



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Fuerzas de chancado y su relación con el desgaste en un chancador primario

POR

Christian Andrés Rojas López

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Cristian Rodríguez Godoy
Dr. Manuel Moncada Merino

Marzo 2024

© 2024 Christian Andrés Rojas López
Concepción (Chile)

© 2024 Christian Andrés Rojas López

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

En el presente trabajo quiero agradecer a mi padre y madre por brindarme apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica, por darme cada consejo cuando más lo necesitaba, por darme las herramientas para el día de hoy estar aquí, por darme fuerzas y palabras de apoyo cuando más lo necesité, por jamás dejarme solo, ustedes son parte fundamental de mi vida y mis estudios.

Agradecer a mi hermano menor Martín por siempre estar a mi lado en todo momento desde que comencé la carrera abrazándome siempre que estaba frustrado muchas veces sin entender el motivo, pero dando el apoyo necesario para seguir, ante todo. Por acompañarme en cada logro a lo largo de la vida.

Además, quisiera agradecer a Monse, mi pareja, por siempre apoyarme y darme amor a plenitud cuando mi cabeza no daba más de estrés, por siempre creer en mí, por entenderme cuando debía pasar días trabajando, siempre teniendo palabras de aliento y cariño cuando más lo necesitaba.

Agradecer a Dios por la vida y las herramientas brindadas para completar esta etapa estudiantil.

Se agradece a ESSS Group S.A por la cesión de licencias de investigación para este proyecto en el marco de la vinculación estratégica con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción.

Powered@SouthernGPU: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del Southern GPU Cluster - Fondecip EQM150134.

Resumen

Los chancadores representan una pieza fundamental en el proceso minero del cobre chileno. Debido a su alto consumo energético y costos operativos elevados, resulta de vital importancia comprender sus principales parámetros, tales como potencia, torque y desgaste, entre otros.

Recientemente, el método de elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés) se ha utilizado ampliamente para calcular estos parámetros de chancado. Este método permite simular de manera precisa los diversos procesos mineros [Weerasekara et al., 2013]. DEM es un enfoque numérico que calcula la interacción y dinámica de partículas en entornos físicos y mecánicos [Cundall y Strack, 1979].

El estudio del desgaste brinda la oportunidad de analizar y mejorar la vida útil del revestimiento. Dado que uno de los mayores costos asociados al proceso de chancado es el reemplazo de los revestimientos desgastados [Walker, 2012], mejorar en este aspecto significaría una disminución considerable en los costos operativos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo DEM que permita modelar y cuantificar las fuerzas presentes en las distintas zonas del chancador y obtener su relación con el desgaste del revestimiento. Esto facilitaría la predicción de las áreas más propensas al desgaste, permitiendo así optimizar la gestión de mantenimiento y la durabilidad del revestimiento, aumentando la disponibilidad del chancador. El chancador utilizado en este estudio es un Metso Superior 60-89, ubicado en la mina *Highland Valley Copper* en Canadá. Este chancador fue analizado y medido experimentalmente por Rosario [Rosario, 2003], quien evaluó el desgaste a través de sensores láser durante los períodos de mantenimiento de la máquina.

Una vez obtenido el modelo, se obtuvieron buenos resultados en flujo másico, potencia y distribución de tamaño, teniendo errores de 3,3%, 38,5% y 20,1% respectivamente. Por otro lado, se obtiene las zonas con mayor presencia de fuerzas que corresponden al rango entre 0,8 y 1,6 metros de altura, no obstante, la zona de mayor desgaste corresponde a la altura de 0,5 metros del chancador.

Palabras clave: Chancador, Desgaste, DEM, Fuerzas.

Abstract

Crushers represent a fundamental role in the mining process of Chilean copper. Due to their high energy consumption and elevated operational costs, it is of vital importance to understand their main parameters, such as power, torque, and wear, among others.

Recently, the Discrete Element Method (DEM) has been widely used to calculate these crushing parameters. This method allows for precise simulation of various mining processes [Weerasekara et al., 2013]. DEM is a numerical approach that calculates the interaction and dynamics of particles in physical and mechanical environments [Cundall and Strack, 1979].

