dos regiones. En la región I, antes del ángulo que delimita el comienzo de la conminución interparticular o simplemente ángulo crítico, hay una incidencia de movimiento tangencial entre la superficie de la Rodillos y partículas de material. En la región II, después del ángulo crítico, no hay incidencia de movimiento tangencial.

Como consecuencia de las diferentes regiones de desgaste, la superficie de los rodillos en la región I se desgasta al cortar el material con la superficie del rodillo. En la región II, hay fatiga del recubrimiento causada por la compresión del material contra la superficie de los rodillos. Se puede decir que cuanto más competente y abrasivo sea el mineral a triturar, mayor será el desgaste. El desgaste del rodillo se maximiza cuando el espacio entre los rodillos (GAP) es menor que el tamaño superior de la alimentación de la prensa. En este caso, el mecanismo de ruptura de partículas genera un desgaste excesivo en la región I.

- **Sistema de presión hidráulica.** El sistema de presión hidráulica consta de cuatro cilindros hidráulicos: dos en el lado derecho y dos en el lado izquierdo del rodillo móvil. Estos cilindros están conectados por un compartimento de aceite a un cilindro acumulador de nitrógeno. La compresión de nitrógeno en el acumulador actúa como un resorte del

sistema. La presión de nitrógeno se puede ajustar a una operación más rígida o más flexible del rodillo móvil.

Al principio, el sistema tiende rápidamente al equilibrio, y las presiones de aceite y nitrógeno serán idénticas, ya que es un sistema conectado. Sin embargo, el nitrógeno permite expansiones y compresiones rápidas, temperaturas que cambian rápidamente y actúan, literalmente, como un resorte, mientras que el aceite no permite variaciones rápidas. Por lo tanto, cuanto mayor sea el volumen de nitrógeno en relación con el volumen de aceite, más flexible será el resorte, para la misma presión inicial.

La fracción relativa del volumen de nitrógeno es una función de la presión de nitrógeno inicial y la presión inicial del sistema hidráulico. Por lo tanto, si la presión inicial requerida es de 4 MPa, y la presión de nitrógeno inicial se establece en 4 MPa, no habrá aceite en el sistema y el resorte será lo más flexible posible, con un tiempo de reacción prolongado. Si la presión de nitrógeno inicial se ajusta a 2 MPa y, a partir de este valor, se ajusta a la presión del sistema a 4 MPa, con aceite del sistema hidráulico, habrá un resorte muy rígido, pero aún con cierta flexibilidad. En el otro extremo, la presión de molienda inicial se ajustaría a 4 Mpa con aceite hidráulico solo, haciendo que el resorte sea lo más rígido posible. Esta configuración probablemente dañaría el sistema rápidamente durante la operación.

Bajo operación estable, la presión en los cilindros será constante y proporcional a la presión inicial más la resultante del retroceso causado por el desplazamiento del rodillo móvil para acomodar el lecho de material. Esta presión total da como resultado la fuerza de molienda. Como el material nunca es absolutamente homogéneo, la distancia entre los rodillos varía continuamente, y la presión del sistema varía alrededor de un valor promedio. La presencia de nitrógeno permite variaciones y, en general, la presión inicial de nitrógeno debe ajustarse a un valor entre 50 y 75% de la presión operativa inicial. La presión inicial se alcanza agregando aceite al sistema hidráulico.

El sistema hidráulico necesariamente entra en equilibrio, y la presión hidráulica (del aceite) será igual a la del nitrógeno e igual a la presión del sistema. Un tope colocado entre los bloques evita que un rollo toque o toque el otro durante la operación, determinando la distancia inicial entre los rodillos. La distancia inicial entre los rodillos es una variable de proceso controlable y se puede usar para cambiar las condiciones del proceso, especialmente con respecto al ángulo de fricción crítico y la descomposición inicial de las partículas más grandes, cerca del tamaño máximo de alimentación. La distancia inicial entre los rodillos define el punto de partida en el que el sistema de presión hidráulica comienza a actuar.

2.2.1.7. Factores que perjudican la vida del recubrimiento

Entre los principales factores que perjudican la vida del recubrimiento de los rodillos de un HPGR:

- **Característica abrasiva y composición mineral.** La tasa de desgaste de los espárragos es principalmente una función del índice de abrasividad y la competencia del mineral. La ruptura de los pernos se produce fuertemente debido al tamaño superior del material que alimenta la prensa. (Morley, 2010). El índice de abrasión es la medida estándar para definir el grado de abrasividad de un mineral. Sin embargo, este índice no se considera un indicador apropiado para definir el recubrimiento que se aplicará a los rodillos, ya que el índice de abrasividad no está 100% relacionado con los principios de trituración utilizados por la prensa de rodillos. Por lo general, cada fabricante desarrolla su propia metodología para identificar el recubrimiento más aplicable a los rodillos. (Kawatra, 2006)
- **Tamaño de partícula, dureza y fuerza de molienda específica.** La resistencia a la compresión del mineral, en combinación con las

partículas más grandes presentes en la alimentación y la fuerza de molienda específica, determinará el nivel de daño al recubrimiento; por lo tanto, su durabilidad. Cuanto mayor sean los valores de cada variable mencionada, mayor será la probabilidad de daño y desgaste de los rodillos. El daño aumenta cuando las variables ocurren simultáneamente. Como regla general, cuanto mayor es la fuerza de rectificado específica, mayor es el desgaste en la superficie de los rodillos. Es cierto que las partículas de mineral más grandes y duras requieren una mayor fuerza para fragmentarse, sin embargo, es importante que no se aplique demasiada fuerza innecesariamente. (Morley, 2006b)

Según Broeckmann y Gardula (2005), la fuerza de molienda específica debe limitarse a un máximo de $4,9 \text{ N / mm}^2$, dependiendo de la naturaleza frágil de los pernos. Las partículas más grandes generan fuerzas tangenciales contra los espárragos, lo que puede hacer que se rompan.

- **Humedad.** El recubrimiento a base de pernos se basa en el principio de protección autógena, donde el control correcto de la humedad del material de alimentación de HPGR es muy importante, ya que ayuda a formar una capa de material entre los pernos, lo que reducirá el desgaste del recubrimiento. El exceso de humedad provoca un alto desgaste en la superficie de los rodillos, al eliminar la capa autógena.
- **Velocidad de balanceo.** Se deben tomar precauciones especiales a la velocidad de los rodillos. Dunne (2006) relaciona el aumento de la velocidad de los rodillos con el aumento de la turbulencia en la alimentación, un hecho que provoca el deslizamiento del material de alimentación contra la superficie de los rodillos, lo que provoca un alto desgaste en el revestimiento del rodillo.
- **Fuerzas horizontales causadas por el régimen intermitente HPGR.** La tasa de desgaste en el rodillo de presión móvil es ligeramente mayor

que la tasa de desgaste del rodillo fijo. Este hecho se detectó en instalaciones de mineral de hierro en los años 90. Una explicación del fenómeno es que se genera una fuerza cinética horizontal adicional durante el movimiento del rodillo en movimiento. La fuerza creada por el sistema hidráulico crea un desgaste adicional al componente móvil. Aunque el movimiento horizontal no es grande (en la mayoría de los casos entre 2 y 6 mm), el desgaste se produce debido a los picos de presión adicionales que actúan sobre la superficie del rodillo móvil. (Morley, 2010)

- **Extrusión.** La extrusión es el fenómeno en el que el producto emerge de la zona de compresión, debido a la diferencia en la velocidad tangencial del rodillo y la velocidad del material en su superficie. La extrusión normalmente aumenta dependiendo del diámetro del rodillo, la presión aplicada y la humedad de la alimentación. Es más notable en rollos con un recubrimiento más suave y disminuye notablemente en rollos con tacos en la superficie. (Morley, 2010)
- **Conducto de alimentación.** El conducto de alimentación de HPGR no puede limitar el flujo de material a la zona de compresión. Por lo tanto, HPGR debe operar bajo condiciones de ahogamiento y, en consecuencia, alimentación estable, para aumentar la capacidad del equipo y reducir el desgaste de los rodillos. El HPGR tratado en este estudio tiene esta limitación de no formar una columna debido a la alta rotación de sus rodillos y se detallará mejor en los siguientes capítulos. La segregación de la alimentación también influye negativamente en la eficiencia del equipo, ya que proporciona diferentes distribuciones granulométricas a lo largo del ancho de los rodillos, es decir, partículas gruesas alimentadas por un lado y partículas finas por el otro.
- **En otros equipos,** como las trituradoras y molinos de cono o de impacto, este efecto no es tan significativo como en los equipos HPGR. Esto da como resultado un desgaste y una reducción desigual a lo

largo del rodillo, además de la desalineación (Van Der Meer y Maphosa, 2012).

2.2.1.8. Ventajas y Desventajas de los Equipos HPGR

A continuación, se enumeran las ventajas y desventajas de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) dentro de la industria del procesamiento de minerales:

Ventajas

- **Disminución de los costos operativos.** La aplicación de la tecnología HPGR reduce los costos operativos. Esto se debe al uso efectivo de energía en el mecanismo de trituración y a la reducción del índice de trabajo Bond (1957) o Work Index (Wi) del molino de bolas, que está relacionado con la ocurrencia de microfisuras. De manera similar, a través de esta tecnología, se puede eliminar el costo del medio de trituración en el circuito autógeno (AG) o semi-autógeno (SAG).
- **Distribución del tamaño de las partículas más amplia y las partículas más finas.** En comparación con la distribución de tamaño de partículas producida por la trituradora de tercera etapa (por ejemplo, la trituradora de cono), el equipo HPGR puede producir una distribución de tamaño de partículas más variable con partículas más finas.
- **Creación de microfracturas en las partículas.** En productos de HPGR hay mayor cantidad de microfracturas y características del tamaño de partícula. Las microfracturas, que se forman en la zona de compresión, se convierten en planos de debilidad que se desintegran al aumentar la presión.
- **Disminución del Work Index (Wi).** Las microfracturas entre las partículas que se generan en el proceso de chancado con tecnología HPGR, da como resultado una reducción del índice de trabajo de Bond (1957) o Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de Bond (1957), que

genera ventajas en las etapas siguientes de molienda. Esta reducción oscila entre 10-25% para la mayor parte de los minerales.

- **Se pueden procesar minerales con cierta humedad.** Los equipos HPGR deben ser alimentados con minerales, estos minerales preferiblemente contienen un cierto nivel de humedad, lo que favorece la formación de una adecuada superficie de desgaste auto-generadora. Generalmente, el uso de equipos HPGR para triturar ayuda a procesar minerales relativamente húmedos. En algunos casos, la humedad del mineral es de hasta un 10%.
- **Menor consumo de energía.** En comparación con otros procesos de molienda, la tecnología HPGR consume mucha menos energía. El consumo de energía específico de la mayoría de los minerales se encuentra entre 0,8-3,0 Kw-h / ton. Además, cuando se asocia con procesos de molienda posteriores, el consumo total de energía se reduce en un 40%.
- **Baja sensibilidad a los cambios minerales.** Comparando la tecnología HPGR con otros molinos convencionales de auto-molienda (AG) o semi-auto-molido (SAG), el equipo HPGR puede hacer frente a cambios en la dureza de los minerales con poco impacto en el rendimiento de trituración.
- **Mejor rendimiento en el tratamiento físico-químico del mineral.** El procesamiento con la tecnología HPGR generan partículas con microfracturas, y estas microfracturas están asociadas a un aumento de la porosidad y permeabilidad de los minerales, ayudando a un mejoramiento en el rendimiento de los procesos de flotación. De la misma manera, el tratamiento con HPGR aumenta la cantidad de material más fino y pueden aumentar inherentemente la liberación de sulfuros, lo que brinda en muchos casos una mejor accesibilidad de flotación.

Desventajas

- **Circuitos más complicados.** La complejidad del circuito que contiene el dispositivo HPGR es mayor. Entre ellos, la pulverización se divide en dos etapas, además, el equipo de manipulación y procesamiento de materiales suele ser más grande que los molinos tradicionales de auto-molienda (AG) o semi-auto-molido (SAG). El equipo HPGR está delimitado por la granulometría de la alimentación (50 mm aprox.), por lo que comúnmente realiza operaciones en la tercera o cuarta etapa de trituración.
- **Complejidad del sistema de transporte de minerales.** La principal desventaja de usar el circuito de trituración del equipo HPGR es la complejidad del sistema de transporte de mineral, que incluye múltiples cintas transportadoras para manejar diferentes velocidades de flujo y recolecta el sistema colector de polvo durante el proceso de transporte.
- **Elevada humedad en la alimentación.** Los minerales con elevado índice de humedad pueden causar un rendimiento bajo y elevadas tasas de desgaste de los rodillos. La alta humedad en el material complica la generación de la capa autógena en la superficie del rodillo, lo que a su vez acorta la vida del rodillo. Esto significa que puede producirse una limpieza de la capa autógena y un rápido desgaste del rodillo
- **Incapacidad para manejar minerales arcillosos.** Los equipos HPGR no están diseñados para procesar minerales de arcillas, por el deslizamiento que se produce en los rodillos, la reducción del rendimiento y la producción de material fino en forma de tortas excesivamente grandes. Sin embargo, aunque ésta problemática se presenta actualmente, varias compañías están indagando en nuevos diseños de circuitos para trabajar con dichos tipos de mineral. En la actualidad, los HPGR pueden tolerar un contenido máximo de minerales arcillosos de 10% o 15%. En menas con contenidos de minerales arcillosos mayores de 20% empiezan a operar con limitaciones.

2.2.2. Chancado Cuaternario

2.2.2.1. Conminución (Comminution)

En el contexto de la industria minera, la conminución (siglas en inglés Comminution), cuyo significado proviene del latín “comminuere” (hacer más pequeño), incluye los siguientes pasos de reducción del tamaño de partículas: desmantelamiento, trituración y molienda de rocas. Su propósito es permitir el manejo y transporte del material, ajustar la distribución granulométrica para los pasos posteriores o liberar el mineral de interés para su recuperación en el paso de separación. (Chaves, 2006)

Gaggiato (2018) señala que la conminución de la minería se refiere a la ruptura de la materia prima, en este caso mineral en bruto, con impurezas, en partes más pequeñas; es decir, es un proceso utilizado por las compañías mineras al producir diferentes tipos de productos, que después de otras etapas, compondrán edificios, estructuras metálicas en general, equipos industriales e infraestructuras pequeñas o grandes.

Conminución es el procesamiento de materiales para romper rocas y materias primas en partículas y piezas más pequeñas. Esto se utiliza en la minería y en la producción de una amplia gama de productos, incluidas las materias primas para la construcción, así como los componentes terminados.

Las empresas pueden usar procesos húmedos y secos, dependiendo de los materiales con los que trabajan y cómo planean usarlos. En esta área, el trabajo de investigación y desarrollo incluye la invención de nuevos equipos, mejores sistemas de clasificación y nuevos usos de materiales previamente desperdiciados.

La conminución de mineral es un proceso, en la actividad minera, en el cual Gaggiato (2018) divide al proceso de conminución en dos partes:

- **Trituración o Chancado.** En la trituración de minerales, la misma puede considerarse la primera etapa de beneficio de los minerales, porque es la primera transformación de las materias primas después de ser extraída, siendo responsable, como su nombre lo dice, de transformar piezas más grandes en partículas de tamaño gravas y arenas (entre 2 y 20 mm). El término chancado es sinónimo de trituración, mientras que el término chancadores es sinónimo de trituradoras. Existen varios tipos de trituradoras, como se llama al equipo de minería responsable de este paso, siendo las más populares las siguientes:

- ✓ Rompe mandíbulas
- ✓ Trituradora rotativa
- ✓ Trituradora de cono
- ✓ Trituradora de un solo rodillo
- ✓ Trituradora rotativa
- ✓ Trituradora de doble rodillo
- ✓ Trituradora de impacto
- ✓ Trituradora de martillo

- **Molienda.** Obviamente, el paso después de la molienda, también se conoce comúnmente como fragmentación fina. Esta etapa del proceso de trituración mineral es responsable, como su nombre lo indica, de moler las gravas y arenas y transformarlas en partículas de tamaño limos y arcillas (menores de 0.2 mm o 200 micras), para así aumentar aún más el área de contacto del compuesto mineral y facilitar el procesamiento futuro (lixiviación y concentración), que purificará el mineral en bruto, convirtiendo la materia prima en producto final, ampliamente utilizado en varios segmentos del mercado, incluso en el área de cosméticos.

En la molienda, el tamaño de las gravas y arenas ahora se reduce aún más por las técnicas impuestas por los equipos de minería que causan,

en la materia prima, post-molienda, compresión, abrasión, impacto y fricción, lo que reduce el producto del proceso anterior, en el caso de la trituración, a un tamaño que conduzca a la liberación del mineral deseado como producto, para que se concentre regularmente en los procesos por venir.

La molienda de minerales, practicada por los equipos industriales antes mencionados para la minería, se lleva a cabo mediante molinos cilíndricos (de barras, bolas o guijarros) o con un martillo, que son responsables de las moliendas más finas, principalmente a través de la fricción con la pared. molinillo de mineral.

Los molinos de bolas cilíndricos los utilizan como medio de molienda y se utilizan para la molienda más fina del mineral. Los molinos de barras cilíndricas se utilizan para la molienda gruesa, soportando una alimentación de hasta 50 mm. Sin embargo, muchos también los consideran máquinas de trituración fina.

La molienda de minerales es el paso de trituración más costoso, con altos costos, que varían según el tamaño de las partículas de mineral resultantes del procesamiento de las menas o materiales.

Por otro lado, los métodos de trituración se clasifican según la distribución granulométrica del mineral. El desmantelamiento de rocas se considera la primera etapa de este proceso, ya que el mineral se elimina del sitio original. Posteriormente, en la planta de procesamiento de minerales, la trituración se divide entre trituración y molienda. (Wills y Nappier-Munn, 2016)

En la trituración, la reducción del tamaño de partícula se realiza en varias etapas, con una razón de reducción baja (que varía de 3:1 a 6:1 en cada etapa), generalmente seca, principalmente por impacto o compresión entre 0,2 y 2,0 Kw-h/Ton. A diferencia del paso de molienda, en el que la relación de reducción es alta, generalmente se realiza en húmedo. Los principales mecanismos de fragmentación son el impacto y la abrasión, con alto consumo

de energía, entre 2 y 25 Kw-h/Ton. Sin embargo, hay un rango de tamaño en el que la operación de trituración se superpone a la operación de molienda. Los estudios muestran que el consumo de molienda gruesa es aproximadamente el doble que el de molienda fina. (Wills y Nappier-Munn, 2016)

Según King (2001), existen factores que apoyan a la fragmentación de una partícula, en lo cual es impredecible establecer los resultados con precisión. En este sentido, la probabilidad de falla depende de la cantidad de energía que se absorbe durante el proceso; en el cual después de cierto valor ocurre la llamada energía de descomposición de partículas, siendo este límite inherente al material y depende del tamaño, la morfología, la estructura y la intensidad / dirección de la fuerza.

Los tres mecanismos principales de conminución son: abrasión, compresión e impacto. En la primera etapa de conminución, desmantelamiento de la roca, cerca de la pared de los agujeros, el mecanismo predominante es la compresión, ya que, al comienzo de la detonación, la tensión ejercida por las ondas de choque es mayor que la resistencia de la roca. Sin embargo, cuando las ondas de choque cambian de medio (cara de roca libre), hay un reflejo de ellas y la roca termina rompiéndose por una fuerza de tracción indirecta, resultante de dos fuerzas de compresión con direcciones opuestas (diametral). Los gases en expansión ejercen fuerza sobre el macizo y abren las grietas formadas.

En la trituración, el mecanismo principal presente es la compresión, seguida de la abrasión, tanto como resultado del movimiento de la excéntrica de la mandíbula, las trituradoras cónicas y rotativas. En algunos tipos de trituradoras, el mecanismo predominante es el impacto. En la etapa de molienda, los tres mecanismos están presentes. La compresión y la abrasión se producen cuando las partículas se comprimen entre los cuerpos de molienda y / o entre partículas más grandes. El impacto, por otro lado, ocurre en la zona donde caen las bolas. (Beraldo, 1987).

Las llamadas "leyes" de conminución relacionan el consumo específico de energía con la granulometría del suministro (alimentación). El interés en esta asociación se debió a los altos costos de los procesos de conminución. Sin embargo, ninguno de ellos es completamente satisfactorio, ya que la ineficiencia de los procesos conminutos es alta; es decir, solo una pequeña porción de la energía total está disponible para la ruptura de las partículas, mientras que el resto es absorbido por el propio equipo (Wills y Nappier-Munn, 2006).

La ecuación empírica (Ecuación 2) relaciona la energía consumida con la inversa de la variación del diámetro del producto elevada a una función de potencia (Beraldo, 1987)

$$dE = \frac{-K^{dx}}{x^n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

E = Energía aplicada (Kw-h/Ton)

X = Diámetro de la partícula (mm)

K = Constantes dependientes del material (Kw-h/Ton)

n = Constantes dependientes do processo cominutivo
(adimensional)

Schönert (1998) define la conminución interparticular como el resultado de una tensión del lecho interparticular, en la cual las partículas se tensan entre sí, siempre que el tamaño promedio de la partícula más grande sea menor que la longitud y la altura del lecho.

El campo de tensión aplicado a la partícula y su rotura están influenciados por el número de partículas vecinas (puntos de contacto), que varía de acuerdo con la distribución granulométrica y el relleno del lecho. Si la intensidad de la tensión es la misma en todos los puntos de la cama, existe una tensión interparticular homogénea. Sin embargo, esta condición a menudo no se logra en la práctica debido a la presencia del efecto de borde (Schönert, 1998).

El efecto de borde se debe al gradiente de presión que se forma a lo largo de los rodillos y a la ausencia de confinamiento en la región de sus bordes (Morrell et al., 1997). Este fenómeno determina la fracción relativamente gruesa que se ve con frecuencia en los productos HPGR.

Según Morley (2010), la falta de homogeneidad del perfil de distribución de presión está relacionada con el diseño del equipo, ya que el movimiento de los rodillos y el estado estable de las placas de las mejillas⁶ reducen el enclavamiento de las partículas.

Herman, Knorr y Whalen (2013) advierten que, además de que el producto de los bordes es más grueso que la región central de los rodillos, hay otros impactos negativos de esta ineficiencia, como el desgaste no uniforme de los rodillos y la reducción de la eficiencia energética del proceso, ya que, en el centro de los rodillos, la fuerza aplicada es mucho mayor que la necesaria para fragmentar las partículas.

Se han desarrollado alternativas para reducir el efecto de borde, como el uso de pasadores de recubrimiento diferenciados en la región de los bordes y un rodillo fijo equipado con bridas, lo que aumenta el enclavamiento de partículas en la región de los bordes. (Oliveira, 2015)

2.2.2.2. Dureza y grado de liberación de los minerales

La dureza del mineral puede determinarse bajo el índice de carga puntual (PLI), el cual se obtiene a través de la prueba de carga puntual (PLT), la cual es un test estándar en ingeniería geotécnica, que a su vez se puede relacionar con el valor de UCS (resistencia a la compresión uniaxial) y con la prueba Drop Weight (DWT), y que proporciona un índice para clasificar la dureza de la roca. Este índice ha sido ampliamente empleado en la actividad minera, principalmente en ingenieros geotécnicos. El test se usa comúnmente para calcular UCS (resistencia a la compresión no confinada o resistencia a la compresión uniaxial). Este test de carga puntual se encarga de cuantificar el

índice de carga puntual (I_s) y el índice de fuerza anisotrópica (f_a) de la muestra, que se puede aplicar a núcleos de perforación o partículas de forma irregular (Franklin, 1985).

Al igual que las actividades de conminución, la trituración solicita un elevado consumo de energía, lo que genera un alto impacto económico en el progreso del proyecto. El costo de energía que se necesita para la trituración se estima mediante experimentos que cuantifican la fuerza ($\text{kPa}\cdot\text{m} / \text{cm}$) que se necesita para triturar la muestra de roca con una máquina de impacto. Según la fuerza medida, se puede calcular el índice de trabajo de Bond (1957) o Work Index (W_i), que proporciona el medio de alimentación kilovatio-hora x ton ($\text{KW}\cdot\text{h} / \text{ton}$) (el material de partida Tamaño de partícula) al tamaño medio del producto (el tamaño de partícula del material final).

En términos de configuración del sistema, el rendimiento y las condiciones operativas de la trituradora de impacto muestran que el trabajo empírico y los modelos matemáticos relacionados han estudiado el grado de rotura de rocas bajo carga o impacto. Existe una relación proporcional directa entre el índice de trabajo de Bond (1957) o índice de trabajo (Work index) y la tensión de compresión (UCS), el módulo de Young (E) y la dureza del material.

Según Soares (2012), la dureza está directamente relacionada con la fuerza de unión de los átomos, iones o moléculas que forman la estructura, cuanto más fuertes sean las fuerzas de unión entre los átomos, más duro será el mineral. La dureza expresa la resistencia que ofrece su superficie lisa cuando se rasca. Se determina el grado de dureza, observando la relativa facilidad o dificultad con la cual un mineral es rayado por otro. Se eligió una serie de diez minerales comunes para servir como escala, y la dureza relativa de cualquier mineral se puede decir en comparación con la de los minerales de escala. Los siguientes minerales dispuestos en orden de dureza creciente comprenden lo que se conoce como la escala de dureza de Mohs.

El diamante es el mineral más duro, sus átomos de carbono están unidos al punto de que ningún otro mineral puede separarlos. El talco, por otro lado, es

el mineral menos duro en la escala, su estructura consiste en placas unidas tan débilmente que con la presión de los dedos es suficiente para hacer que una placa se deslice sobre la otra. Para la determinación de cualquier mineral, en relación con la escala de dureza ya presentada, es necesario averiguar cuál de estos minerales puede rayar o no, observando las marcas dejadas por un mineral en el otro, un rastro o simplemente una marca en el otro mineral. Siempre es aconsejable, en el proceso de determinar la dureza de un mineral, invertir el orden del proceso, entre dos minerales, el primero debe tachar al segundo, y el segundo debe tachar al primero.

El grado de liberación consiste en una expresión de la magnitud en que el circuito de chancado y/o molienda logra obtener la liberación de las partículas minerales y se obtiene mediante la utilización de estudios microscópicos, y debido a que es un parámetro determinante, su cuantificación debe basarse en una metodología técnica y científica bien fundamentada (Craig y Vaughman, 1997).

2.2.2.3. Etapas del Chancado

Sánchez, Betancur y Ocampo (2016) describen la conminución como el proceso de reducción del tamaño de partículas minerales mediante pulverización (trituration) y trituración, con el propósito de:

- Libera minerales dispersos.
- Fácil de manipular sólidos.
- Producir materiales de tamaño adecuado y tamaño definido.

El producto de la conminución es cuantificado mediante el Reduction Ratio o Razón de Reducción (R80) según se muestra en la ecuación 3:

$$R80 = \frac{\text{Tamaño del alimento (F80)}}{\text{Tamaño del producto (P80)}} \quad \text{Ecuación 3}$$

La mayoría de los minerales son materiales cristalinos que permanecen unidos por fuerzas físicas y/o enlaces químicos, que poseen gran cantidad de imperfecciones en su estructura. Ante la aplicación de fuerzas de compresión o de tracción, el material tiende a distribuir de manera uniforme estas fuerzas y fallar una vez se haya aplicado una fuerza igual o superior a la resistencia de los enlaces que unen a los átomos que constituyen al mineral, sin embargo, este generalmente se fractura a presiones mucho menores, principalmente debido a:

- Las imperfecciones que posee en su estructura producidas durante su formación u origen.
- El agrietamiento o fracturamiento que se puede producir a través del proceso de minado y manejo previo en el material.
- Generalmente las menas están constituidas por especies diseminadas de comportamiento mecánico heterogéneo.

En los minerales, las heterogeneidades trabajan como concentradores de esfuerzos, lo que hace que exhiban un comportamiento quebradizo, y su resistencia mecánica depende de su composición química y características de heterogeneidad.

Los minerales reúnen una fracción de la energía aplicada antes de que ocurran las grietas, y cuando las partículas se rompen la convierten en energía libre superficial. Esta energía libre es el resultado de la insatisfacción del enlace de cada átomo de la superficie formada por la fractura del mineral. Cuanto más elevada sea la energía libre superficial, mayor será la actividad de la superficie de las partículas para reaccionar con los reactivos externos, lo que puede promover el proceso de separación de las diferentes sustancias que constituyen el mineral.

La distribución de tamaños de partículas (granulometría) depende principalmente de la dureza y la composición mineralógica de las menas o

materiales, así como también del proceso de voladura, siendo este último proceso el principal factor de la adecuada fragmentación inicial de los minerales.

La conminución en las plantas de procesamiento de mineral es una secuencia de procesos de chancado y molienda.

El chancado reduce el tamaño de partícula del mineral (ROM) a tal punto que se pueda desarrollar la siguiente etapa de molienda, la cual se realiza hasta que el mineral y la ganga se encuentran sustancialmente separados. El proceso de chancado se realiza por la compresión del mineral contra una superficie rígida, o mediante el impacto contra superficies con un trazado de movimiento rígidamente limitado. El chancado es usualmente un proceso seco, y se realiza en varias etapas, en donde la razón de reducción, que se define como la relación entre el máximo tamaño de partícula entrante y el máximo tamaño de partícula que deja el chancador, va decreciendo en un rango de 3:1 a 6:1 en cada etapa. Todo proceso de conminución va acompañado de una etapa de clasificación de tamaño, que se define como una técnica para evaluar el rendimiento (eficiencia) de un proceso de conminución. (Sánchez, Betancur, y Ocampo, 2016)

Cabe destacar que se pueden usar más de dos etapas de conminución de las partículas en el chancado secundario si los minerales contienen una dureza elevada, o en casos especiales, en donde se prioriza maximizar la producción de mineral fino.

En toda planta de procesamiento mineral (conminución y concentración) los objetivos principales en cada etapa de chancado son:

- Facilitar el traslado de la mena hacia los equipos de molienda.
- Producir granulometrías adecuadas para los procesos posteriores.
- Liberar las especies minerales valiosas de la mena.
- Preparar el material para el procesamiento químico y gravimétrico.

- Aumentar la capacidad y eficiencia de los molinos.
- Elevar la continuidad en la operación

Entre las principales etapas de la conminución son:

- **Chancado Primario.** En esta etapa las rocas del mineral ROM pueden ser de un tamaño de 1,5 m de diámetro y son reducidas en el chancado primario a un tamaño cercano a los 10-20 cm en equipos de trabajo duro. (Sánchez et al., 2016).
- **Chancado Secundario.** Dicha etapa incluye la totalidad de las operaciones desde el recibimiento del producto del chancado primario hasta la disposición del producto final del chancado secundario, el cual tiene un diámetro promedio entre 0,5 y 2 cm (Sánchez et al., 2016)
- **Chancado Terciario y Cuaternario.** Se pueden usar más de dos etapas de conminución adicionales al chancado secundario si los minerales son de elevada dureza, o en casos especiales, donde es importante elevar considerablemente la producción de finos, hasta obtener productos entre 2 y 12 mm (Sánchez et al., 2016).

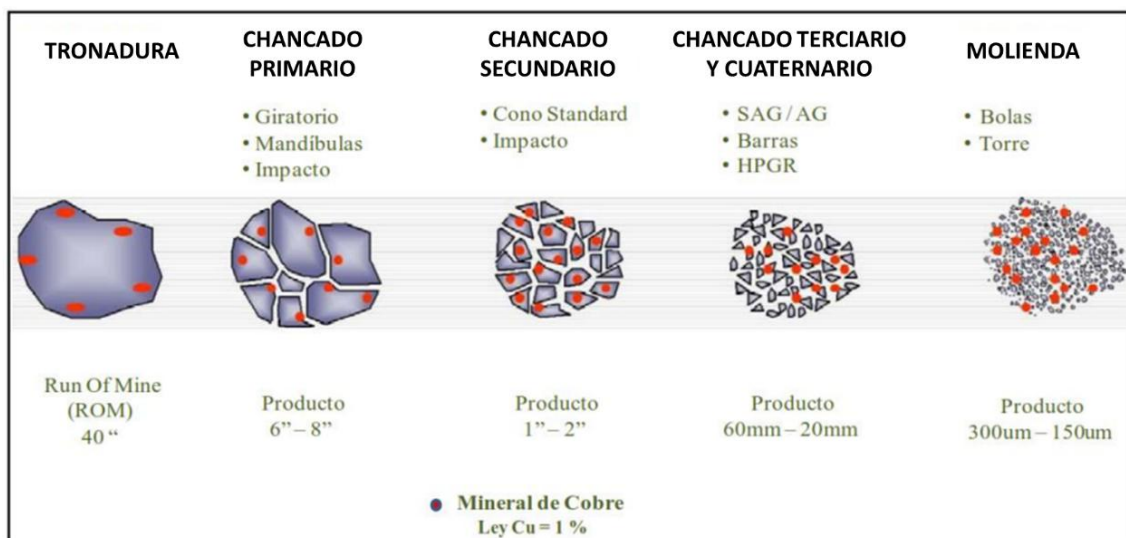


Figura 7. Etapas de la Conminución (Chancado y Molienda)

Fuente: Sánchez et al. (2016)

2.2.3. Modelos y Simuladores para Diseño de Equipos HPGR

Los modelos intentan simular un proceso real para entender el funcionamiento a través de una función o una serie de funciones. Los modelos pueden clasificarse según el método utilizado en la creación del modelo (fenomenología, modelo empírico o modelo mixto). Estos modelos constituyen la inteligencia y estructura descriptiva de la entidad de interés, además, debe considerar variables con significado físico y parámetros medibles. Por otro lado, un óptimo modelo puede predecir un error aceptable utilizando la menor cantidad de parámetros posible.

Por otra parte, el simulador se diferencia en el modelo utilizado para cada operación de la unidad. Su propósito principal es conocer el comportamiento del proceso luego de que se dan ciertos supuestos. En otras palabras, el simulador predice eventos basándose en supuestos previos y utiliza modelos que simplifican la realidad.

Para los sistemas de procesamiento de minerales, existe el software JKSimMet en el simulador existente, que se utiliza para el análisis estático y la simulación de circuitos utilizados para reducir y clasificar el tamaño de los minerales. Fue desarrollado conjuntamente por el Centro de Investigación de Minerales Julius Kruttschnitt (JKMRC) y la Universidad de Queensland. El software contiene varios modelos para la construcción en fábrica. Para equipos HPGR, JKSimMet se basa en un modelo desarrollado por Morrell y Daniel en 2004 (JKSimMet Manual V6, 2014).

A su vez, está la herramienta MolyCop Tools, que consta de una serie de hojas de cálculo desarrolladas en Microsoft Excel que se utilizan para caracterizar y evaluar la eficiencia del funcionamiento y diseño de los circuitos de conminución (chancado y molienda). La simulación de reducción de tamaño por HPGR de MolyCop Tools se basa en el modelo desarrollado por Torres y Casali en 2009 (Manual Moly-Cop Tools V3, 2012).

Otro software de simulación para plantas de procesamiento que utilizan tecnología HPGR es MODSIM (Modular Simulator for Ore Dressing Plants), desarrollado por Mineral Technology International, Inc. Esta herramienta consiste de un módulo principal que consta de bucles de búsqueda, ruptura de circuitos y cálculos secuenciales. Sin embargo, los modelos para las operaciones unitarias son independientes de este módulo. En este caso, el modelo utilizado para simular el funcionamiento de una HPGR es el desarrollado por Schneider (2009).

2.2.3.1. Descripción de los Modelos Predictivos para Diseño de Equipos HPGR

Como se mencionó anteriormente, el simulador para el correcto diseño de equipamiento y circuitos de procesamiento de minerales se basa en diversos modelos existentes. Debido que esta investigación se centra en la tecnología HPGR, describe el modelo más avanzado: Morrell et al. (1997), modelo Schneider-Austin (2009) y modelo Torres-Casali (2009).

Estos modelos son capaces de anticiparse y predecir (hasta cierto punto) la capacidad de procesamiento, el consumo de energía del equipo y la distribución del tamaño de los productos minerales con considerable precisión y exactitud. Por tanto, estos modelos se utilizan en los simuladores comerciales más populares.

El modelo mencionado anteriormente se basa en los siguientes principios:

- El flujo de partículas entre los rodillos se simula como un flujo pistón en un estado estacionario.
- El mecanismo principal de fractura es la tensión provocada por compresión de múltiples partículas.
- La fractura ocurre en el área comprendida entre el ángulo de compresión y la línea de contacto.

2.2.3.2. Resumen de los Parámetros de los Modelos Predictivos

Modelo de Morrell (1997)

Tabla 1.

Modelo de Morrell et al. (1997) – Resumen de Parámetros y Variables.

	Variables	Parámetros de ajuste	Parámetros del modelo	Parámetros del mineral
Modelo de Rendimiento	U		L, s_0	δ
Modelo de potencia	τ, U		D	
Modelo de granulometría	CEE	$k_{1P}, k_{2P}, k_{3P}, t_{10P}$ $k_{1B}, k_{2B}, k_{3B}, t_{10B}$ $k_{1C}, k_{2C}, k_{3C}, t_{10C}$	A, b	
Modelo de f		γ	L, s_0	

Donde: D = Diámetro del Rodillo (m); L = Largo del Rodillo (m); U = Velocidad periférica de los rodillos (m/s); τ = Torque (kNm); s_0 = Gap operacional (m); $k_{1P}, k_{2P}, k_{3P}, t_{10P}$ = Parámetros de ajuste en el proceso de quiebre en el prechancado; $k_{1B}, k_{2B}, k_{3B}, t_{10B}$ = Parámetros de ajuste en el proceso de quiebre en el borde; $k_{1C}, k_{2C}, k_{3C}, t_{10C}$ = Parámetros de ajuste en el proceso de quiebre en el centro de los rodillos; δ = densidad del producto (tm^3); CEE = Consumo específico de energía (KWh/t); γ = factor de separación (Parámetro de ajuste del modelo HPGR Morrell/Shi/Tondo).

Fuente: Pizarro (2015).

Modelo de Schneider-Austin (2009)

Tabla 2.

Modelo de Schneider-Austin (2009) – Resumen de Parámetros y Variables.