Studying wear provides the opportunity to analyze and improve the lifespan of the lining. Since one of the major costs associated with the crushing process is the replacement of worn linings [Walker, 2012], improvement in this aspect would mean a considerable decrease in operational costs.

The objective of this work is to develop a DEM model that allows for modeling and quantifying the forces present in the different zones of the crusher and to relate them to the lining wear. This would facilitate the prediction of the most prone wear areas, thus optimizing maintenance management and lining durability, increasing the availability of the crusher. The crusher used in this study is a Metso Superior 60-89, located at the *Highland Valley Copper* mine in Canada. This crusher was analyzed and experimentally measured by Rosario [Rosario, 2003], who evaluated wear using laser sensors during machine maintenance periods.

Once the model was obtained, good results were achieved in mass flow, power, and size distribution, with errors of 3.3%, 38.5%, and 20.1%, respectively. On the other hand, the zones with the greatest presence of forces correspond to the range between 0.8 and 1.6 meters in height; however, the zone with the greatest wear corresponds to a height of 0.5 meters of the crusher.

Keywords: Crusher, DEM, Force, Wear.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	v
Lista de Tablas	vii
Lista de Figuras.....	viii
Glosario	ix
1 CAPÍTULO 1	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Hipótesis o condiciones de diseño.....	4
1.4 Metodología de trabajo	4
2 CAPÍTULO 2	5
2.1 Modelos DEM	5
2.2 Desgaste en chancadores	7
3 CAPÍTULO 3	9
3.1 Chancado	9
3.2 Tipos de Chancadores.....	9
3.3 Modelación del chancador.....	11
3.4 Modelo de fuerzas.....	14
4 Capítulo 4	18
4.1 Dinámica de las partículas	18
4.2 Modelo de contacto	18
4.3 Modelo de fractura.....	20
4.4 Modelo de distribución de tamaño	22
5 Capítulo 5	23
5.1 Modelación de un chancador giratorio	23
6 CAPITULO 6	28
6.1 Modelo DEM.....	28
6.2 Validación.....	29
6.3 Análisis de desgaste.....	32
7 Capítulo 7	39
7.1 Conclusiones.....	39
7.2 Perspectiva.....	40

Referencias 41

Lista de Tablas

Tabla 5.1. Parámetros geométricos y materiales de las geometrías de la simulación DEM.	24
Tabla 5.2. Parámetros del modelo de contacto.....	24
Tabla 5.3. Parámetros del modelo de fractura para mineral de cobre [De Arruda y Tavares, 2021].	25
Tabla 5.4. Parámetros de material [André y Tavares, 2020].....	26
Tabla 5.5. Parámetros de forma de las partículas [André y Tavares, 2020].	27
Tabla 6.1. Rangos de estudio del chancador.	35