	Variables	Parámetros de ajuste	Parámetros del Modelo	Parámetros del mineral
Modelo de Rendimiento	u		α_c, D	θ_c, θ_g
Modelo de potencia	F_{sp}, u	p	L, D	
Modelo de granulometría	x_i, x_j, F_{sp}	$k_p, \alpha_p, \gamma_p, t_{10P}$ $k_c, \alpha_c, \gamma_c, t_{10C}$		

Dónde: D = Diámetro del Rodillo (m); L = Largo del Rodillo (m); U = Velocidad periférica de los rodillos (m/s); F_{sp} = Presión específica de molienda (kPa); α_c = Ángulo crítico; p = Factor de potencia específica adimensional de molienda; x_i, x_j = Tamaño de las partículas en la clase de tamaño "i" y "j" respectivamente; $k_p, \alpha_p, \gamma_p, t_{10P}$ = Parámetros del modelo de Schneider para ruptura por contacto directo de partículas; $k_c, \alpha_c, \gamma_c, t_{10C}$ = Parámetros del modelo de Schneider para ruptura por compresión de capa de partículas; θ_c, θ_g = Porosidad de la capa de Gap crítico y del Gap operacional, respectivamente.

Fuente: Pizarro (2015).

Modelo de Torres – Casali (2009)

Tabla 3.

Modelo de Torres y Casali (2010) – Resumen de Parámetros y Variables.

	Variables	Parámetros de ajuste	Parámetros del Modelo	Parámetros del mineral
Modelo de Rendimiento	U		L, s_0	δ
Modelo de potencia	F, U		α_{IP}	
Modelo de granulometría		$\alpha_{1SP}, \alpha_{2SP}, \alpha_{3SP}$ S_i^E, z_1, z_2 a	v_z, D	

Dónde: D = Diámetro del Rodillo (m); L = Largo del Rodillo (m); U = Velocidad periférica de los rodillos (m/s); F = Fuerza de compresión (kN); s_0 = Gap operacional (m); δ = Densidad del producto (t/m^3); α_{IP} = Ángulo de compresión interpartícula; v_z = Velocidad vertical de la capa de partículas (m/s); $\alpha_{1SP}, \alpha_{2SP}, \alpha_{3SP}$ = Parámetros de la función ruptura (Austin y Luckie); S_i^E = Tasa específica de ruptura para un tamaño i (Ton/KW-h); z_1, z_2 = Parámetros de la función selección (Herbst y Fuerstenau); a = Fracción de mineral producido por los bordes del rodillo.

Fuente: Pizarro (2015).

CAPÍTULO III.

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis general

H_G: La implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como el chancado cuaternario determinará el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país.

3.2. Hipótesis específicas

H_{E1}: La tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) producirá una granulometría de producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país.

H_{E2}: El uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementará la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país.

3.3. Identificación y operacionalización de variables

3.3.1. Variables Independientes

Variable independiente 1: Granulometría (F80)

Variable independiente 2: Work Index.

3.3.2. Variable Dependiente

Variable dependiente 1: Capacidad de molienda

3.3.3 Variables Controladas

Variable controlada 1: F80

Variable controlada 2: Humedad

Variable controlada 3: Gravedad específica

Variable controlada 4: Tipo de mineral

Variable controlada 5: Presión hidráulica de rodillos.

Variable controlada 6: Gap cero.

CAPÍTULO VI.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo de investigación

El trabajo investigación siguiente fue de tipo básica con un diseño no experimental, con enfoque mixto (cuali-cuantitativa).

Para Hernández, Fernández y Baptista (2006) en marco de una investigación teórica o básica, reconocida también pura o fundamental, pura o fundamental. “El planteamiento básico del diseño de teoría fundamentada es que las proposiciones teóricas surgen de los datos obtenidos en la investigación, más que de los estudios previos” (p. 80).

Las búsquedas y los avances en las investigaciones aportan y se caracterizan por su interés en la aplicación, en el uso y las consecuencias prácticas del conocimiento. En este sentido, Hernández et al. (2014) la definen como:

“Una investigación básica, un buen trabajo es aquel en el cual el equipo especialista ha puesto todo su empeño en la búsqueda de conocimiento o soluciones, manteniendo siempre la objetividad y la mente abierta para tomar las decisiones adecuadas” (p.125).

Palella y Martins (2010) apuntan que “una investigación no experimental se ejecuta sin manipular deliberadamente a la variable o al conjunto de variables. En este sentido, el investigador no reemplaza intencionalmente las variables”.

En cuanto al enfoque de la presente investigación, fue de carácter mixto (cuali-cuantitativa) por ende se cuantificarán los resultados obtenidos al aplicar los conocimientos mediante el cálculo de parámetros de fórmulas empíricas en

la investigación. Al respecto, Hernández et al. (2006) sostienen que “para probar las hipótesis, el enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos, para luego ser analizados mediante mediciones numéricas y análisis estadísticos para determinar patrones o modelos de comportamiento para probar las teorías”. Por otro lado, la investigación cualitativa “Proporciona profundidad a los datos, dispersión, riqueza interpretativa, contextualización del ambiente o entorno, detalles y experiencias únicas. También aporta un punto de vista “fresco, natural y holístico” de los fenómenos, así como flexibilidad” (p.26).

Desde la perspectiva de recolectar información sobre conceptos o variables relacionadas con ella, la investigación puede ser recolectada de forma independiente o colectiva, por lo que también puede ser considerada como una investigación descriptiva. Es decir, no precisa cómo ocurre la relación entre las variables medidas entre sí. En este caso, el propósito del investigador es describir fenómenos, situaciones, situaciones y eventos, describiendo en detalle cómo se ven y cómo se comportan.

Por otro lado, el diseño de la investigación es inferencial porque trata de decidir si acepta o rechaza una hipótesis, porque es importante determinar si los hechos o eventos son importantes. El informe de investigación se utiliza para hacer inferencias a partir de una muestra de población basada en datos recopilados y analizados previamente.

En cuanto al corte de la investigación será transversal o transeccional, la cual se caracteriza “porque la recolección de datos se efectúa en un solo momento, en un tiempo único, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado” (Hernández et al., 2006)

En el presente trabajo investigativo el método utilizado fue el hipotético, analítico y deductivo.

En este sentido Bernal (2010) considera que el método es hipotético y deductivo, porque consiste en un procedimiento que parte de unas aseveraciones en calidad de hipótesis e intenta refutar o falsificar las hipótesis

planteadas, derivando conclusiones de ellas que deben ser confrontadas con los hechos.

Por otra parte, con el método analítico en el presente estudio se logró encontrar observaciones y análisis para obtener conclusiones confiables. De este mismo modo Bernal (2010) menciona lo siguiente: “Este proceso cognoscitivo consiste en descomponer un objeto de estudio, separando cada una de las partes del todo para estudiarlas en forma individual” (p.60).

4.2. Unidad de análisis

La técnica a utilizar en la investigación fue la observación. En este sentido, Bernal (2010) señala que “la observación, como técnica de investigación científica es un proceso riguroso que permite conocer, de forma directa, el objeto de estudio para luego describir y analizar situaciones sobre la realidad estudiada” (p.257).

La observación se efectuó directamente al proceso de ejecución, en el Distrito de Ilabaya, ubicado en la parte Nor-Oeste de la Provincia de Jorge Basadre. El Distrito de Ilabaya se encuentra ubicado geográficamente entre las coordenadas 17° 04' 0" a 17° 36' 0" de Latitud Sur y 70° 21' 0" a 70° 46' de Longitud Oeste, la cual presenta una altitud variable entre 670 a 5000 m.s.n.m. (7). Limita por el Este, con el Distrito de Curibaya (Candarave), por el Norte con la región Moquegua y los distritos de Camilaca, Cairani y Huanuara (Candarave), por el Oeste, con la región Moquegua, y por el Sur, con el Distrito Inclán (Tacna) y el Distrito de Locumba (Jorge Basadre).

De esta forma, la observación permite registrar directamente los datos de las actividades realizadas dentro de la metodología del chancado de minerales, tomando nota por medio de las fichas de observación, reportando los distintos análisis observados, e identificando las posibilidades de continua mejora en los procesos del programa y de influencia en las comunidades vecinas.

Por otro lado, se realizó una revisión sistemática de la documentación relacionada con la temática planteada que permitió establecer comparaciones de los diferentes modelos de implementación de equipos de tecnologías HPGR para disminuir el porcentaje de granulometría para obtener así un mayor recobro del mineral, y sus respectivas disminuciones de costos operativos, describiéndose una optimización de los procesos mineros. Adicionalmente, se evaluaron las limitaciones que impiden el cumplimiento, así como la medición del nivel general de actividad, valoración, balance y grado de influencia de las tecnologías HPGR.

4.3. Población de estudio

En cuanto a la población o campo de investigación, Hernández et al. (2014, p. 174) señalaron que esto se refiere a "una colección de todos los casos que cumplen con una especificación específica". Con base en este método, se puede afirmar que la población se compone de actividades relacionadas con la etapa de fragmentación. Es decir, es adecuado para el proceso de trituración de minerales de alta dureza, será factible utilizar esta tecnología

4.4. Muestra

Hernández et al. (2014) conceptualiza a la muestra como un "subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de ésta" (p.173). En este caso, la muestra de la investigación estuvo constituida por las actividades relacionadas con el chancado cuaternario.

4.5. Selección de muestra

El muestreo o la selección de la muestra es “el proceso de obtención de una porción representativa de la población, donde las características principales deben ser objetivas y tratar de ser un reflejo lo más fiel posible. De esta forma, los resultados adquiridos en la muestra permiten que se pueda generalizar con los demás elementos que forman parte de la población” (Carrasco, 2009)

Con base en lo anterior, los criterios que se utilizan en el muestreo indican cuales son los elementos básicos a considerar, lo cual tiene como finalidad que su conformidad pueda hacer que los objetivos establecidos tengan respuestas claras. De esta forma, se consideran los siguientes criterios:

- Actividades relacionadas con el Chancado Cuaternario (Inclusión)
- Actividades primarias de explotación (Exclusión)

4.6. Técnicas de recolección de datos

El presente trabajo de investigación empleó la técnica de la observación y revisión documental de trabajos previos para el acopio de la información. Las técnicas de adquisición de datos pueden ser varias. En este caso, para a investigación cuantitativa se utilizaron registros de datos estadísticos, muestras estandarizadas, sistemas de mediciones en trabajos previos, entre otros. Por otro lado, en la parte cualitativa, se revisaron biografías, revisión de archivos, observación, entre otros.

4.7. Análisis e interpretación de la información

Hernández et al. (2006) apuntan que “una vez definidos el diseño de la investigación y su respectiva población, se procede la respectiva recolección de datos sobre las variables que serán objeto de estudio, en la cual se desarrollará

un instrumento validado previamente por expertos, que se aplicará para obtener las respuestas respectivas, las cuales serán registradas posteriormente para realizar el análisis de los resultados obtenidos”.

En el progreso de esta investigación, se prestó especial atención a la descripción de la efectividad de la tecnología HPGR implementada por la actividad de trituración de cuatro etapas. En primer lugar, se centra en la búsqueda y recopilación de información, considerando los antecedentes y aportes teóricos nacionales e internacionales, así como los antecedentes de investigación de las variables involucradas en la investigación.

En una investigación científica, es esencial hacer algunas consideraciones sobre los aspectos éticos. Para ello, nos concentramos en la responsabilidad del consentimiento y los derechos de autor, considerando la comunicación y redacción de las citas de los autores, así como la información publicada por la universidad, siguiendo los pasos metodológicos que emanan de la misma.

4.8. Etapas de la investigación

La presente investigación en su etapa inicial consideró los fundamentos técnicos de estudios e importante información de la tecnología de chancado con rodillos de alta presión (HPGR), que incluyó todo lo relacionado con los ensayos de laboratorio, modelos predictivos y evaluación de escenarios para el diseño de los equipos HPGR.

Esta investigación se subdividió en tres etapas principales, cada una de ellas fue estructurada de manera tal que se le pudiera dar respuesta a los objetivos que fueron planteados al inicio de la presente investigación. Finalmente, al dárseles respuestas a los objetivos planteados, se contrastaron las hipótesis formuladas.

4.8.1. Etapa 1. Determinar cómo el uso de HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario

Para el cumplimiento del objetivo específico 1: *Determinar cómo el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país*; para ello, se efectuaron ensayos de laboratorio o pruebas piloto con equipos HPGR a nivel semi-industrial (también conocidas como prueba REGRO).

Para realizar los ensayos de laboratorio o pruebas piloto HPGR se deben seleccionar una o varias muestras de la mena o roca de mineral que se quiere procesar (en general son rocas contenedoras mineral metálico, ya sea pórfidos, andesitas, cobre, hierro u oro), las cuales se envían a los laboratorios de las empresas que fabrican y comercializan los equipos HPGR. Generalmente las pruebas las realiza el fabricante de los equipos HPGR que se tienen planteado instalar. En este estudio se seleccionaron 3 muestras.

Antes de efectuar las pruebas piloto HPGR, a las muestras seleccionadas se les debe efectuar una evaluación física, que consisten en identificar su distribución granulométrica, la densidad absoluta y relativa (gravedad específica), el Work Index (WI) o índice de trabajo y el Drop Weight Test (DWT) o prueba de resistencia a la rotura por impacto.

Las pruebas piloto HPGR consisten en procesar las muestras a diferentes presiones, con un equipo HPGR en ambiente controlado (monitoreado con sensores y con control de parámetros), para así evaluar el comportamiento, a partir de los siguientes parámetros: torque (presión de torsión o de rotación de los rodillos) y velocidad de operación de los rodillos, capacidad específica, consumo de energía específico y proporción de finos producidos. Lo recomendable es realizar un mínimo de 2 pruebas para determinar si el uso de los equipos HPGR proporcionan los resultados demandados.

4.8.1.1. Evaluación Física de las Muestras

Para cada una de las muestras seleccionadas de rocas o minerales de interés se evaluaron los siguientes parámetros:

- Distribución Granulométrica de las Muestras
- Densidad Absoluta y Relativa (Gravedad Específica) de las Muestras.
- Determinación del Work Index (WI) o Índice de Trabajo de las Muestras antes de las Pruebas Piloto HPGR

En la evaluación física de las muestras hay que resaltar la importancia de que además de determinar la distribución granulométrica del material, se debe tratar de estimar la dureza de los minerales, para poder estimar el grado de liberación que pueden presentar dichas partículas minerales y el trabajo necesario que hay que efectuar para poder liberarlas. El grado de liberación de un mineral es un parámetro que debe basarse en una metodología técnica y científica.

La dureza de un mineral puede determinada a partir varios ensayos, como el Índice de Carga Puntual (PLI), que se obtiene a través de las Pruebas de Carga Puntual (PLT) y que asimismo puede ser relacionada con los valores de UCS (Resistencia a la Compresión Uniaxial) y los resultados de la prueba de caída de peso o Drop Weight Test (DWT). Otro parámetro que permite cuantificar la dureza de un mineral es el índice de trabajo o Work Index (Wi), que se refiere a los kilovatios-hora x tonelada (KW-h/Ton) necesarios para realizar la trituración o chancado. Cabe mencionar que, el parámetro del Drop Weight Test (DWT) definido por Morrell (1997) no pudo ser evaluado, porque al momento de efectuar esta investigación no se encontraron datos disponibles sobre estos ensayos para los minerales en estudio.

El Drop Weight Test (DWT) simplemente implica dejar caer un peso desde una altura predeterminada sobre la roca para que se rompa. Los productos de rotura de todas las rocas o partículas para cada combinación de tamaño / energía se recogen y dimensionan. La distribución de tamaño producida se

normaliza con respecto al tamaño de partícula original. Un único valor, t_{10} , se utiliza para caracterizar la distribución del tamaño. El valor t_{10} es el porcentaje más fino que 1/10 del tamaño de partícula original.

El mineral se caracteriza por la rotura de impacto por dos parámetros: A y b. Se ha encontrado que el valor de la multiplicación de estos parámetros, es decir el valor $A * b$, tiene la mejor correlación con la resistencia del mineral a la rotura por impacto. Los valores más bajos (≤ 38) indican minerales más duros mientras que los valores más altos (≥ 67) indican minerales más suaves. La siguiente tabla muestra los rangos típicos de Drop Weigh Test (DWT) y el tipo de trituración o chancado que se recomienda utilizar.

Tabla 4.

Rangos Típicos de Drop Weigh Test (DWT) y el tipo de tecnología de trituración o chancado que se recomienda utilizar.

Parámetro	Muy Duros		Moderadamente Duros			Muy Suaves	
$A * b$	30	30-38	38-43	43-56	56-67	67-127	127
t_{10}	0.24	0.24-0.35	0.35-0.41	0.41-0.54	0.54-0.65	0.65-1.38	1.38
Tecnología Recomendada	HPGR			AG / SAG			

Fuente: Elaboración Propia.

Distribución Granulométrica de las Muestras.

La distribución granulométrica de las 3 muestras consideradas en este estudio, antes de efectuar las pruebas piloto HPGR, se obtuvo mediante el tamizado de las mismas, utilizando una serie de tamices que van desde tamaños de 10 cm (100 mm) hasta 0,02 mm (200 micras). Los resultados de estos tamizados se plotearon en una gráfica semi-logarítmica, donde el tamaño de partículas (en mm) se coloca en el eje de las abscisas (X), mientras que el porcentaje acumulado pasante de los tamices se coloca en el eje de las ordenadas (Y), tal y como se muestra en la Figura 8. Se le dio especial énfasis al tamaño de partículas del 80% de acumulado pasante (P80), ya que este valor se compara directamente con el valor del 80% de acumulado pasante (P80) del producto de la prueba piloto HPGR.

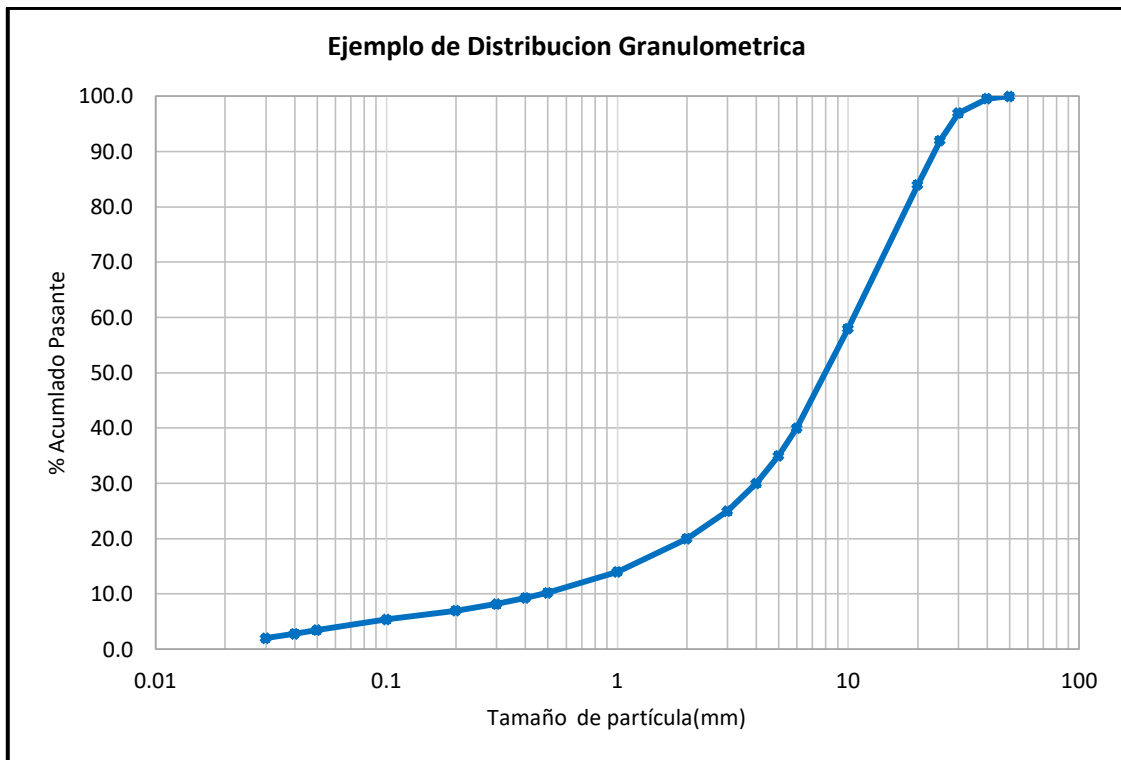


Figura 8. Ejemplo de Distribución Granulométrica.