Lista de Figuras

Figura 1.1. Partes de un chancador giratorio: (a) Excéntrica; (b) Eje motriz; (c) Poste; (d) Manto; (e) Araña; (f) Cóncava [Fuente: FLSmidth, 2021].	2
Figura 3.1. Esquema del proceso de conminución: (a) chancador primario, (b) harnero primario, (c) chancadores secundarios, (d) harneros secundarios, (e) chancadores terciarios, (f) harneros terciarios [Fuente: Moncada, 2022].	10
Figura 3.2. Plano de corte de un chancador de cono a) Hydrocone, b) Symons [Fuente: Quist et al., 2017].	12
Figura 3.3. Movimiento de una partícula respecto con el sistema de coordenadas en rotación. a) Las componentes de aceleración; b) Fuerzas que actúan sobre la partícula [Fuente: Evertsson, 1999].	14
Figura 3.4. Esquema del balance de fuerzas externas sobre el poste [Fuente: Svensson y Steer, 1990].	15
Figura 3.5. Distribución de presión mostrado en la sección transversal horizontal del chancador [Fuente: Lindqvist y Evertsson, 2004].	16
Figura 3.6. Sección transversal de la cámara de chancado [Fuente: Liu et al., 2018].	16
Figura 4.1. Región vecina de una partícula en Rocky [Fuente: Rocky DEM, 2020].	21
Figura 5.1. Geometría empleada para la simulación del chancador giratorio.	23
Figura 5.2. Curva de energía del parámetro ajustado por los investigadores y el propuesto.	26
Figura 5.3. Forma de las partículas diseñadas en el modelo DEM para la trituración: (a) partícula 1, (b) partícula 2, (c) partícula 3, (d) partícula 4.	27
Figura 5.4. Granulometría de alimentación y producto del chancador giratorio [Fuente: Simkus y Dance, 1998].	27
Figura 6.1. Captura de Pantalla de la simulación del chancador primario en $t = 15,25$ segundos mostrando la sección frontal del chancador. Las partículas están coloreadas de acuerdo con el tamaño de las partículas, además posee un corte en la cóncava para visualizar las partículas.	28
Figura 6.2. Masa acumulada a través del tiempo.	29
Figura 6.3. Potencia eléctrica de las mediciones experimentales [Fuente: Rosario, 2003].	31
Figura 6.4. Potencia de chancado de la simulación DEM.	31
Figura 6.5. Granulometría del producto de la Simulación DEM.	32
Figura 6.6. Fuerzas nodales en el tiempo 26,6 segundos.	33
Figura 6.7. Magnitudes de las fuerzas normales respecto a la altura del manto del chancador.	34
Figura 6.8. Magnitudes de las fuerzas tangenciales respecto a la altura del manto del chancador.	34
Figura 6.9. Fuerza normal resultante clasificada por zona.	35
Figura 6.10. Fuerza tangencial resultante clasificada por zona.	36
Figura 6.11. Curvas probabilísticas de las fuerzas normales y tangenciales.	36
Figura 6.12. Desgaste medido experimentalmente del manto del chancador respecto a su altura [Fuente: Rosario, 2003].	37

Glosario

BPM	Modelo de partículas unidas
DEM	Método de elementos discretos
CSS	Ajuste de lado cerrado
OSS	Ajuste de lado abierto
ROM	<i>Run of Mine</i>
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
Tph	Toneladas por hora
PRM	Modelo de fractura de reemplazo de partículas
PSD	distribución de tamaño

Variables

a	Aceleración
\bar{d}_j	Tamaño medio de la partícula J
\bar{d}	Tamaño promedio de todas las partículas
E	Energía
$E_{Rittinger}$	Consumo de energía de Rittinger
E_{Kick}	Consumo de energía de Kick
E_{Bond}	Consumo de energía de Bond
e_{50}	Energía de fractura específica mediana de la partícula
e^*	Energía de fractura
e_{50b}	Energía de fractura específica media de las partículas trituradas
F	Fuerza
f_{80}	Tamaño al que se encuentra el 80% de las partículas de alimentación
g	Gravedad
g_1	Función inversa de la distribución de tamaño del producto
g_2	Función inversa de la distribución de tamaño de la alimentación
I_i	Inercia de la partícula i
i_{act}	Relación de compresión real en la cámara
kW	Kilo Watts
K	Rigidez
k_m	Constante de la máquina trituradora
m	Masa
\dot{M}	Flujo másico del producto
N_{res}	Fuerza resultante ejercida por el manto del chancador sobre la partícula
P	Potencia
p	Presión
P_o	Potencia en vacío
P_{ch}	Potencia de chancado

p_{80}	Tamaño al que se encuentra el 80% de las partículas del producto
r	Posición relativa de la partícula respecto al sistema de coordenadas en rotación
R	Reacción
R_a	Radio del manto
R_b	Radio del revestimiento
S_n	Traslado normal
T	Torque
t_{10}	Porcentaje de fragmentos pasante de tamaño 10 veces inferior al tamaño original de las partículas
t_n	Porcentaje de fragmentos pasantes en una malla de tamaño n veces más pequeños que el tamaño original
v	Velocidad
ω	Velocidad angular
W_{Bond}	Índice de trabajo de Bond
W_{kick}	Índice de trabajo de Kick
W_{Matt}	Índice de trabajo de Lindqvist
W_{Ritt}	Índice de trabajo de von Rittenger
θ	Ángulo entre la dirección de la fuerza de gravedad y el eje y
ξ	Ángulo entre el eje x y la fuerza de roce
γ	Ángulo entre la fuerza resultante del manto del chancador sobre la partícula y la fuerza normal del manto
λ_j	Rendimiento del tamaño de la partícula j

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

La minería nacional tiene un impacto significativo en la economía de Chile y es uno de los principales impulsores del crecimiento económico del país. Según estudios realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en 2021, la minería chilena representó el 14,6% del PIB nacional [SERNAGEOMIN, 2021].

Dentro de la industria minera, existen diversos procesos, siendo uno de los más importantes el proceso de conminución. Este proceso consiste en la fractura de grandes rocas mediante esfuerzos mecánicos para obtener fragmentos más pequeños, la granulometría presente en el flujo de entrada es variable con tamaños máximos de hasta 1,5 metros [Mosher, 2011]. Los fragmentos obtenidos en la mina pasan por varias etapas del proceso de conminución para obtener el producto final.

La conminución se divide en dos categorías principales: trituración y molienda. Esta última, es el proceso donde se reduce el material chancado a tamaño de micras para su posterior proceso de concentración de flotación [Merello, 2016]. Por otro lado, la etapa de trituración tiene la función de reducir el tamaño de las rocas, de esta manera los procesos posteriores puedan transportar de mejor manera el mineral y mejorar la eficiencia energética en el proceso [Mosher, 2011].

Existen varios tipos de chancadores, como los de mandíbula, giratorio, de cono, de rodillo y de impacto. Los chancadores primarios suelen ubicarse en minas subterráneas debido a la complejidad de llevar las grandes rocas a la superficie, dado esto se opta por reducir el tamaño de las rocas antes de su transporte [Jeswiet y Szekeres, 2015].

El proceso de chancado o trituración comienza con el chancador primario, que puede ser de mandíbula cuando el flujo de alimentación es bajo, o giratorio cuando el flujo de alimentación es elevado y supera las 1000 [tph] [Mosher, 2011]. En las mineras chilenas, los chancadores giratorios son los más utilizados en comparación con los chancadores de mandíbula [Merello, 2016]. La potencia requerida en el proceso de conminución puede variar entre 180 [kW] y 1200 [kW], dependiendo de la aplicación [Jeswiet y Szekeres, 2015].

Un chancador giratorio consiste en un poste con giro excéntrico que tiene un cono como elemento de molienda. El cono está cubierto por un manto, que es un elemento de desgaste. El poste está apoyado en la parte superior por una estructura llamada araña y en su zona inferior por un hidrosset (un sistema hidráulico ajustable verticalmente) y por una plataforma excéntrica a través de un buje. Las principales partes se pueden ver en la Figura 1.1.