Fuente: Elaboración Propia.

Densidad Absoluta y Relativa (Gravedad Específica) de las Muestras.

Se midió en laboratorio la densidad absoluta de las muestras consideradas en este estudio. Esta densidad se expresa en (gr/cc). De la misma manera, se determinó la densidad relativa, conocida también como gravedad específica, referida a la densidad promedio del agua (1 gr/cc), la cual es adimensional.

Determinación del Work Index de Bond (WI) o Índice de Trabajo de las Muestras antes de las Pruebas Piloto HPGR

El Work Index (WI) o Índice de Trabajo de Bond (1957) es una medida de la dureza o resistencia que presenta la muestra de roca o mineral a ser molido, es decir, indica la cantidad de trabajo o energía que debe ser empleada para molerlo. Con la muestra 2 se determinó en laboratorio el Work Index antes y después de efectuar las pruebas piloto HPGR.

Dado que el Work Index (Wi) es una variable que depende del material y del equipo de trituración, es conveniente utilizar un mecanismo de destrucción similar al equipo utilizado para la determinación al obtener este valor. Por ejemplo, se puede realizar mediante prueba de impacto (simulación de la etapa de trituración de material), prueba de molino de barras y prueba de molino de bolas. Los procedimientos estándar de laboratorio para la obtención del índice de trabajo (Wi) en la etapa de trituración incluyen principalmente los siguientes:

- Realizar la preparación inicial del material, considerando partículas de un tamaño comprendido entre 2 y 3 pulgadas.
- Colocar parte de este material inicial entre 2 péndulos iguales pero opuestos (cada uno con un peso de 30 libras), que se pueden elevar a diferentes alturas de descenso de manera controlada.
- Realizar una prueba o test de impacto sobre el material, donde el tamaño mínimo de la roca se dirige a la dirección del impacto generado por los dos péndulos, el impacto irá aumentando gradualmente hasta que el material requerido se rompa.

El Índice de Trabajo o Work Index (Wi) se calcula de un promedio de 10 test exitosos, mediante la siguiente relación mostrada en la ecuación 4:

$$Wi = \frac{2.59 S}{Ds} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Wi: es el índice de trabajo del material, aplicable a chancado (Kw-h/Ton)

Ds: es la gravedad específica del sólido

S: es el esfuerzo del impacto aplicado, necesario para fracturar el material (lb-pie/pulg de espesor de la roca).

4.8.1.2. Evaluación de los Resultados de las Pruebas Piloto HPGR

Para cada prueba piloto HPGR se evaluaron los siguientes parámetros:

- Distribución Granulométrica del Producto de las Pruebas Piloto HPGR, Proporción de Finos Producidos y Razón de Reducción (Eficiencia del Chancado).
- Efecto del Torque y la Velocidad de Operación de los Rodillos sobre la Distribución Granulométrica del Producto.
- Efecto del Torque sobre Capacidad Específica y el Consumo de Energía Específico.
- Relación entre el Consumo de Energía Específico y la Razón de Reducción.
- Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de las muestras después de las Pruebas Piloto HPGR.

Distribución Granulométrica del Producto de las Prueba Piloto HPGR para la Muestra-2

La distribución granulométrica de las 3 muestras consideradas en este estudio, después de efectuar las pruebas piloto HPGR, se obtuvo mediante el tamizado de las mismas, utilizando una serie de tamices que van desde tamaños de 10 cm (100 mm) hasta 0,02 mm (200 micras). Los resultados de estos tamizados se plotearon en una gráfica semi-logaritmica, donde el tamaño de partículas (en mm) se coloca en el eje de las abscisas (X), mientras que el porcentaje acumulado se coloca en el eje de las ordenadas (Y).

Efecto del Torque y la Velocidad de Operación de los Rodillos sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2

El torque (presión de rotación o torsión) y la velocidad periférica de los rodillos en los equipos HPGR son las únicas modificaciones que pueden alterarse durante la operación de los mismos. El torque es controlado por el espacio (gap) que el operador configura entre ambos rodillos, en términos generales, al disminuir dicho espacio (gap) aumenta el torque (presión de rotación), el mismo se expresa en Newtons x milímetro cuadrado (N/mm²),

Mientras que la velocidad periférica se relaciona a la velocidad de rotación de los rodillos que configura el operador y tiene su expresión en metros x segundo (m/s). Los productos de las pruebas piloto permitieron valorar el efecto de ambas variables sobre la distribución granulométrica de las muestras consideradas en este estudio, luego de efectuar las pruebas piloto HPGR.

Efecto del Torque sobre Capacidad Específica y Consumo de Energía Específico

La capacidad específica determina la capacidad del equipo por metro lineal de rodillo y se expresa en toneladas x hora x m³ (Ton/h-m³). Mientras que consumo de energía específico se refiere a la cantidad de energía que se consume por tonelada de material chancado y expresa en Kilovatios - hora x tonelada (Kw-h/Ton). En términos generales, al incrementarse el torque (presión de rotación) disminuye la capacidad específica, pero aumenta el consumo de energía específico.

Relación entre la Razón de Reducción (R80) y el Consumo de Energía Específico

Según la teoría desarrollada por Bond (1957), que correlaciona el consumo de energía junto con el índice de reducción, se puede determinar si existe alguna correspondencia entre las dos variables en el producto piloto HPGR. El factor clave en el consumo de energía de los equipos HPGR es la potencia requerida para hacer girar el rodillo con un cierto par (presión de rotación) sobre el material compactado (mineral).

Determinación del Work Index (WI) o Índice de Trabajo de las Muestras después de las Pruebas Piloto HPGR

Con la Muestra-2 se determinó en laboratorio el Work Index (Wi) antes y después de efectuar las pruebas piloto HPGR.

4.8.2. Etapa 2. Identificar como el uso de HPGR garantiza la capacidad de mineral requerido

Para el cumplimiento del objetivo específico 2: *Identificar como el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementa la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país*, luego de obtener los datos experimentales con los ensayos de laboratorio o pruebas piloto HPGR, se desarrolló un modelo predictivo y se efectuaron simulaciones (evaluación de escenarios) para el diseño de los equipos HPGR, con el fin de identificar si esta tecnología puede garantizar la capacidad de mineral requerido.

4.8.2.1. Desarrollo del Modelo Predictivo para Diseño de HPGR

Un modelo óptimo o satisfactorio para un equipo de conminución considera los siguientes 3 elementos:

- 1) La capacidad del mineral de tratamiento,
- 2) La potencia consumida en el proceso.
- 3) La granulometría de producto.

Al analizar la configuración del equipo HPGR, se desarrolla un diagrama de cuerpo libre sobre el cual se deducirán las expresiones para la potencia requerida y la capacidad de tratamiento

El modelo predictivo que se utilizó en este estudio corresponde al desarrollado por Torres-Casali (2009), que está basado en el modelo de Morrell et al. (1997). (1997). Se ha incluido el efecto de pre-chancado de partículas sobre cierto tamaño en ambos modelos. No obstante, en el modelo de Torres-Casali (2009) se definió una nueva formulación para la estimación predictiva de las diferencias de granulometría a lo largo del rodillo (bordes y centro).

En el modelo de Torres-Casali (2009), las ecuaciones se derivan de los fenómenos físicos que controlan el funcionamiento del equipo: (King, 2000)

1. En el modelo capacidad de tratamiento: balance de masa
2. En el modelo de consumo de energía: ecuaciones de la física newtoniana
3. En el modelo de granulometría: balance poblacional

En el área de reducción de tamaño del dispositivo HPGR, el flujo de materiales o partículas está restringido por las superficies de los rodillos y se modela como un flujo de pistón. Muchos fabricantes e investigadores han aceptado esta suposición, que constituye el estándar principal para modelar circuitos que utilizan equipos HPGR. De manera similar, el modelo de balance de población se utiliza para aproximar el problema de la estimación de granularidad. Este método ha generado los modelos de molienda que se utilizan en la actualidad (Torres, 2010).

El modelo desarrollado por Torres-Casali (2009) propone un nuevo método para predecir la granularidad. La atención se centra en el fenómeno de controlar el funcionamiento del equipo, no en el ajuste del modelo anterior. Por ejemplo, la potencia está relacionada con el cálculo del análisis del tamaño de partículas. Por otro lado, es diferente de Morrell et al. (1997) La zona de aplastamiento se define por el mecanismo de fractura observado en el equipo.

Se enfatiza el hecho de que, en comparación con los 15 parámetros de Morrell et al. (1997), el modelo de análisis de tamaño de partículas de Torres-Casali (2009) solo muestra 7 parámetros que necesitan ser ajustados (ver Tabla 5). Un buen modelo debe ser simple y debe utilizar la menor cantidad de parámetros posible para simular la operación real, lo que ayuda a reducir el costo computacional en el proceso de ajuste del modelo. Asimismo, al incrementar el número de parámetros utilizados, existe el riesgo de generar modelos que solo se apliquen a situaciones específicas.

Tabla 5.

Modelo de Torres-Casali (2009) – Resumen de parámetros y variables que fue utilizado en esta investigación.

	Variables	Parámetros de ajuste	Parámetros del Modelo	Parámetros del mineral
Modelo de Rendimiento	U		L, s_0	δ
Modelo de potencia	F, U		α_{IP}	
Modelo de granulometría		$\alpha_{1SP}, \alpha_{2SP}, \alpha_{3SP}$ S_i^E, z_1, z_2 a	v_z, D	

Dónde: D = Diámetro del Rodillo (m); L = Largo del Rodillo (m); U = Velocidad periférica de los rodillos (m/s); F = Fuerza de compresión (kN); s_0 = Gap operacional (m); δ = Densidad del producto (t/m^3); α_{IP} = Ángulo de compresión interpartícula; v_z = Velocidad vertical de la capa de partículas (m/s); $\alpha_{1SP}, \alpha_{2SP}, \alpha_{3SP}$ = Parámetros de la función ruptura (Austin y Luckie); S_i^E = Tasa específica de ruptura para un tamaño i (Ton/KW-h); z_1, z_2 = Parámetros de la función selección (Herbst y Fuerstenau); a = Fracción de mineral producido por los bordes del rodillo.

Fuente: Pizarro (2015).

El análisis de sensibilidad de los parámetros permitió identificar que los parámetros α_{1SP} , α_{2SP} y z_1 pueden considerarse constantes durante el proceso de ajuste, ya que tienen una pequeña influencia en el cambio total del error. Esto reduce el número de parámetros del modelo en determinadas condiciones de funcionamiento.

Para la ejecución de las rutinas anteriormente mencionadas, fue necesario programar las ecuaciones en una plataforma computacional. Para esto se eligió el software **Microsoft Excel**, pues es el software de hoja de cálculo más utilizado en el mercado. Además, asegúrese de que las rutinas (simulación numérica o dinámica) utilizadas para evaluar la solución se ejecuten en la mayoría de los sistemas. Las ventajas del software **Microsoft Excel** se utilizan junto con el complemento **Solver**, ya que puede resolver el problema del ajuste de parámetros y puede utilizar la herramienta **Visual Basic para Aplicaciones** para programar el código del modelo.

4.8.2.2. Simulación o Evaluación de Escenarios para el Diseño de Equipos HPGR

Después de realizadas las pruebas de laboratorio se evaluó la instalación de equipos HPGR en la cuarta etapa del chancado (chancado cuaternario) de una empresa minera al sur del país, utilizando el modelo predictivo para diseño de HPGR detallado en el paso anterior. Para tal fin, se efectuó la simulación o evaluación de dos escenarios:

1. HPGR en circuito abierto, con posterior molienda en molinos de barras y molinos de bolas
2. HPGR en circuito cerrado, con pre-zarandeo y posterior alimentación a molinos de bolas (prescindiendo de los molinos de barras).

4.8.3. Etapa 3. Determinar la implementación de HPGR como el chancado cuaternario incide en la capacidad de molienda

El objetivo general de esta investigación: *Determinar como la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país*, se cumple o lleva a cabo integrando los resultados de los objetivos específicos 1 y 2 en una propuesta de instalaciones de equipos de chancado cuaternario (estudio de pre-factibilidad), considerando varias alternativas, tanto tecnología HPGR como otras tecnologías convencionales y no convencionales.

4.8.3.1. Propuesta de Instalación de Equipos de Chancado Cuaternario

Los ensayos de laboratorio y la simulación o evaluación de escenarios realizadas sirvieron como fundamento técnico para elaborar una propuesta o proyecto de instalación de los rodillos de alta presión (HPGR) en la cuarta

etapa de chancado de una empresa minera al sur del país. Para poder analizar comparativamente la tecnología HPGR, se consideraron también otras tecnologías convencionales y no convencionales.

Los componentes principales del proyecto se describen a continuación:

- Preparación del sitio.
- Plantas de trituración cuaternaria.
- Tolvas de pre-finos.
- Repotenciación de fajas.
- Facilidades.

4.8.3.2. Evaluación Técnica de la Propuesta de Instalación de Equipos de Chancado Cuaternario

La evaluación y comparación de las alternativas consideradas en el estudio de pre-factibilidad permitieron identificar cuáles de las mismas son las más adecuadas para efectuar una propuesta de instalación de equipos de chancado cuaternario.

4.8.4. Etapa 4. Contrastación de hipótesis

En la última etapa de la investigación se contrastan las hipótesis efectuadas por el investigador y las hipótesis nulas, tomando en consideración las evidencias y datos aportados por esta investigación.

CAPÍTULO V.

PRESENTACIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los datos y análisis de resultados que permitieron el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación.

5.1. Determinar cómo el uso del HPGR logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario

Para el cumplimiento del objetivo específico 1: *Determinar cómo el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país*, se efectuaron ensayos de laboratorio o pruebas piloto con equipos HPGR.

5.1.1. Evaluación Física de las Muestras

Para cada una de las tres (3) muestras seleccionadas de rocas o minerales de interés se evaluaron los siguientes parámetros:

- Distribución Granulométrica de las Muestras
- Densidad Absoluta y Relativa (Gravedad Específica) de las Muestras.
- Work Index (WI) o Índice de Trabajo de las Muestras antes de las Pruebas Piloto HPGR

5.1.1.1. Distribución Granulométrica de las Muestras.

En la Figura 9 se aprecia la distribución granulométrica de tres muestras ensayadas en este estudio. Las muestras 1, 2 y 3 antes de la prueba piloto HPGR presentaron un P80 de 12 a 16 mm.

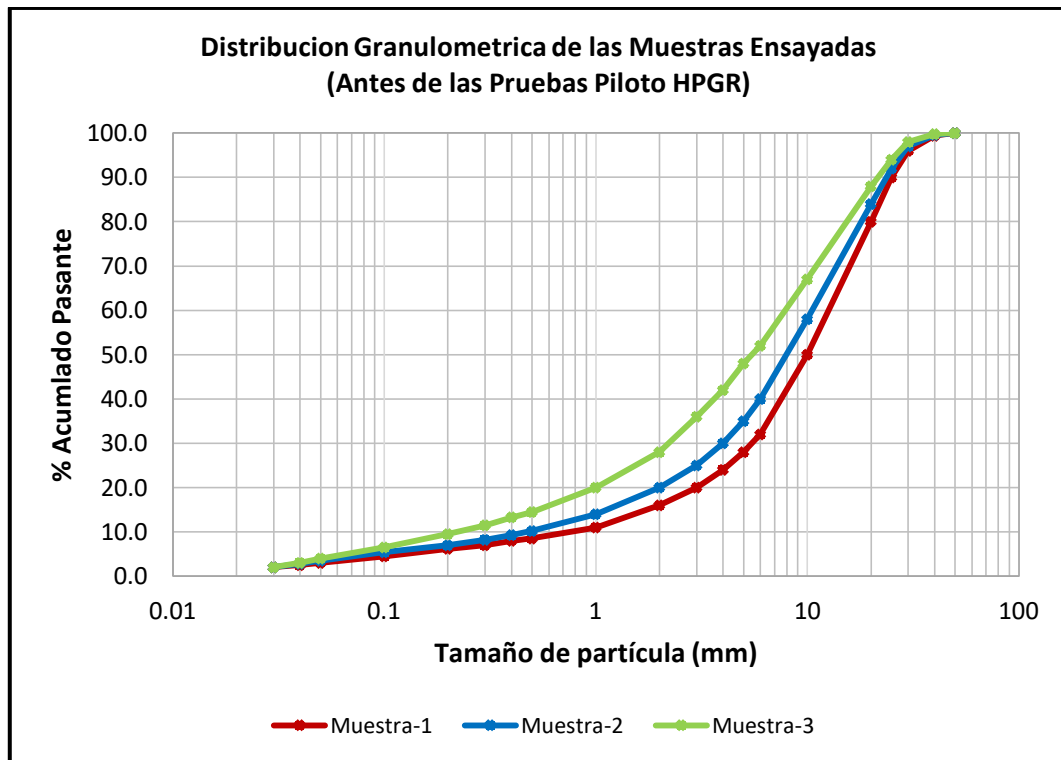


Figura 9. Distribución Granulométrica de las muestras ensayadas.
Fuente: Elaboración Propia.