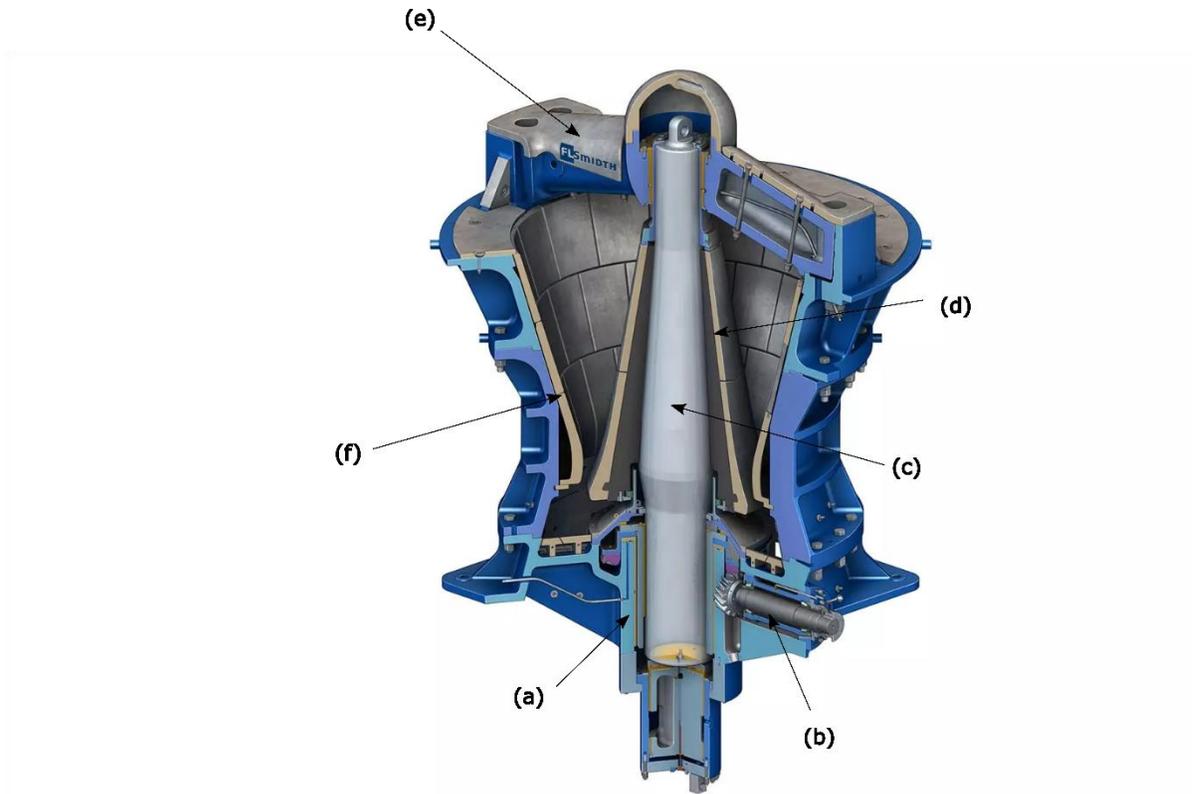


Figura 1.1. Partes de un chancador giratorio: (a) Excéntrica; (b) Eje motriz; (c) Poste; (d) Manto; (e) Araña; (f) Cóncava [Fuente: FLSmidth, 2021].

El objetivo principal del chancador giratorio es comprimir partículas entre dos superficies, la fractura de la partícula se logra a través de dos modos de rotura por compresión: rotura de partículas individuales y rotura entre partículas. La compresión se realiza mediante un movimiento nutacional en un cono interior, mientras que el cono exterior denominado cóncava permanece fijo [Quist et al., 2016].

La compresión del mineral se produce entre el manto y la cóncava. El espacio más pequeño entre el cono y la cóncava se denomina ajuste de lado cerrado (CSS), mientras que el espacio más grande es el ajuste de lado abierto (OSS) [Toledo, 2022].

El chancador giratorio se alimenta con material *Run of Mine* (ROM), que es la roca extraída en la mina sin procesar, y la alimentación se controla para asegurar el funcionamiento óptimo del chancador, a través de un operador en la sala de control, buscando mantener una alimentación uniforme evitando los aumentos de potencia que provoca la alimentación no uniforme [Toledo, 2022].

Debido a su alto consumo energético, el cuidado y mantenimiento de los chancadores giratorios en las plantas mineras es de vital importancia. El desgaste es un problema grave, ya que el constante uso y la presión ejercida por la trituración de las rocas ocasionan un desgaste irregular en la geometría del revestimiento afectando el tamaño del espacio y el perfil de la cámara [Lindqvist y Evertsson, 2006].

Además, perjudica el costo y la calidad del producto, afectando la uniformidad del tamaño de las partículas y el rendimiento del equipo. De esta manera se reduce la vida útil del revestimiento, lo que se traduce en un costo elevado para la planta, ya sea por la necesidad de reemplazar el revestimiento desgastado o por la variabilidad en la trituración [Walker, 2012].

Es por esto, que existe el interés de analizar y cuantificar el desgaste, ya que, lograr predecir la magnitud total del desgaste en un periodo de tiempo establecido permitirá a las plantas mineras planificar mantenciones preventivas, evitando que la máquina falle inesperadamente o se realice una mantención por bajo rendimiento aumentando de esta manera la disponibilidad de la máquina minera.

De esta manera para aumentar la disponibilidad del chancador los investigadores en los últimos años se han centrado en buscar la manera de mejorar y optimizar el rendimiento de cada maquinaria mediante método de elementos discretos (DEM por sus siglas en inglés). DEM es una técnica de simulación computacional utilizada para modelar el comportamiento de partículas individuales y las interacciones que posee en entornos físicos y mecánicos, estas interacciones son monitoreadas contacto a contacto, aplicando el movimiento a cada partícula [Cundall y Strack, 1979], en el caso específico de los chancadores, los autores han variado diversos parámetros operacionales, tales como: apertura CSS, velocidad de rotación, torque, entre otros [Cleary et al., 2015, Cleary et al., 2017, Moncada, 2022].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

OG1: Modelar un chancador giratorio mediante el método de elementos discretos para su posterior análisis de las fuerzas de chancado.

1.2.2 Objetivos Específicos:

OE1. Replicar la geometría de un chancador mediante un modelo CAD.

OE2. Analizar y determinar los parámetros del mineral de cobre.

OE3. Implementar un modelo DEM del chancador diseñado.

OE4. Validar el modelo DEM mediante mediciones experimentales de la literatura.

OE5. Realizar un postproceso de las fuerzas aplicadas en el manto.

1.3 Hipótesis o condiciones de diseño

Es posible obtener un modelo DEM de un chancador giratorio que se pueda validar mediante mediciones experimentales de la literatura para analizar las fuerzas de chancado.

1.4 Metodología de trabajo

Para simular el comportamiento del chancador giratorio Metso superior 1,52 x 2,26 metros se empleará la geometría utilizada en el estudio de Rosario [Rosario, 2003]. Mediante el software numérico Rocky-DEM se llevará a cabo la simulación del comportamiento del chancador, utilizando los parámetros operativos específicos, para describir el movimiento y trituración del chancador. A través de una revisión bibliográfica se procederá a obtener y caracterizar las partículas de cobre que se someterán al proceso de trituración. Posteriormente se realizará un postproceso de datos para analizar la relación entre las fuerzas y el desgaste.

CAPÍTULO 2

Estado del arte

En este capítulo se presentan los estudios realizados de chancadores en método de elementos discretos y los estudios de desgaste en chancadores.

2.1 Modelos DEM

Legendre y Zevenhoven [Legendre y Zevenhoven, 2014] modelaron un chancador de mandíbula utilizando DEM para simular la ruptura de partículas, el objetivo de esta investigación radicaba en obtener mejoras en los parámetros de diseño de la maquinaria de conminución para obtener valores de eficiencia energética más altos, dado que en su investigación obtuvieron que la eficiencia del uso de la energía en equipos de conminución es inferior a 10%.

Delaney et al. [Delaney et al., 2015] desarrollaron un modelo DEM de un chancador de cono para predecir la rotura y el flujo de partículas no esféricas a escala industrial. Se utiliza un modelo de fractura de reemplazo de partículas (PRM) y un modelo t_{10} para determinar el tamaño de las partículas luego de la fractura. El análisis de las simulaciones realizadas permite predecir el consumo de energía y obtener una distribución de tamaño de las partículas (PSD).

En la investigación realizada por Cleary [Cleary et al., 2015] se realizó un estudio exhaustivo sobre la simulación de flujos de partículas y la fragmentación en chancadores utilizando DEM, los equipos de trituración simulados son chancador de cono, giratorio, de mandíbula, de impacto y de doble rodillo. Se modela la fractura de estas simulaciones con el modelo PRM, y a partir de los resultados realizaron estimaciones de potencia, tamaño de partícula del producto, rendimiento y estimación de desgaste en algunos componentes de los equipos de conminución, estos parámetros son útiles para la optimización de operación del chancador.

Posteriormente, Cleary modeló un chancador de cono utilizando el modelo de fractura formulado por Delaney [Delaney et al., 2015], en esta investigación se analizó el comportamiento que posee el chancador ante diferentes condiciones de operación al variar CSS velocidad de rotación, parámetros del material, entre otros. Esta variación permite analizar el rendimiento operativo al que se somete el chancador durante su funcionamiento [Cleary et al., 2017].

En la investigación de Johansson et al. [Johansson et al., 2016] obtuvieron la potencia de un chancador de cono de laboratorio Morgårdshammar B90 ubicado en el laboratorio de rocas Chalmers en Gotemburgo, Suecia. Este chancador posee un variador de velocidad, que permite controlar la velocidad excéntrica del eje principal.