5.1.1.2. Densidad Absoluta y Relativa (Gravedad Específica) de las Muestras

La densidad absoluta de las 3 muestras fueron las siguientes: Muestra-1 con 2,80 gr/cc, Muestra-2 con 2,82 gr/cc y Muestra-3 con 2,81 gr/cc. Así mismo, las densidades relativas o gravedades específicas con relación a la densidad del agua (1 gr/cc) son 2,80, 2,82 y 2,81 respectivamente

5.1.1.3. Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de las Muestras antes de las Pruebas Piloto HPGR

Con la Muestra-2 se determinó en laboratorio el Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de Bond (1957) antes y después de utilizar el equipo HPGR. Se determinó que antes de la prueba piloto HPRG la muestra 2 presentó un Work Index (Wi) de 15,1 KW-h/TC. Estudios previos afirman que cuando el Work Index (Wi) se incrementa sobre los 15 KW-h/TC la capacidad de molienda es

afectada de manera considerable, disminuyendo a valores menores de 60,000 toneladas por día. En la Figura 10 se puede visualizar que los valores de Work Index (Wi) mayores a 15 KW-h/TC impactan considerablemente en el tonelaje de mineral procesado. (Figura 10)

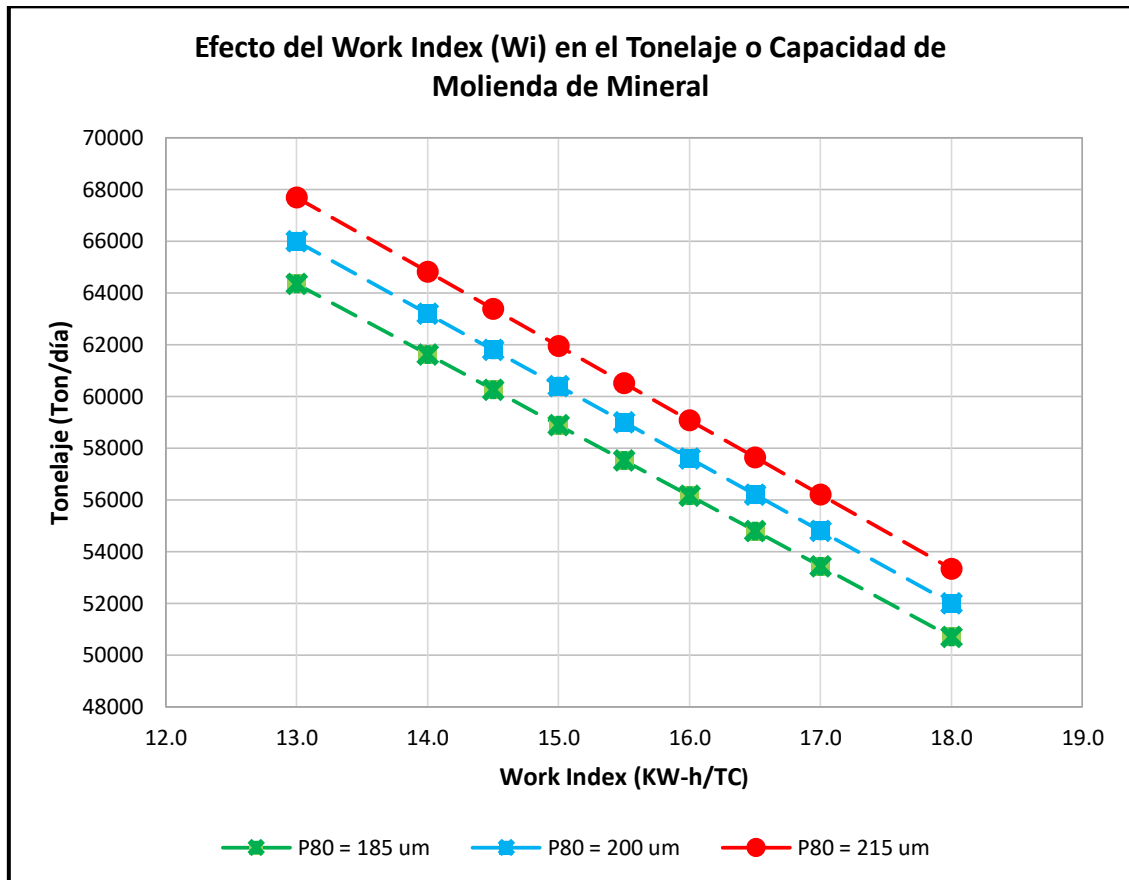


*Figura 10.*Efecto del Work Index (Wi) en el Tonelaje o Capacidad de Molienda de Mineral.

Fuente: Elaboración Propia.

5.1.2. Resultados de las Pruebas Piloto HPGR

Para cada prueba piloto HPGR se evaluaron los siguientes parámetros:

- Distribución Granulométrica del Producto de las Prueba Piloto HPGR para la Muestra-2
- Efecto del Torque y la Velocidad de Operación de los Rodillos sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2

- Efecto del Torque sobre Capacidad Específica y el Consumo de Energía Especifico
- Relación entre el Consumo de Energía Especifico y la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2
- Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de las muestras después de las Pruebas Piloto HPGR.

5.1.2.1. Distribución Granulométrica del Producto de las Prueba Piloto HPGR para la Muestra-2

La Figura 11 permite apreciar la distribución granulométrica del producto de la prueba piloto HPGR para la Muestra-2, efectuada a diferentes valores de torque (R1, R2, R3).

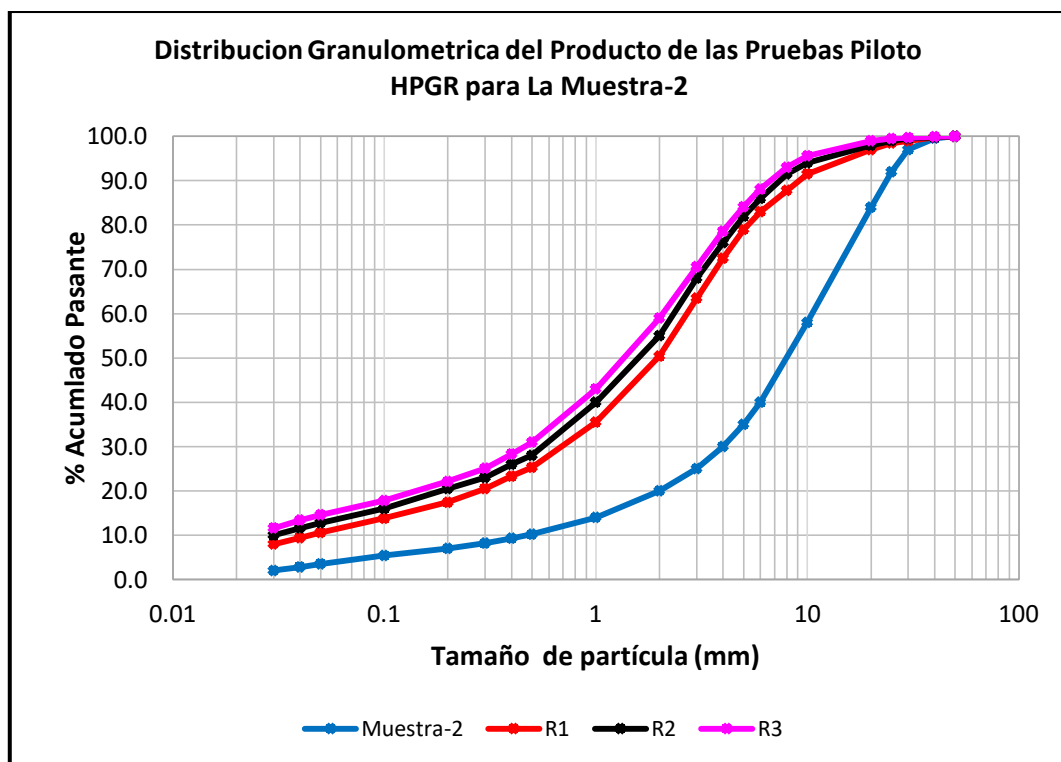


Figura 11. Distribución granulométrica del producto de las pruebas piloto HPGR para la Muestra-2.

Fuente: Elaboración Propia.

5.1.2.2. Efecto del Torque y la Velocidad de Operación de los Rodillos sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2

La Tabla 6 muestra los valores obtenidos de P80 y razón de reducción (R80) para varios valores de torque (presión de torsión de los rodillos) y velocidad periférica de operación de los rodillos, de la prueba piloto HPGR para la Muestra-2, efectuada a diferentes valores de torque (R1, R2, R3).

De la misma manera, los resultados evidencian que la razón de reducción de la Muestra-2, lo que indica que el proceso de conminución o chancado fue efectivo (mayor a 2).

Tabla 6.

Datos de P80 y Razón de Reducción (R80) obtenidos de la Prueba Piloto HPGR para la Muestra-2.

Muestra de Entrada	Producto de Salida	Torque de Operación (N/mm ²)	Velocidad de Operación (m/s)	F80 de la Muestra (mm)	P80 del Producto (mm)	Razón de Reducción (R80)
Muestra-2	R1	2,67	0,9	19,05	5,80	3,28
	R2	3,52	0,7	19,05	5,10	3,73
	R3	4,26	0,4	19,05	4,70	4,05

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del producto de la prueba piloto HPGR para la Muestra-2 muestran valores de P80 que varían entre 4,7 y 5,8 mm, los cuales son significativamente menores al producto actual del chancado cuaternario de la empresa minera en estudio, con valores de P80 de 12,2 mm.

A su vez, se aprecia un aumento en la razón de reducción (R80) a medida que se aumenta el torque (presión de torsión de los rodillos). A mayor torque, se inducen mayores esfuerzos sobre el lecho de partículas, lo que provoca mayor reducción de tamaño (Figura 12).

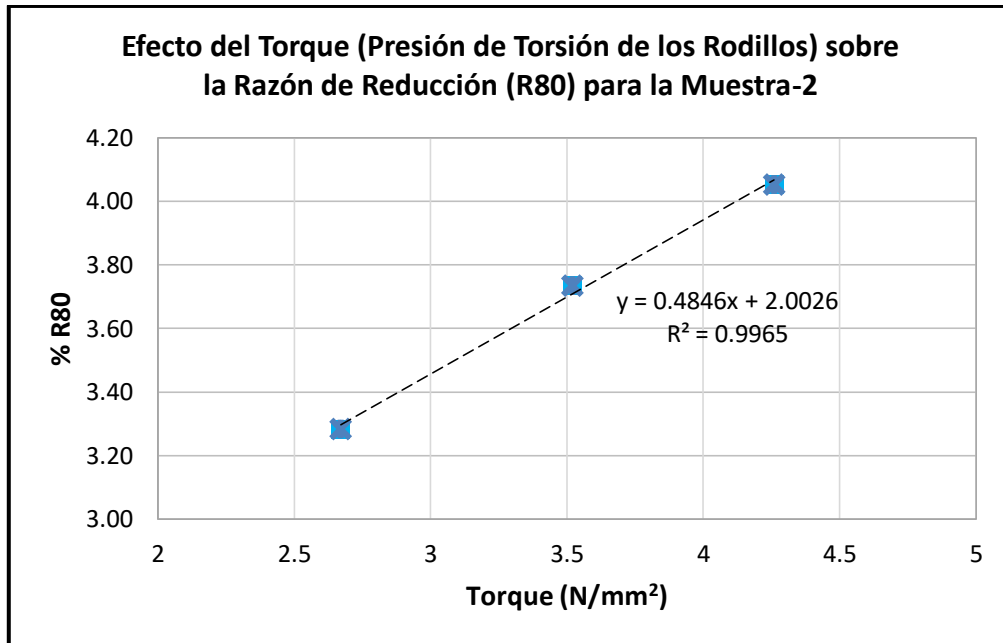


Figura 12. Efecto del Torque (Presión de Torsión de los Rodillos) sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2
 Fuente: Elaboración Propia.

Por el contrario, enfatiza el hecho de que a medida que aumenta la velocidad periférica, la tasa de disminución (R80) tiende a disminuir ligeramente. Dado que se reduce el tiempo de residencia en la zona de compresión, esto tiene un efecto menor en la reducción de tamaño, por lo que este hecho puede explicarse (Figura 13).

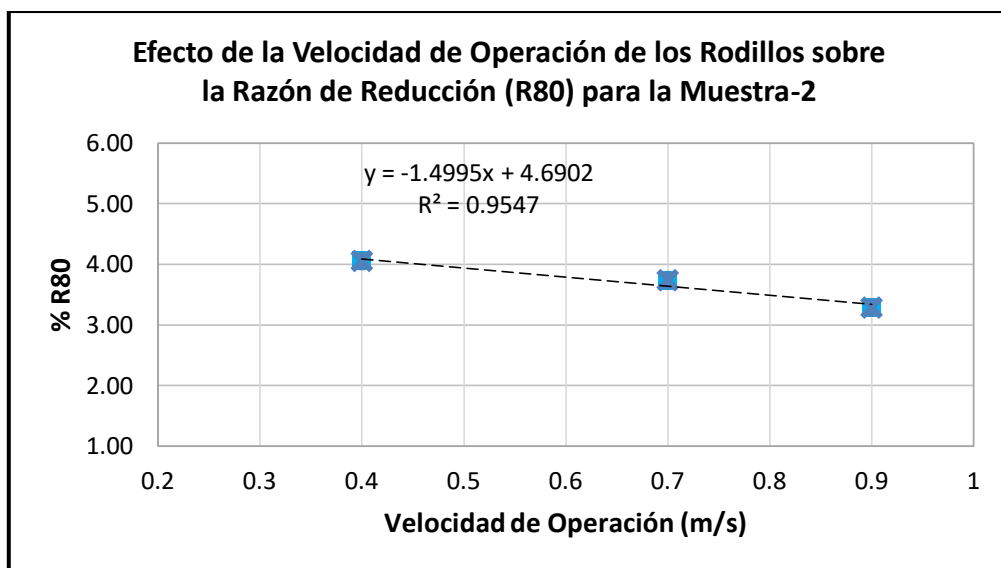


Figura 13. Efecto de la Velocidad de Operación de los Rodillos sobre la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2
 Fuente: Elaboración Propia (2020)

5.1.2.3. Efecto del Torque sobre Capacidad Específica y el Consumo de Energía Específico

Los resultados presentados en la Tabla 7 muestran los valores obtenidos de P80 y razón de reducción (R80) para varios valores de torque (presión de torsión de los rodillos) y velocidad periférica de operación de los rodillos, de la prueba piloto HPGR para la Muestra-2, efectuada a diferentes valores de torque (R1, R2, R3). De las pruebas con las muestras ensayadas demostraron el potencial uso de los equipos HPGR.

Tabla 7.

Datos de Capacidad Especifica y Consumo de Energia Especifico obtenidos de todas las Pruebas Piloto HPGR

Muestra de Entrada	Producto de Salida	Torque de Operación (N/mm ²)	Capacidad Especifica (Ton/h-m3)	Consumo De Energía (KW-h/Ton)
Muestra-1	R1	2,74	277	0,99
	R2	3,62	267	1,29
	R3	4,42	257	1,64
Muestra-2	R1	2,67	261	1,02
	R2	3,52	252	1,34
	R3	4,26	243	1,67
Muestra-3	R1	2,68	275	1,00
	R2	3,55	273	1,30
	R3	4,37	255	1,69

Fuente: Elaboración.

Los resultados obtenidos muestran que los valores de capacidad específica, que determina la capacidad del equipo por metro lineal de rodillo, disminuyen a medida que aumenta el torque (presión de torsión de los rodillos), obteniéndose valores entre 243 y 277 Ton/h-m3 (Figura 14).

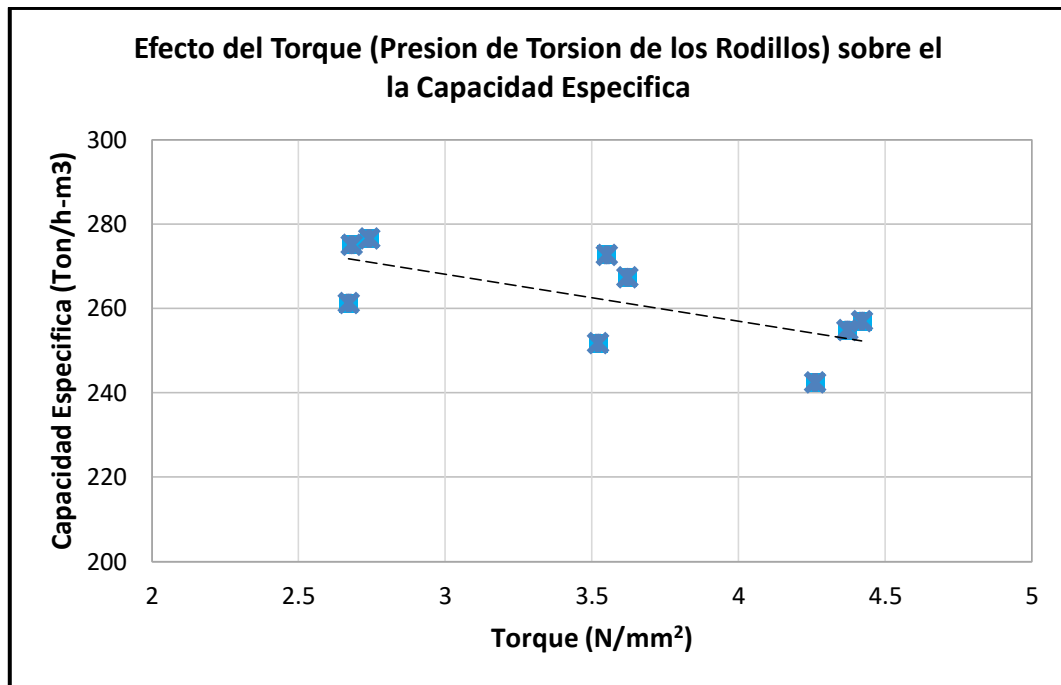


Figura 14. Efecto del Torque (Presión de Torsión de los Rodillos) sobre la Capacidad Especifica
Fuente: Elaboración Propia.

Al incrementar el torque de los rodillos (presión de rotación) disminuye la capacidad específica, pero aumenta el consumo de energía específico. Los resultados obtenidos muestran que los valores de consumo de energía específico aumentan a medida que aumenta el torque (presión de torsión de los rodillos), obteniéndose valores entre 0,99 y 1,69 KW-h/Ton. (Figura 15)

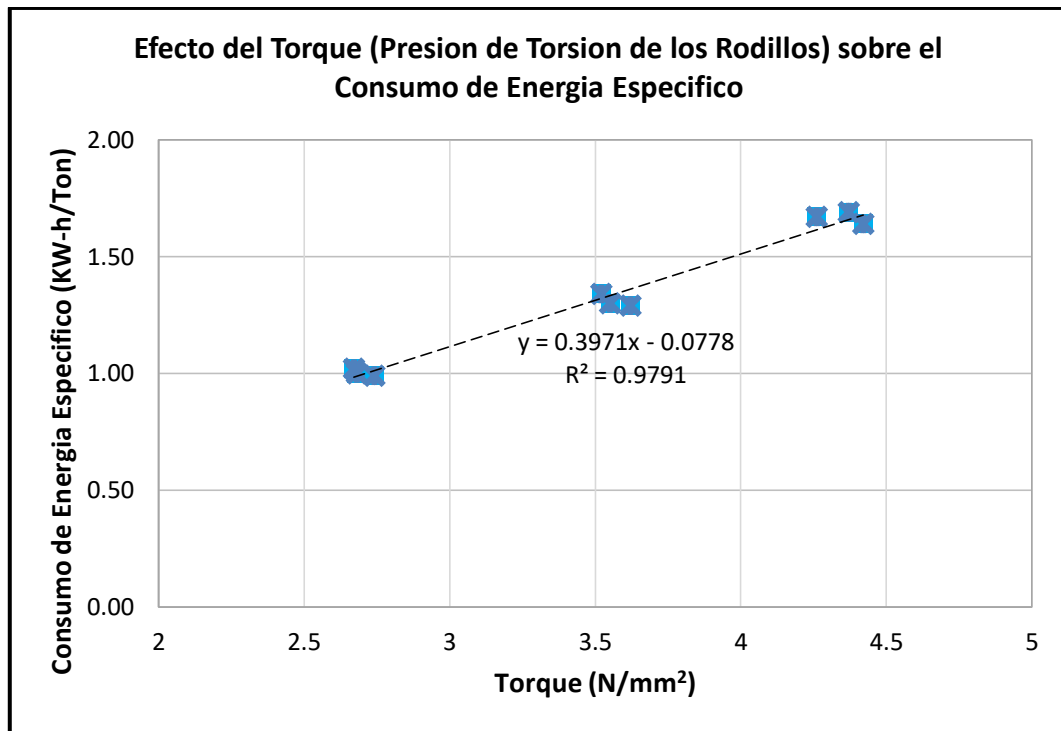


Figura 15. Efecto del Torque (Presión de Torsión de los Rodillos) sobre el Consumo de Energía Específico
Fuente: Elaboración Propia (2020)

5.1.2.4. Relación entre el Consumo de Energía Específica y la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2

Con base en la teoría de Bond (1957), que relaciona el consumo de energía con la tasa de reducción, es posible observar si existe alguna relación entre las dos variables en el molino de rodillos de alta presión. El factor clave en el consumo de energía de los equipos HPGR es la potencia requerida para hacer girar los rodillos con un cierto torque (presión de rotación) sobre el material compactado (mineral).