Para la validación del modelo se comparan los resultados de tamaño de partículas entre lo obtenido a partir de la simulación DEM y lo medido experimentalmente. Para esto se utilizó un diseño de revestimiento mecanizado utilizando material Uddeholm Nimax.

En la modelación DEM Johansson et al. [Johansson et al., 2016] utilizaron el software EDEM 2.7, para la fractura de las partículas utilizaron el modelo de partículas unidas, para modelar el movimiento rotatorio del poste en el software utilizaron 2 rotaciones sinusoidales considerando un desfase de 90° entre ambas rotaciones, además para el contacto se utilizó el modelo de *Hertz-Mindlin no slip*. Al obtener los resultados de potencia de la simulación y del análisis experimental, para dos velocidades de rotación no se obtuvieron los valores esperados manteniendo una gran diferencia entre las magnitudes simuladas y las medidas experimentalmente. Además, en su investigación analizaron la distribución de tamaño para un CSS de 2,2 mm, se obtuvieron buenos resultados al comparar lo experimental y lo simulado. De los cuales se destaca la gran concordancia de distribución a la velocidad de 20 Hz, no obstante, no sucede lo mismo para el caso de 10 Hz donde presenta grandes diferencias en la región gruesa.

En la investigación realizada por Chen se modelo en el software EDEM un chancador giratorio que tritura el mineral de hierro. Para la fractura del mineral se utilizó un modelo de partículas unidas (BPM). En este trabajo se estudió y analizó la distribución de las fuerzas de trituración y el PSD. Con el modelo ya desarrollado se buscó realizar una optimización del equipo variando los parámetros hasta encontrar los valores ideales que mejorarían el rendimiento del equipo mediante dos objetivos principales: maximizar la capacidad de producción y minimizar las fuerzas de trituración [Chen et al., 2020].

André y Tavares [André y Tavares, 2020] desarrollaron un modelo DEM de un chancador de cono de laboratorio utilizando partículas poliédricas, presentan distintos modelos de rotura de las partículas. Sus resultados concuerdan con los obtenidos experimentalmente para el rendimiento con un error relativo del 9,6, 10,4 y 37,9% para los tres casos de estudios presentados, no obstante, en la energía específica y tamaño de productos, la desviación se eleva considerablemente hasta un 50%.

Barrios et al. [Barrios et al., 2020b] en su investigación simularon en EDEM un chancador de mandíbula a escala del laboratorio de Otsuka Iron Works Ltd. Cada trituración por lotes utilizó alrededor de 6 kg con una distribución de tamaño específica, para las mediciones experimentales se utilizaron celdas integradas acopladas a un Arduino UNO para la obtención de los datos.

El material utilizado en la investigación es un mineral aurífero de la mina San José en Iquira, este mineral es una roca ígnea intrusiva compuesto principalmente por cuarzo, feldespato y en porcentajes menores posee pirita, galena, hematita y arsenopirita, este mineral posee tamaño de grano grueso a medio.

Para su modelación de fractura utilizó un modelo PRM, este fue desarrollado por Barrios et al. [Barrios et al., 2020a]. En la experiencia se realizó un análisis de sensibilidad del modelo para analizar los efectos del CSS, frecuencia, potencia, la fuerza compresiva y la relación de reducción. Las simulaciones fueron validadas mediante mediciones experimentales, obteniendo buena concordancia

entre estos valores. Los resultados describieron el rendimiento en términos de la distribución de tamaño, fuerza de compresión, relación de reducción y consumo de energía.

En la investigación de Moncada et al. [Moncada et al., 2021] realizaron una simulación DEM en Rocky de un chancador giratorio Metso 60-110, utilizando el modelo de fractura de Tavares. En la investigación se propuso una nueva representación de las fuerzas radiales en coordenadas polares, la cual permite ayudar a diseñadores a analizar y comprender las zonas más críticas del manto y como se distribuyen las fuerzas aplicadas sobre el manto, este modelo además fue validado con datos de operación nominal del chancador.