En la Figura 16, a medida que aumenta el consumo de energía, se puede observar que parte del índice de reducción (R80) aumenta. Por otro lado, cuando se compara la Figura 14 y con la Figura 15, ven muy poca diferencia. Esto se puede explicar por el hecho de que a una capacidad de procesamiento invariable (velocidad constante), el torque (presión de torsión de los rodillos) está directamente relacionado con la potencia y el consumo de energía.

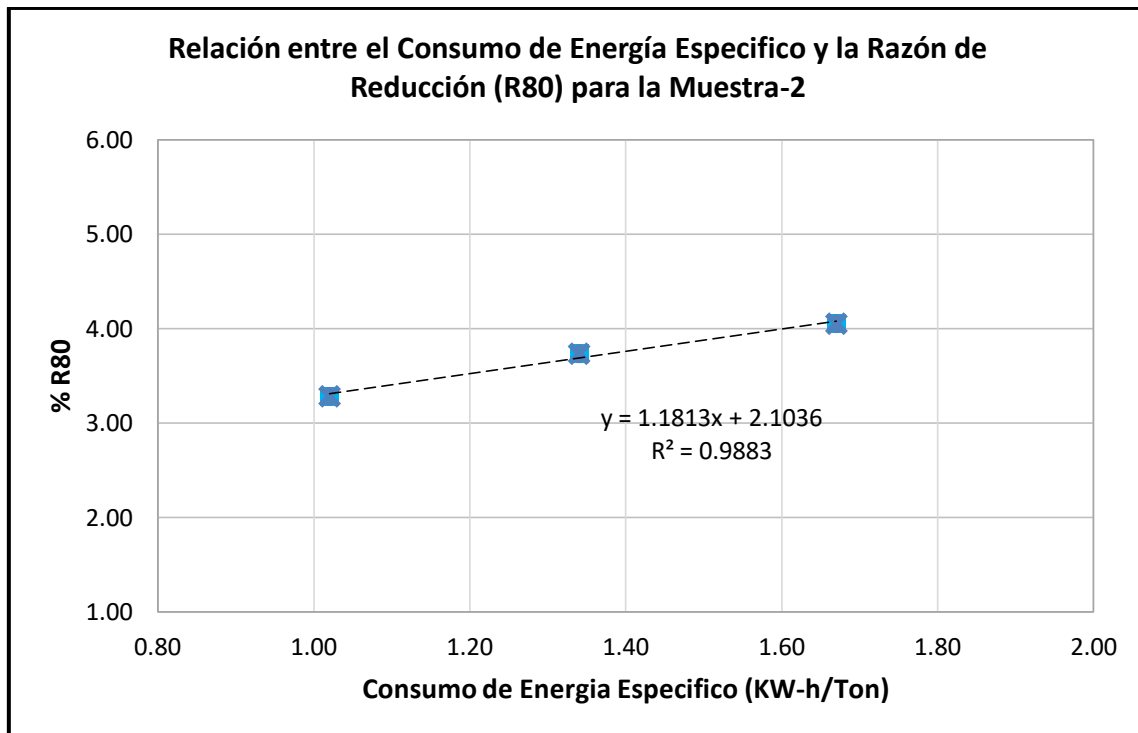


Figura 16. Relación entre el Consumo de Energía Especifico y la Razón de Reducción (R80) para la Muestra-2
Fuente: Elaboración Propia (2020)

5.1.2.5. Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de las Muestras después de las Pruebas Piloto HPGR

Se determinó que después de la prueba piloto HPGR, la Muestra-2 presentó un Work Index (Wi) de 13,7 KW-h/TC. Los equipos HPGR generan microfracturas internas en el mineral triturado, y la presencia de microfracturas disminuye el Work Index (Wi) del mineral. Adicionalmente, las microfracturas generadas por los HPGR permitieron disminuir el Work Index (Wi) de 15,1 KW-h/TC a 13,7 KW-h/TC, lo que incrementa la capacidad de molienda y de flotación en las etapas de procesamiento del mineral posteriores al chancado.

5.2. Identificar como el uso del HPGR garantiza la capacidad de mineral requerido para ser tratado en la molienda

Para el cumplimiento del objetivo específico 2: *Identificar como el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) garantiza la capacidad de mineral requerido para ser tratado en la molienda en una empresa minera al sur del país*, luego de obtener los datos experimentales con los ensayos de laboratorio o pruebas piloto HPGR, se desarrolló un modelo predictivo y se efectuaron simulaciones (análisis de escenarios) para el diseño de los equipos HPGR, con el fin de identificar si esta tecnología puede garantizar la capacidad de mineral requerido.

5.2.1. Desarrollo del Modelo Predictivo para Diseño de HPGR

El modelo predictivo de conminución con rodillos de alta presión (HPGR) utilizado en esta investigación corresponde al modelo de Torres-Casali (2009), el cual está conformado por una serie de ecuaciones que logran predecir la capacidad de tratamiento, potencia consumida y distribución de tamaños del producto en función de las características del mineral, dimensiones del equipo a utilizar y condiciones operacionales. Para la ejecución de las rutinas anteriormente mencionadas, fue necesario programar las ecuaciones en una plataforma computacional. Para esto se eligió el software **Microsoft Excel**. Las características, variables y parámetros de este modelo predictivo se describen en detalle en el Capítulo 4.

Cabe destacar que el modelo predictivo de Torres-Casali (2009) utilizado en esta investigación no fue validado, ya que este riguroso procedimiento fue efectuado en el mismo trabajo donde se postuló (Torres, 2010) y dicha actividad no constituye un objetivo dentro de esta investigación.

Según análisis previos, el modelo predictivo de Torres-Casali (2009) logra estimar a escala piloto los consumos específicos de energía de forma satisfactoria de los minerales (coeficiente $R^2 = 80\%$) así como las curvas de

granulometría de los productos (raíz de la media de los errores al cuadrado menor al 4%). En base a estos resultados, puede afirmarse que la capacidad predictiva del modelo es satisfactoria.

5.2.2. Simulación o Evaluación de Escenarios para el Diseño de Equipos HPGR

Después de realizadas las pruebas de laboratorio se evaluó la instalación de equipos HPGR como cuarta etapa de chancado en el proceso de conminución de *una empresa minera al sur del país*. Para tal fin, se efectuó la simulación o evaluación de dos escenarios:

3. HPGR en circuito abierto, con posterior molienda en molinos de barras y molinos de bolas, y
4. HPGR en circuito cerrado, con pre-zarandeo y posterior alimentación a molinos de bolas (prescindiendo de los molinos de barras).

En las Figura 17 y Figura 18 se muestran los diagramas de flujo de las alternativas evaluadas.

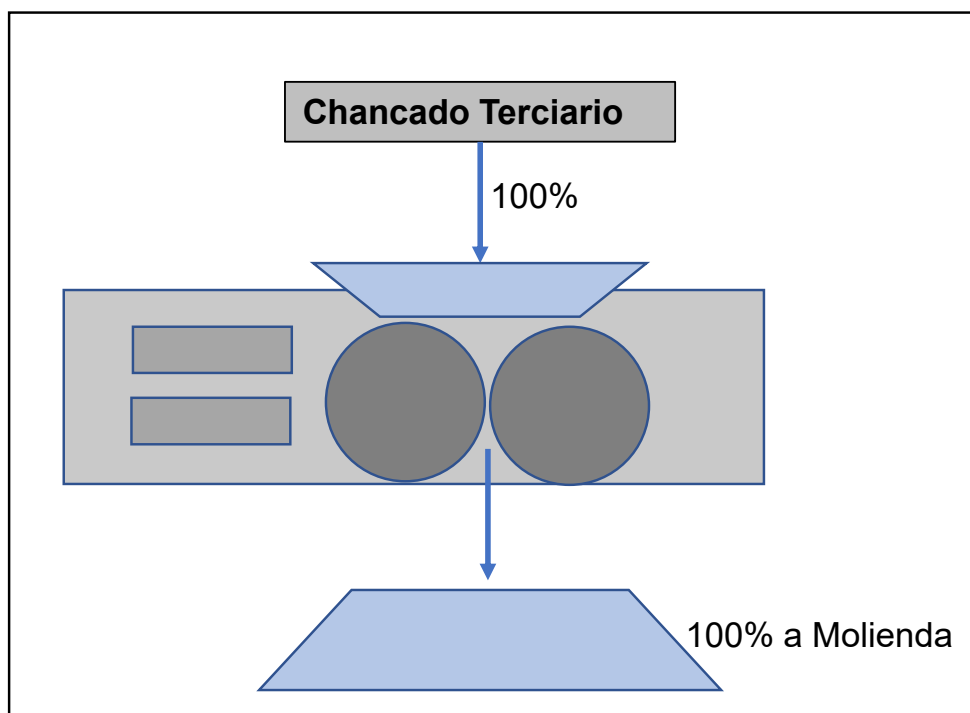


Figura 17. HPGR en circuito abierto.
Fuente: Elaboración propia.

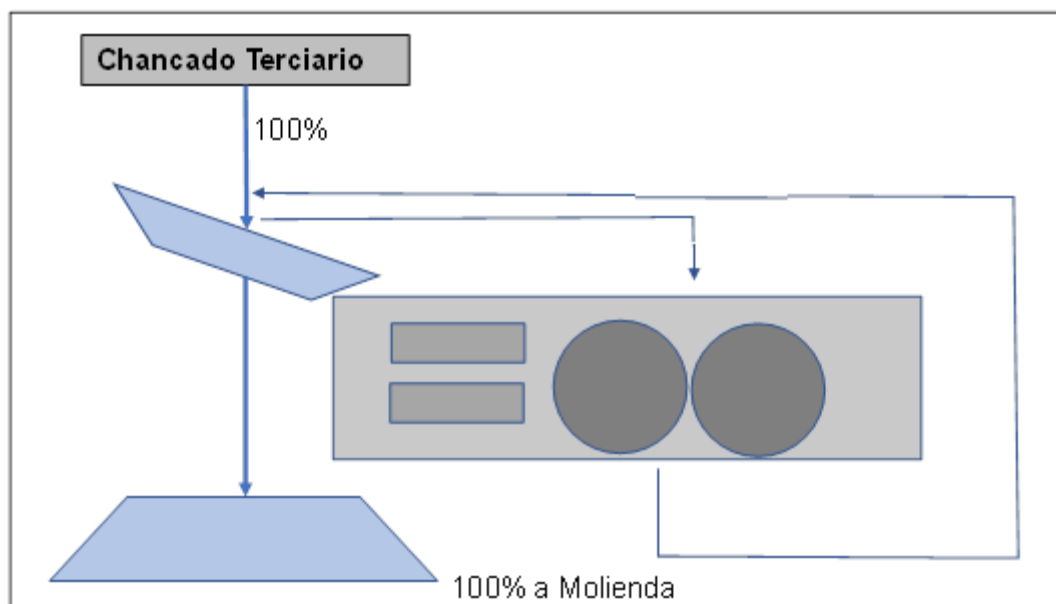


Figura 18. HPGR en circuito cerrado.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla

8.

Valores Típicos de Operación de los Equipos HPGR resume las condiciones típicas de operación de los equipos HPGR, tanto a escala piloto como industrial, para minerales metálicos como el oro, cobre y hierro, según Klymowsky *et al.* (2002).

Tabla 8.

Valores Típicos de Operación de los Equipos HPGR

Item de Operación de los Equipos HPGR	Valores Típicos
Diámetro de Rodillos (D), en m	0,5 – 2,8
Largo de Rodillos (L), en m	0,2 – 1,8
Espacio entre Rodillos (Gap), en m	0,02 D – 0,03 D
Capacidad de Tratamiento (tph)	20 – 3000
Fuerza de Molienda (F), en KN	2000 – 20000
Torque (Presión de Torsión Media), en bar	20 – 300
Máxima Potencia Instalada, en KW	3000 x 2
Velocidad de los Rodillos (U), en m/s	$U \leq 135\sqrt{D}$ cuando $D \leq 1,7$ m $U \leq D$ cuando $D > 1,7$ m
Consumo Específico de Energía, en KW-h/Ton	1 – 3

Fuente: según Klymowsky *et al.* (2002)

Para el ejercicio de dimensionamiento de los HPGR en circuito abierto y HPGR en circuito cerrado, se han utilizado los resultados de la prueba piloto

HPGR para la Muestra-2, Adicionalmente, se han considerado los siguientes parámetros de diseño y supuestos: Razón $L/D = 0,90$; $U = D$; $\delta = 0,85 \rho S$; y $s_0 = 0,025 D$. Estos valores fueron obtenidos de las condiciones típicas de operación de los equipos HPGR según Klymowsky *et al.* (2002), mostradas en la Tabla 8.

En base a estos valores de referencia, para estos ejercicios se consideró un equipo HPGR con rodillos de 2,1 m de diámetro y 1,9 m de largo, y una potencia de motor de 2×960 KW. La velocidad periférica de operación a utilizar es de 0,8 m/s. El torque inicial (presión de torsión o de rotación de los rodillos) es de 40 bar (4 N/mm^2), siempre y cuando se mantenga constante el espacio entre los rodillos (gap), sin embargo, este puede ajustarse para optimizar la trituración o chancado.

Evaluación del Escenario 1: Chancado Cuaternario con HPGR en circuito abierto

En el HPGR en circuito abierto, el tamaño del producto de chancado (P80) resultó en 5,7 mm. El consumo de energía está en el orden de las 2,2 KW-h/Ton y el torque óptimo (presión de torsión) resultó en $3,3 \text{ N/mm}^2$.

Por otra parte, como valor agregado fue simulado el escenario de descarga del producto del HPGR en circuito abierto sobre la molienda de molinos de barras, verificándose que se puede incrementar la capacidad de estos molinos de barras entre 25% a 50%, es decir del valor actual de 250 Ton/h por molino de barras, con una etapa cuaternaria se incrementa al rango de 325 a 390 Ton/h y produciendo un tamaño de producto de molienda (P80) de 1,6 mm (1600 micras), valor mucho menor en comparación con el producto actual de 3 a 4 mm.

Posteriormente, con el producto simulado de los molinos de barras se realizaron nuevas simulaciones en los molinos de bolas, obteniéndose un incremento de 30% en la capacidad de cada molino (de 83,3 Ton/h a 110 Ton/h) sin afectar la carga circulante y con disminución del tamaño del producto

(P80) de la molienda hasta 0,186 mm (186 micras) sin aumentar el producto del rebose de ciclones.

Evaluación del Escenario 2: Chancado Cuaternario con HPGR en circuito cerrado

En el HPGR en circuito cerrado, el tamaño del producto de chancado (P80) resultó en 3,2 mm. El consumo de energía está en el orden de las 2,4 KW-h/Ton y el torque óptimo (presión de torsión) resultó en 3,8 N/mm². La Figura 19 muestra las distribuciones granulométricas de la alimentación y producto de la molienda obtenida para cada circuito.

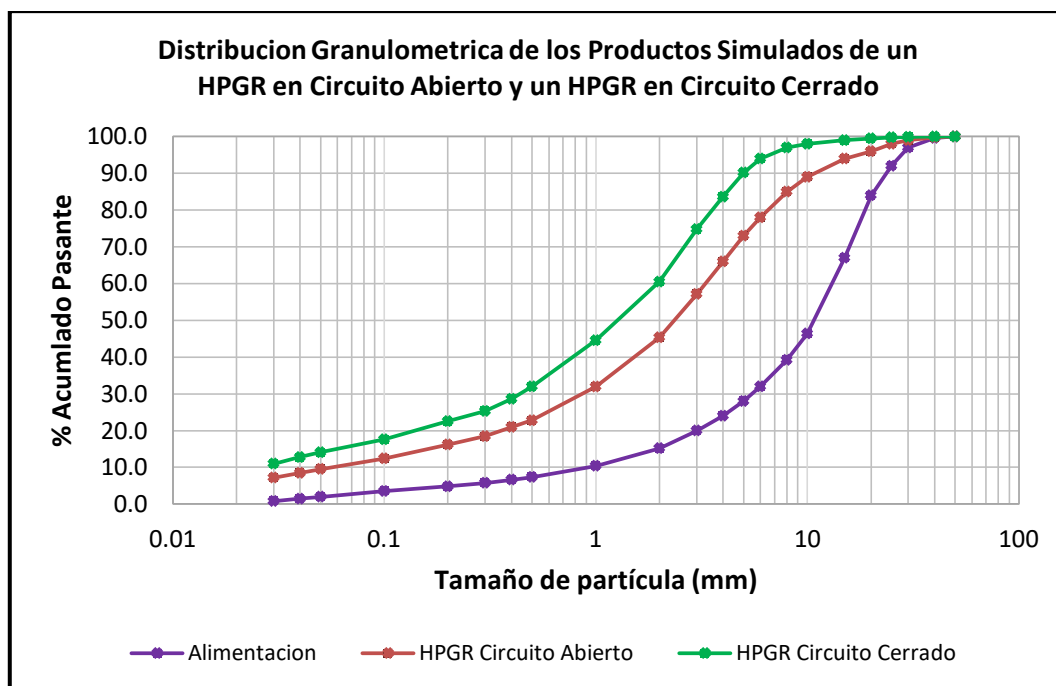


Figura 19. Distribuciones Granulométricas de los Productos Simulados para un HPGR en Circuito Abierto (color marrón) y un HPGR en Circuito Cerrado (color verde).

Fuente: Elaboración Propia.

La descarga del producto del HPGR en circuito cerrado sobre la molienda de barras no fue evaluado, debido al que el tamaño fino del producto del HPGR es muy similar a la descarga de los molinos de barras, en su lugar, se realizaron simulaciones para alimentar directamente el producto de los HPGR a los molinos de bolas (haciendo un bypass a los molinos de barras). Los resultados de las simulaciones indicaron que no es posible incrementar la

capacidad sin aumentar el producto del rebose de ciclones, por lo tanto, el remplazo de los molinos de barras no presenta ninguna ventaja.

5.3. Determinar como la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda

El objetivo general de esta investigación: *Determinar como la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país*, se cumple o lleva a cabo integrando los resultados de los objetivos específicos 1 y 2 en una propuesta de instalaciones de equipos HPGR.

5.3.1. Propuesta de Instalación de Equipos de Chancado Cuaternario

Los ensayos de laboratorio y la simulación o evaluación de escenarios realizadas sirvieron como fundamento técnico para elaborar una propuesta o proyecto de instalación de los rodillos alta presión (HPGR) en la cuarta etapa de chancado de una empresa minera al sur del país. Para poder analizar comparativamente la tecnología HPGR, se consideraron también otras tecnologías convencionales y no convencionales. Las alternativas evaluadas fueron las siguientes:

- **Caso 1:** Continuar con la situación actual (caso base).
- **Caso 2:** Instalar tecnología convencional mediante trituradoras de cono MP1000 y zarandas en circuito cerrado en la cuarta etapa de chancado.
- **Caso 3:** Implementar tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en la cuarta etapa de chancado.
- **Caso 4:** Emplazar tecnología no convencional de trituradoras de impacto de ejes vertical (VSI) en la cuarta etapa de chancado.

La inversión total del proyecto varía de acuerdo a la tecnología a utilizar en la fase de trituración o chancado. La Tabla 9 presenta los principales rubros de la inversión en función al costo total y la Tabla 10 detalla la distribución de los costos operativos para cada caso o alternativa considerada.

Tabla 9.

Principales rubros de la inversión en función al costo total para cada caso o alternativa considerada. (valores en porcentaje)

ITEM	DESCRIPCION	CASO 2	CASO 3	CASO 4
		Trituradoras de Cono - MP1000	HPGR	Trituradoras de Eje Vertical
1	PREPARACION DE SITIO	5.50	3.16	4.60
2	PLANTA	47.00	48.37	31.78
3	PILAPRE-FINOS 35,000 TM	23.71	24.95	37.41
4	REPOTENCIACION DE FAJA	3.79	3.99	5.45
5	FACILIDADES	3.71	3.24	4.43
6	SUB TOTAL1	83.71	83.71	83.67
7	INGENERIA, LOGISTICA Y GERENCIA (4.5%)	3.77	3.77	3.77
8	ADMINISTRACION DEL PROYECTO (2.0 %)	1.67	1.67	1.67
9	COMISIONADOY ARRANQUE (1.25 %)	1.00	1.00	1.05
10	RESPUESTOS (0.9%)	0.75	0.75	0.75
11	SUB TOTAL 2	7.20	7.20	7.24
12	SUB TOTAL 3	90.91	90.91	90.91
13	CONTINGENCIAS (10 %)	9.09	9.09	9.09
TOTAL		100.00	100.00	100.00

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 10.

*Distribución de los costos operativos para cada caso o alternativa considerada.
(valores en porcentajes)*

ITEM	DESCRIPCION	CASO 2	CASO 3	CASO 4
		Trituradoras de Cono - MP1000	HPGR	Trituradoras de Eje Vertical
1	ENERGIA	N.D	42	46
2	MATERIALES Y OTROS	N.D	50	43
3	LABOR	N.D	8	12
	TOTAL	N.D	100	100

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Debido a la limitada disponibilidad de espacio desde la fase de análisis de inversión (tabla 9) el caso 2 fue inviable, por lo cual no fue considerado en la distribución de costos operativos (tabla 10).

Desde el punto de vista del manejo de los costos de inversión, la Tabla 9 evidencia que la tecnología HPGR (Caso 3) a pesar de requerir mayores porcentajes de inversión en planta: 48,37% (principalmente por compra de equipos), en comparación con 47% del Caso 2 y 31.78% del Caso 4, es la alternativa que menos gasto requiere en la preparación del sitio y la instalación de una pila pre-finos: 28,11%, en comparación con 29.21% del Caso 2 y 42.01% del Caso 4. El resto de los ítems se consideraron con porcentajes de inversión similar.

Cabe destacar que la tecnología HPGR es mucho más eficiente desde el punto de vista del ahorro energético que las otras alternativas, lo que puede impactar en la reducción de cuantiosos gastos operativos.

5.3.2. Evaluación Técnica de la Propuesta de Instalación de Equipos HPGR

Como resultado de la evaluación técnica de las alternativas evaluadas se concluye lo siguiente:

- El **Caso 2**, no es viable técnicamente por la limitada disponibilidad de espacio donde están ubicados los equipos de chancado terciario o cuaternario y en las inmediaciones de esta planta. Adicionalmente, con esta tecnología no se asegura incrementar la capacidad del chancado cuaternario a más de 63.000 Ton/día de mineral cobre.
- El **Caso 3**, técnicamente es la alternativa más viable para el desarrollo de este proyecto, ya que los equipos HPGR han sido probados industrialmente y operan de manera continua en plantas de procesamiento de minerales metálicos de alta dureza como el oro, hierro y cobre, optimizando a su vez el ahorro energético de la planta. Con esta tecnología se asegura incrementar la capacidad del chancado cuaternario a más de 63.000 Ton/día de mineral de cobre y cumplir con el requerimiento volumétrico de la planta, de por lo menos 60.000 Ton/día.
- El **Caso 4**, no se recomienda como viable técnicamente, ya que las especificaciones técnicas de esta tecnología indican que tiene en capacidad de trabajar con minerales duros y abrasivos, como minerales de cobre, de hierro, cuarzo, zircón, diamantes, etc., estos equipos están especialmente diseñado para procesar minerales no metálicos, especialmente cemento y arena de alto grado de escogimiento, ya que tienen la ventaja de producir partículas cubicas y/o esféricas de tamaños uniformes. Con esta tecnología no se asegura incrementar la capacidad del chancado cuaternario a más de 63.000 Ton/día de mineral cobre.

5.4. Contrastación de hipótesis

5.4.1. Contrastación de la hipótesis general

La hipótesis general **H_G** representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que **H₀** es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_G: La implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país.

H₀: La implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario no incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país.

Interpretación

Las evidencias aportadas por esta investigación revelaron que la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda. La evaluación de las tecnologías de HPGR en circuitos abiertos y cerrados asegura el incremento de la capacidad de molienda a más de 63.000 Ton/día de mineral. Además, la evaluación técnica del estudio de factibilidad demuestra que el desarrollo de un proyecto de instalación de rodillos de alta presión (HPGR) en la cuarta etapa de chancado de una empresa minera al sur del país, el cual representa la alternativa más viable para incrementar la capacidad de molienda de minerales de alta dureza, en comparación con otras tecnologías disponibles en la industria. Por lo consiguiente, se acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; es decir, se demuestra que: *“La implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país”*.

5.4.2. Contrastación de las hipótesis específicas

Hipótesis Específica 1

La hipótesis específica H_{E1} representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que H_0 es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_{E1} : La tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país.

H_0 : La tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) no logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país.

Interpretación

Los ensayos de laboratorio junto con las simulación o evaluación de escenarios efectuadas en esta investigación, indican que con la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario se logra la disminución del tamaño de la granulometría de alimentación a molinos de barras y bolas, desde un P80 actual de 12,2 mm a un P80 de menos de 6 mm (entre 5,7 y 3,2 mm). Adicionalmente, las microfracturas generadas por los HPGR permitieron disminuir el Work Index (Wi) de 15,1 Kw-h/TC a 13,7 Kw-h/TC, lo que incrementa la capacidad de molienda y de flotación en las etapas de procesamiento del mineral posteriores al chancado. Por lo tanto, las evidencias aportadas por esta investigación revelaron demuestran que: *La tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país.*

Hipótesis Específica 2

La hipótesis específica H_{E2} representa la propuesta realizada por el investigador; mientras que H_0 es la hipótesis nula. A continuación, las hipótesis:

H_{E2} : El uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementa la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país.

H₀: El uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) no incrementa la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país.

Interpretación

La evaluación técnica del estudio de pre-factibilidad concluyó que el desarrollo de un proyecto de instalación de rodillos de molienda de alta presión (HPGR) en la cuarta etapa de chancado de una empresa minera al sur del país es la alternativa más viable para incrementar la capacidad de chancado cuaternario, en comparación con otras tecnologías disponibles en la industria, optimizando a su vez el ahorro energético de la planta. Con las tecnologías de HPGR se asegura incrementar la capacidad del chancado cuaternario a más de 63.000 Ton/día de mineral de cobre y cumplir con el requerimiento volumétrico de la planta, de por lo menos 60.000 Ton/día. Por consiguiente, se acepta la hipótesis del investigador y se rechaza la hipótesis nula; en este sentido, se concluye que: *El uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) garantiza la capacidad de mineral requerido para ser tratado en la molienda en una empresa minera al sur del país.*

CAPÍTULO VI.

INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

6.1. Discusión de resultados

Siguiendo las tendencias observadas hasta ahora, las operaciones del circuito de conminución continuarán representando los mayores ítems de costo operativo en plantas de tratamiento de minerales, ya sea debido al consumo de energía, recubrimientos y cuerpos de molienda. En este sentido, las mejoras en la eficiencia del uso de energía, la reducción del desgaste de los recubrimientos y cuerpos de rectificado continuarán representando los principales desafíos para los grupos dedicados a la investigación en esta área.

La industria minera, en particular, los fabricantes de equipos de trituración y molienda, basados en los rápidos cambios tecnológicos, así como en las inversiones extremadamente altas requeridas, cuyos rendimientos esperados dependen de combinaciones favorables de proyectos adecuados, lo que dará como resultado una estabilidad. Estos factores, asociados con el largo tiempo de maduración, determinan prácticamente la brecha tecnológica entre lo que se practica en la industria y los desarrollos recientes en el sector.

El escenario se vuelve aún más particular cuando se considera un ingrediente típico de la ingeniería; es decir, que los principales desarrollos registrados en el sector provienen de la propia industria o de investigadores directamente vinculados a ella. Si la descripción presentada es válida para aspectos de evolución y revolución en el desarrollo de equipos, el área de aplicación de métodos y procesos muestra una imagen muy diferente.

En este contexto, las técnicas de simulación basadas en modelos matemáticos son recursos efectivos comprobados, tanto en el diseño de equipos como en circuitos de procesos integrados. Una vez configurado y

calibrado, un simulador puede representar la operación de un circuito completo de trituración, cribado, rectificado y clasificación, ya sea con fines de diseño o para explorar alternativas para mejorar el rendimiento de los circuitos existentes, generalmente a través de un aumento capacidad. Los principales modelos matemáticos utilizados en los simuladores son de naturaleza empírica.

El conocimiento de todos los equipos que trabajan para hacer esta ruptura de materiales, especialmente la prensa de rodillos de alta presión (HPGR) como uno de los pasos importantes en el proceso de trituración y molienda de minerales. La formación de una columna de mineral en los rodillos HPGR favorece la distribución uniforme del material en los rodillos, haciendo que las partículas se descompongan de una manera predominantemente autógena, importante para la calidad del producto triturado.

Los resultados de las pruebas mostraron que algunos escenarios, dependiendo de estas variables, es posible formar una columna con corrientes motoras dentro de los valores nominales y presentar mejores ganancias para HPGR.

Se evaluó la instalación de equipos HPGR como cuarta etapa de chancado en el proceso de conminución de una empresa minera al sur del país. Para tal fin, se efectuó la simulación o evaluación de dos escenarios: 1) HPGR en circuito abierto, con posterior molienda en molinos de barras y molinos de bolas, y 2) HPGR en circuito cerrado, con pre-zarandeo y posterior alimentación a molinos de bolas (prescindiendo de los molinos de barras).

Las simulación o evaluación de escenarios realizada para ambos circuitos indicaron que para el HPGR en circuito resultó un producto de chancado con un tamaño (P80) de 5,7 mm, mientras que para el HPGR en circuito cerrado resultó un producto del chancado (P80) de 3,2 mm. El consumo de energía estuvo en el orden de 2,2 a 2,4 KW-h/Ton y el torque (presión de rotación de los rodillos) entre 3,3 y 3,8 N/mm².

Por otra parte, como valor agregado fue simulado el escenario de descarga del producto del HPGR en circuito abierto sobre la molienda de molinos de barras y bolas, verificándose que se puede producir un tamaño de producto de molienda (P80) de 1,6 mm (1600 micras). Posteriormente, con el producto simulado de los molinos de barras se realizaron nuevas simulaciones en los molinos de bolas, obteniéndose una disminución del tamaño del producto (P80) a 0,186 mm (186 micras).

Al comparar esta investigación con el trabajo de Medina (2019), se puede afirmar que se llegaron a resultados similares. Medina (2019) analiza la desviación de P80 en etapa de clasificación de una planta de molienda, identificando que existe un problema en etapa de clasificación de la planta de molienda debido a falta de manejo del agua en el proceso y al estado estructural de los hidrociclones; mientras que en el MUNI existe un problema en la etapa de clasificación debido a una desviación en el control operacional en la presión de la batería y en la configuración actual de diseño del hidrociclón. Este investigador recomienda la revisión de los sensores de flujo de agua en las plantas de molienda debido a las diferencias encontradas entre balance de masa y datos del sistema, esto permite tener un mayor control operacional en los circuitos de molienda y clasificación.

Mientras que en este trabajo de investigación se buscaba garantizar un P80 adecuado, por debajo de las 240 micras, sin perjudicar o afectar el tonelaje de planta. Por otra parte, como valor agregado fue simulado el escenario de descarga del producto del HPGR en circuito abierto sobre la molienda de molinos de barras y bolas, verificándose que se puede producir un tamaño de producto de molienda (P80) de 1,6 mm (1600 micras). Posteriormente, con el producto simulado de los molinos de barras se realizaron nuevas simulaciones en los molinos de bolas, obteniéndose una disminución del tamaño del producto (P80) a 0,186 mm (186 micras).

Así mismo, Basaez (2018) efectuó una investigación de factibilidad técnica y económica de aumento de capacidad del proceso de chancado. El investigador considero implementar varias opciones u alternativas: agregar un

nuevo chancador terciario, crear una línea cuaternaria con chancadores de impacto, incorporación de un chancador HPGR en remplazo a línea terciar actual. Posteriormente realizó un análisis sobre el impacto en el plan de negocios de la empresa, de cada una de las opciones. Finalmente se realiza un análisis combinando los puntos de vista técnicos y económicos. En este estudio, se desea aumentar la capacidad de molienda de 4000 a 6000 TPD. Por otro lado, el investigador habla sobre la disponibilidad y utilización de los equipos, y contempla la posibilidad de implementar un chancador de rodillos de alta presión (HPGR).

En este estudio, se elaboró una propuesta o proyecto de instalación de los rodillos de alta presión (HPGR) en la cuarta etapa de chancado de una empresa minera al sur del país. Para poder analizar comparativamente la tecnología HPGR, se consideraron también otras tecnologías convencionales y no convencionales. Las alternativas evaluadas fueron las siguientes: caso 1: Continuar con la situación actual (caso base); caso 2: Instalar tecnología convencional mediante trituradoras de cono MP1000 y zarandas; caso 3: Implementar tecnología de rodillos de molienda de alta presión (HPGR); y caso 4: Emplazar tecnología no convencional de trituradoras de impacto de ejes vertical (VSI). La inversión total del proyecto varía de acuerdo a la tecnología a utilizar en la fase de trituración. Como resultado de la evaluación técnica de las alternativas evaluadas se concluye que el Caso 3 es la alternativa más viable para el desarrollo de este proyecto. Con esta tecnología se asegura incrementar la capacidad de molienda a más de 63.000 Ton/día de mineral.

Cepeda (2016) realizó un trabajo investigativo con el propósito de generar un método matemático dinámico de Rodillos de Molienda de Alta Presión (HPGR) con correcciones teóricas a los modelos actuales, basados en un mejor cálculo de la granulometría final del producto mineral. La derivación del modelo se basa en condiciones y consideraciones fenomenológicas que resultan de la física newtoniana. El investigador efectuó a su vez la validación y ajuste. El objetivo de la validación del modelo consiste en obtener una representación matemática de la planta que sea lo más cercana posible a la realidad, y que permita realizar un control predictivo basado en el modelo

(MPC), gestionar procesos y representar plantas de tipo no lineal que frecuentemente se encuentran a nivel industrial.

Esta investigación presenta la similitud con la investigación de Cepeda (2016) en cuanto a que se destaca la importancia de los modelos matemáticos para predecir el comportamiento y la granulometría final del producto de los HPGR, así como también nos ayuda a determinar todas las variables que están involucradas en el proceso. Sin embargo, nuestro trabajo se diferencia en que el modelo predictivo utilizado en esta investigación (Torres-Casali, 2010) no fue validado, ya que este riguroso procedimiento fue efectuado en el mismo trabajo donde se postuló (Torres, 2010) y dicha actividad no constituye un objetivo dentro de esta investigación.

En el mismo orden de ideas, Pizarro (2015) desarrolló una investigación centrada en el análisis comparativo de modelos fenomenológicos de equipos HPGR. El objetivo de este trabajo es revisar las ventajas y desventajas de dos (2) modelos fenomenológicos desarrollados para esta tecnología, Morrell et al. (1997) y Torres y Casali (2009). Ambos modelos se han implementado en varias plataformas de simulación de procesamiento de minerales, como JkSimMet y MolyCop Tools. Es importante mencionar el bajo error (menor al 7%) obtenido en el caso del modelo de Torres-Casali (2009) para ajuste y verificación, estimación de consumo energético específico y modelo de granularidad. En comparación con los 15 parámetros del modelo de Morrell et al. (1997), el modelo de tamaño de partículas de Torres-Casali (2009) solo requiere de 7 parámetros que necesitan ser ajustados.

En este estudio, el modelo predictivo de conminución con rodillos de alta presión (HPGR) que fue utilizado es el de Torres-Casali (2009). Para la ejecución de las rutinas del modelo, se programaron las ecuaciones en el software Microsoft Excel. Según análisis previos, el modelo predictivo de Torres-Casali (2009) logra estimar de forma satisfactoria el consumo energético unitario en la escala piloto (coeficiente $R^2 = 80\%$) y las curvas de tamaño de partícula de los productos minerales (error menor al 4%). Con base en estos resultados, se puede decir que la capacidad predictiva del modelo es satisfactoria. En base a

estos resultados, puede afirmarse que la capacidad predictiva del modelo es satisfactoria.

En otro orden de ideas, Chávez (2019) en su investigación sobre la optimización de operaciones de una planta de chancado terciario que tiene más de diez años operando y actualmente presenta problemas respecto a la granulometría del producto y al manejo de un mayor porcentaje de carga circulante, de tal manera que ha ido disminuyendo la eficiencia del circuito de chancado terciario. Los cambios propuestos en este proyecto estiman lograr un incremento en la cantidad de mineral tratado en la planta de chancado hasta las 19 TMHD, pero a la vez se espera una reducción de tamaño del P80 a 8,33 mm el cual permitirá el ahorro de energía en la siguiente etapa de molienda y una mayor liberación del mineral deseado.

De igual manera, la presente investigación resalta los beneficios que un adecuado y controlado sistema de chancado genera para los procesos siguientes (como molienda y lixiviación). Se comprueba que la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda. La evaluación de las tecnologías de HPGR en circuitos abiertos y cerrados asegura el incremento de la capacidad de molienda a más de 63.000 Ton/día de mineral, obteniéndose un tamaño del producto de chancado (P80) entre 5,7 y 3,2 mm.

Por otro lado, Salazar (2018) en su trabajo sobre la idoneidad de la molienda de minerales mixtos para la liberación de oro a nivel experimental, tuvo el objetivo de evaluar la carga de molienda, velocidad crítica y tiempo de liberación del mineral. Los resultados obtenidos permitieron verificar que para la velocidad crítica el mejor resultado se produjo cuando se alcanza el 90% de su velocidad crítica, y existe un 85,64% pasante a malla 200, con un análisis de varianza de $p = 0,010$ (menor a $\alpha = 0,05$) y una significancia de 5,76. Para la carga moledora, el resultado más óptimo se produjo cuando se alcanza el 31,30% de la carga moledora, y teniendo 79,54% pasante a malla 200, con análisis de varianza $p = 0.001$ (menor a $\alpha = 0,05$) y una significancia de 12,85. Para el tiempo de molienda, el resultado más óptimo se produjo en un tiempo

de 16 minutos, con un 84,12% pasante a malla 200, con un análisis de varianza $p = 0,001$ (menor a $\alpha 0,05$) y una significancia de 11,60.

En la presente investigación se resalta la importancia de estimar la dureza de los minerales, para poder efectuar el grado de liberación de las partículas y el trabajo necesario que hay que efectuar para poder liberarlas. De la misma manera, se resaltó el hecho de que el tratamiento de los minerales con la tecnología HPGR en la etapa de chancado terciario o cuaternario origina en las partículas minerales microfracturas, que pueden resultar beneficiosas para acelerar los posteriores procesos de molienda y flotación

Adicionalmente, Zumaran (2017) en su investigación concluyó que el aumento del tiempo de molienda y la disminución del índice de trabajo o Work Index (Wi) incrementa la fracción pasante de las mallas 16 y 200. Por otro lado, se observa que una mayor proporción de bolas de menor tamaño incrementa la fracción pasante de la malla 200. Se determinó que la proporción de bolas grandes y el aumento del tiempo de molienda aumenta la razón de reducción de tamaño (R80). De la misma manera, se ha observado que los minerales con mayor Work Index (Wi) y partículas más gruesas requieren mayor impacto y bolas más grandes.

En la presente investigación, se determinó en laboratorio el Work Index (Wi) o Índice de Trabajo de Bond (1957) antes y después de utilizar el equipo HPGR. Se determinó que antes de la prueba piloto HPGR la Muestra-2 presentó un Work Index (Wi) de 15,1 KW-h/TC. Estudios previos afirman que cuando el Work Index (Wi) se incrementa sobre los 15 KW-h/TC la capacidad de molienda es afectada de manera considerable, disminuyendo a valores menores de 60,000 toneladas por día. Así mismo, se determinó que después de la prueba piloto HPGR, la Muestra-2 presentó un Work Index (Wi) de 13,7 KW-h/TC. Los equipos HPGR generan microfracturas internas en el mineral triturado, y la presencia de microfracturas disminuye el Work Index (Wi) del mineral. Adicionalmente, las microfracturas generadas por los HPGR permitieron disminuir el Work Index (Wi) de 15,1 KW-h/TC a 13,7 KW-h/TC, lo

que incrementa la capacidad de molienda y de flotación en las etapas de procesamiento del mineral posteriores al chancado.

Por otra parte, Echavaudis y Pérez (2017) en su estudio determina a través de ensayos de laboratorio sobre la granulometría determina que existe un diámetro adecuado de mineral sulfuro de plomo para que ocurra una mayor proporción de liberación durante un tiempo de molienda de 4 a 16 minutos. También se determinó que el tamaño de partícula más apropiado para la recuperación óptima de plomo de minerales polimetálicos es 67.60% de los minerales acumulados que pasan por la pantalla de referencia -100.

Esta investigación presenta la similitud con la investigación de Cepeda (2016) en cuanto a que se destaca la importancia de alcanzar en el proceso de conminución (chancado y molienda) un tamaño de partícula óptima para garantizar el éxito en cada una de las etapas posteriores. Sin embargo, nuestro trabajo se diferencia en que no se analizaron tiempos de molienda óptimos para alcanzar un tamaño de partícula óptima para la concentración por flotación, ya que los objetivos de esta investigación se centran en las etapas de chancado terciario y cuaternario.

6.2. Conclusiones

Primera

La evaluación de las tecnologías de HPGR en circuitos abiertos y cerrados asegura el incremento de la capacidad de molienda (>60.000 Ton/día de mineral) a pesar de la dureza elevada.

Segunda

La evaluación técnica del estudio de factibilidad demuestra que instalación de un HPGR en la cuarta etapa de chancado es la alternativa más viable para incrementar la capacidad de molienda de minerales de alta dureza, en comparación con otras tecnologías disponibles en la industria.

Tercera

Con la implementación de las tecnologías de rodillos de alta presión (HPGR) en el chancado cuaternario se logra la disminución del tamaño de la granulometría de alimentación a molinos de barras y bolas, desde un P80 actual de 12,2 mm a un P80 de menos de 6 mm (entre 5,7 y 3,2 mm).

Cuarta

Las microfracturas generadas por los HPGR permitieron disminuir el Work Index (Wi) de 15,1 KW-h/TC a 13,7 KW-h/TC, lo que incrementa la capacidad de molienda y optimiza las etapas de procesamiento del mineral posteriores a la conminución.

Quinta

Con las tecnologías de HPGR se asegura incrementar la capacidad del chancado cuaternario a más de 63.000 Ton/día de mineral de cobre y cumplir con el requerimiento volumétrico de la planta, de por lo menos 60.000 Ton/día.

6.3. Recomendaciones

Primera

En base a los hallazgos encontrados, se recomienda la implementación del HPGR en operaciones con funciones de trituración tanto terciaria como cuaternaria, ya que representa un alto potencial para lograr menores costos operativos, al mismo tiempo se obtienen extracciones de minerales con mayor rentabilidad y más rápidas.

En tal sentido, se sugiere efectuar un análisis de costo – beneficio a mayor detalle, que incluya beneficios en el ahorro energético, la adquisición, instalación y configuración de tecnologías de HPGR en la cuarta etapa de chancado, que permitan a todas las empresas del rubro, beneficiarse con los aportes de la presente investigación.

Segunda

Se sugiere que se realice de manera periódica un análisis completo que contenga las propiedades geometalúrgicas del mineral procesado para obtener así un adecuado P80 de Chancado. Asimismo, en base a estos análisis, efectuar una inclusión de equipos o cambios en el modo de operación para nivelar los resultados y conseguir el producto deseado.

Tercera

Se deben realizar una mayor cantidad de pruebas pilotos, así como los respectivos ensayos en los laboratorios tomando en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación para generar modelos matemáticos que aseguren el producto deseado bajo cualquier tipo de mineral procesado. Para ello, la plataforma de simulación debe ser lo suficientemente robusta como para reproducir el rendimiento de los diversos tipos de mineral en los diversos escenarios que se pueden plantear para asegurar que el uso de la tecnología de HPGR pueda garantizar la capacidad de mineral requerido para ser tratado en la etapa de molienda.

Cuarta

Las nuevas metodologías de trabajo permiten al investigador recomendar que se debe siempre efectuar la prueba de porosimetría a las muestras para determinar el aumento de la porosidad y permeabilidad relacionada con el HPGR. En este sentido, pruebas comparativas de porosimetría indican que la trituración con HPGR genera aumentos de porosidad por microfractura entre 8 y 12% mayores que la trituración convencional. Mientras mayor porosidad por microfracturas tengan los fragmentos de minerales, mayor será su permeabilidad; por ende, más efectivos serán los procesos siguientes y la separación o extracción del mineral de la ganga que lo embebe.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Austin, L.G., Weller, K., y Lim, I. (1993). Phenomenological modelling of the high pressure grinding rolls. *In: XVIII International Mineral Processing Congress*, Sydney, Australia, pp. 87–95.
- Barrios, G., y Tavares, L. (2016). A preliminary model of high pressure roll grinding using the discrete element method and multi-body dynamics coupling. *Minerals Engineering*, v.156, p. 32-42, 2016.
- Basaez F. (2018). *Estudio de factibilidad técnica y económica de aumento de capacidad del proceso de chancado, en compañía minera altos Punitaqui, Chile*. Recuperado de: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47452/3560900257497UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Baum, W., Ausburn, K., (2011). HPGR comminution for optimization of copper leaching. *Minerals & Metallurgical Processing* 28 (2), 77–81.
- Baum, W., Patzelt, N., Knecht, J., (1996). *The use of high-pressure roll grinding for optimization of copper leaching*. SME Annual Meeting, Phoenix, Preprint 96-68.
- Beraldo, J. (1987). *Molienda de minerales en molinos tubulares*. São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blucher Ltda.
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. (3ra Ed.). Cundinamarca, Colombia: Pearson Educación, 2010 ISBN: 978-958-699-128-5. Recuperado de: https://www.academia.edu/25497606/Metodolog%C3%ADa_de_la_Investigaci%C3%B3n
- Bond, F. C. (1957). *Comminution Exposure Constant by the Third Theory. Three Principles of Comminution*. Min. Eng., December 1957, pp. 1372–1376.
- Broeckmann, C. y Gardula, A. (2005). Developments in high-pressure grinding technology for base and precious metal minerals processing. *Reprint of: Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Canadian Mineral*

- Processors*. Ottawa, Canadá, p.285-299. Recuperado de:
<https://wenku.baidu.com/view/1dd6306a011ca300a6c390e3.html>
- Carrasco, S. (2009). *Metodología de la investigación científica*. Lima, Perú: Editorial. San Marcos.
- Cepeda L. (2016) Modelamiento y simulación de un controlador mediante MPC de un molino de rodillos de alta presión (HPGR). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ecuador. Recuperado de:
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/12303>
- Chaves, A. (2006). *Molienda, engrosamiento y filtración - Curso de especialización en Sistemas minero-metalúrgicos*. Valer, Programa de Especialización Profesional, Fundación Gorceix - Escuela de Minas, UFOP, Brasil.
- Chávez E. (2019) Instalación de chancadora short head para mejorar el análisis granulométrico del producto del chancado en Sociedad Minera el Brocal S.A.A., Pasco-2019. Recuperado de:
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1889/1/T026_44895131_T.pdf
- Craig, J., y Vaughman, D. (1997). *Ore microscopy and ore petrography*. (2nd Ed.). Recuperado de:
http://www.minsocam.org/msa/openaccess_publications/craig_vaughan/
- Dunne, R., (2006). *HPGR – The journey from soft to competent and abrasive, SAG 2006*. University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canadá, pp. 190-205.
- Echavaudis, E., y Pérez, Y. (2017). *Determinación del tamaño de partícula optima en molienda para la concentración por flotación de sulfuro de plomo a partir de un mineral polimetálico*. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3785/Echavaudis%20Chavez-Perez%20Laura.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- FLSmidth (s.f.) *Molino de cilindros / horizontal / para mineral / de alta presión HPGR*. Recuperado de: <https://www.directindustry.es/prod/flsmidth-dorr-oliver-eimco/product-62016-1488757.html>
- Franklin, J. (1985). Suggested Method for determining Point Load Strenght. J. Rock Mech, Min. SCI & Geomech Abstr. Vol. 22Nro 2, pp. 51-60.
- Gaggiato, V. (2018). *Tratamiento mineral: conceptos, trituración y molienda*. Recuperado de: <https://www.infrabrasil.net.br/tratamento-de-minerios/>
- Hernández R, Fernández C. y Baptista P. (2014). *Metodología de la Investigación*. Editorial Mc Graw Hill. México.
- Hernández R., Fernández C., y Baptista P. (2006). *Metodología de la Investigación científica*. (4ª Edición), México D.F. Edit Mc Graw Hill. Recuperado de: <https://investigar1.files.wordpress>.
- JKTech (2014). JKSImMet User Manual and Supplementary Information Manual (Versión 6, Release 1), JKTech, Indooroopilly, Qld, Australia.
- Kawatra, S. (2006). *Advances in comminution*. Littleton, Colorado, USA: SME. p. 636-668. Recuperado de: [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=UY7fqVhR41oC&oi=fnd&pg=PP7&dq=KAWATRA,+S.+K.+\(Ed.\).+Advances+in+comminution,+Littleton:+SME,+2006.+p.+636-668.&ots=mXcrLaYRf-&sig=vSLxG8BYD11JiOL9lJdgY9HErPo#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=UY7fqVhR41oC&oi=fnd&pg=PP7&dq=KAWATRA,+S.+K.+(Ed.).+Advances+in+comminution,+Littleton:+SME,+2006.+p.+636-668.&ots=mXcrLaYRf-&sig=vSLxG8BYD11JiOL9lJdgY9HErPo#v=onepage&q&f=false)
- KHD Humboldt Wedag (s.f.). *Prensas de rodillos KHD Humboldt Wedag*. Recuperado de: <https://www.khd.com/roller-presses.html>
- King, R. (2001). *Modeling and simulation or mineral processing systems*. Boston: Butterworth-Heinemann. Recuperado de: https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=ajY2l2OL0p4C&oi=fnd&pg=PR5&dq=Modeling+and+simulation+of+mineral+processing+syste ms.&ots=GfTiHgWXZI&sig=D6-XKKV_7lt5G_rxVhmlveYfX0l#v=onepage&q=Modeling%20and%20simulation%20of%20mineral%20processing%20systems.&f=false
- Klymowsky, R., Patzelt, N., y Burchardt, E. (2002). *Selection and sizing of High Pressure Grinding Rolls*. Recuperado de:

<https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN048983856/Selection-and-Sizing-of-High-Pressure-Grinding/>

Koppert Aufbereitungstechnik (2018). *High-Pressure Grinding Roller Presses for Mineral Processing*. Brochure. Publicado en Junio de (2018) Alemania.

Luz, A, Sampaio, J., y França, S. (2010). *Tratamiento de Mineros*. (5. ed.) Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCT, p.896.

Medina J. (2019) Análisis de desviación de P80 en etapa de clasificación en planta de molienda. Universidad Técnica Federico Santa María – Chile. Recuperado de: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/48022/3560900260655UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Meraz, P. (2018). *El futuro alcanza a la minería de cobre con el HPGR*. Recuperado de: <https://www.linkedin.com/pulse/el-futuro-alcanza-la-mineria-de-cobre-con-hpgr-meraz-vinaja-/?originalSubdomain=es>

Metso Minería (s.f.). *Trituradora de alta presión con enfoque en la eficiencia*. Recuperado de: <https://www.metso.com/br/produtos/hrc-britador-de-rolos-de-alta-pressao-hpgr/>

Morley, C. (2006). High pressure grinding rolls - a technology review. *Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME)*. Estados Unidos de América: 2006. Recuperado de: <https://www.risoperglisposi.it/50952/2019-03-19/high-pressure-grinding-rolls-mining.html>

Morley, C. (2010). HPGR—FA. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 110 (1), 107-115. Recuperado de: <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n3/03.pdf>.

Morrell, S., Shi, F., Tondo, L.A. (1997). Modelling and scale-up of high pressure grinding rolls. In: *Proc. XX International Mineral Processing Congress. IMPC, Aachen, Germany*,

Oliveira, R. (2015). Análisis de desempeño de HRCTM HPGR en circuito piloto. 173 f. Tesis (Maestría) - Escuela Politécnica, Universidad de São Paulo,

- Brasil. Recuperado de:
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-20072016-080757/en.php>
- Outokumpu, I. (2002). *Grinding Technology*. Recuperado de:
<http://www.outokumpu.fi/mineralprocessing/grind-1b.htm>.
- Pavez, O. (2013). Molinos HPGR. Presentación en PDF. *II Encuentro Internacional de Metalurgia*, Perú (2013)
- Pizarro C. (2015) Análisis Comparativo de Modelos Fenomenológicos de HPGR. Universidad de Chile. Recuperado de:
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134948/Analisis-comparativo-de-modelos-fenomenologicos-de.pdf?sequence=1>
- Rashidi, S., Rajamani, R. y Fuerstenau, D. (2017). Review of the modelling of high pressure grinding rolls. *Kona Powder and Particle Journal*, N. 134, p. 125-140.
- Salazar O. (2018). *Aptitud en la molienda de minerales mixto para la liberación de oro a nivel experimental de la EMPRESA MACDESA – 2018*. Universidad Faustino Sánchez Carrión- Huacho. Recuperado de:
<http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/3859>
- Sampaio, J. A. y Delboni, H. (2006). *Cominution*. En: Fernandes, F. et al. (Ed.). *Tendencias tecnológicas Brasil: Geociencias y tecnología mineral*. Rio de Janeiro: CETEM / MCT, 2007. Parte 2, cap. 2, p. 103-131.
- Sánchez, J., Betancur, J., y Ocampo, L. (2016). Conminución y análisis granulométrico para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías de teléfonos móviles. *Gestión Ambiental*, (19) 2, p.240-251. ISSN electrónico 2357-5905. ISSN impreso 0124-177X. Recuperado de:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/58492/60350>
- Schneider, C. L., Alves, V. K., Austin, L. G. (2009). *Modeling the contribution of specific grinding pressure for the calculation of HPGR product size distribution*. *Min. Eng.* 22, 642–649.
- Schönert, K. (1988). First Survey of Grinding with High-Compression Roller Mills. *International Journal of Mineral Processing*, Vol.22, No.1-4, p. 401-

412. Recuperado de :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751688900750>
- Schumacher, M. y Theisen, W., (1997). *HEXADUR, A novel wear protection of high pressure roller presses for comminution*. No 11.5. Kipper.
- Soares, V. (2012). *Una revisión sintética de minerales, procesamiento de minerales y mineralogía aplicada*. Recuperado de:
https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9XLH5X/1/monografia___vinicius_soares.pdf
- Torres, M. (2010) *Modelación y simulación de molienda con rodillos a alta presión – HPGR*. Tesis de Grado, Universidad de Chile. Santiago de Chile. Recuperado de: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-torres_mr/pdfAmont/cf-torres_mr.pdf
- Torres, M. (2012). *The evolution of HPGR modelling*. In proceedings of MolyCop - XII Mineral Processing Symposium
- Torres, M. (2015). *Modelación y simulación de molienda con rodillos a alta presión – HPGR*. (Tesis de maestría) Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de:
<https://pdfs.semanticscholar.org/8de5/8adc5d18654bf8698ce466c3624d16710fc5.pdf>
- Torres, M., y Casali, A. (2009). A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls. *Min. Eng.* 22, 1137–1146. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/sdfe/reader/pii/S0892687509001198/pdf>
- Van Der Meer, F., y Maphosa, W. (2012). High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, (112) 7, 637-647. Recuperado de: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2225-62532012000700008
- Wills, B., y Nappier-Munn, T. (2016). *Mineral processing technology: An Introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. (8th. ed.) Amsterdam: Elsevier. Recuperado de:

[https://www.academia.edu/40297760/Mineral_Processing_Technology_A
n_Introduction_to_the_Practical_Aspects_of_Ore_Treatment_and_Miner
al_Recovery_by_Barry_A._Wills_Tim_Napier-Munn](https://www.academia.edu/40297760/Mineral_Processing_Technology_A_n_Introduction_to_the_Practical_Aspects_of_Ore_Treatment_and_Miner_al_Recovery_by_Barry_A._Wills_Tim_Napier-Munn)

Zumaran, D. (2017). *Evaluación de la influencia de las variables en la distribución granulométrica del producto de molienda por bolas de minerales mediante diseños experimentales*. (Tesis) Universidad Nacional de San Agustín. Recuperado de:
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3214>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGIA
Problema General ¿Cómo la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país?	Objetivo General Determinar como la implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como chancado cuaternario incide en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país.	Hipótesis General La implementación de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) como chancado cuaternario determinará en el incremento de la capacidad de molienda en una empresa minera al sur del país.	Variable (X) Tecnología de Rodillos de Alta Presión (HPGR)	Granulometría del producto deseado (P80)	Método: Analítico, deductivo, e hipotético. Tipo investigación: Aplicada Diseño investigación: Experimental Nivel o Alcance: Descriptivo – interpretativa. Enfoque de investigación: Cuantitativo Población: La población estará conformada por las actividades relacionadas con las etapas del Chancado Muestra:
Problema Especifico 1 1. ¿Cómo la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país?	Objetivo Especifico 1 Determinar cómo el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) logra la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país.	Hipótesis Especifica 1 La tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) producirá la granulometría del producto deseado (P80) del chancado cuaternario en una empresa minera al sur del país.		Capacidad de mineral requerido	

Problema Especifico 2 2. ¿Cómo el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementa la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país?	Objetivo Especifico 2 Identificar cómo el uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementa la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país.	Hipótesis Especifica 2 El uso de la tecnología de rodillos de alta presión (HPGR) incrementará la capacidad de mineral procesado en la molienda en una empresa minera al sur del país.	Variable (Y) Chancado Cuaternario	Etapas previas al Chancando Cuaternario	La muestra estuvo constituida por las actividades relacionadas con el Chancado Cuaternario. Técnica de recolección datos: Datos de Laboratorio, Técnica de la observación Métodos Análisis de Datos: Análisis de interpretación de resultados
---	---	---	--	--	--