2.2 Desgaste en chancadores

Las principales causas del desgaste en los elementos de un chancador se tienen, una mala alimentación de la máquina, es decir, un flujo con fragmentos más finos para el que está diseñado, de esta manera la trituración es realizada en el extremo de la descarga de la cámara [Bearman et al., 1998]. Otro caso importante de desgaste es la mala distribución del tamaño del mineral, lo que provoca un desgaste preferencial en el punto de la cámara de trituración donde se está produciendo la mayor cantidad de rotura. El último caso es la subalimentación del chancador, este factor consiste en un entorno de flujo de entrada que no está siendo suministrado en la cantidad adecuada o en el flujo másico correcto, esto provoca que, durante el funcionamiento del chancador la trituración sea errática y poco precisa lo que aumenta las probabilidades de falla del revestimiento [Bearman et al., 1998].

En el estudio de Lindqvist y Evertsson [Lindqvist y Evertsson, 2006], desarrollaron un modelo de desgaste para chancadores que incorpora de manera efectiva las fuerzas de corte a lo largo de las superficies de trituración. Se llevó a cabo una comparación entre las simulaciones y mediciones realizadas en diferentes cámaras de trituración, y se observó una mejora significativa en la capacidad predictiva de la geometría de desgaste. Además, se realizaron mediciones de parámetros operativos como la presión del sistema hidráulico y el consumo de energía, encontrando cierta concordancia entre los datos medidos y los simulados. Es importante destacar que el modelo aún no ha sido ejecutado en condiciones ideales en todo momento, lo cual es una limitación que se señala en el estudio. Sin embargo, este trabajo proporciona una mejor comprensión de los factores que influyen en el desgaste de los chancadores, destacando la importancia de considerar las fuerzas de corte en los modelos de desgaste.

En la investigación de Rosario [Rosario, 2003] estudiaron el desgaste del revestimiento y el rendimiento de los chancadores giratorios primarios en operaciones mineras. El estudio se centró en la correlación entre el desgaste de los revestimientos y el rendimiento. Se utilizó un dispositivo de medición láser para tomar mediciones de desgaste en chancadores en servicio, y se correlacionó esta información con los datos de producción del chancador. Los resultados del estudio indican que el desgaste de los revestimientos tiene un impacto significativo en el rendimiento del chancador, y que

la optimización del manejo de los revestimientos puede mejorar la eficiencia y la rentabilidad de las operaciones mineras.

En la investigación de Quist et al. [Quist et al., 2016] presentaron los resultados de un estudio en el que se utilizó DEM para examinar cómo el desgaste del revestimiento afecta la eficiencia de los chancadores giratorios. El objetivo principal del estudio fue evaluar el impacto del desgaste del revestimiento en la capacidad y fragmentación de la trituración mediante la utilización de datos escaneados en 3D de aplicaciones reales de trituración. Los investigadores concluyeron que el uso de datos escaneados en 3D proporciona información de calidad para el modelo DEM y para evaluar cómo el desgaste influye en la operación de trituración. Además, se creó un nuevo modelo BPM que incorpora la distribución de tamaño de partícula fraccionada y la forma de meta-partícula basada en la geometría escaneada de la roca real. También se encontró que el rendimiento de producción de los chancadores giratorios varía significativamente entre los revestimientos nuevos y desgastados, incluso cuando se utiliza la posición vertical del manto para compensar el desgaste y mantener el ajuste objetivo del CSS.

CAPÍTULO 3

Marco Teórico

3.1 Chancado

La conminución es un proceso mecánico esencial en las industrias mineras, que involucra tanto la trituración como la molienda. Este proceso reduce el tamaño del mineral a dimensiones manejables para las etapas subsiguientes de procesamiento. La trituración generalmente se lleva a cabo en condiciones de sequedad y consta de varias etapas, donde el tamaño del material se reduce a aproximadamente una sexta parte de su tamaño inicial [Jeswiet y Szekeres, 2016].

Los chancadores están presentes en el proceso de chancado, que es la primera etapa del proceso de conminución, y suelen estar en minas subterráneas donde reducen el material antes de transportar, ya que, al reducir el tamaño de las partículas se mejora la eficiencia y facilidad de transporte del mineral a través de cintas transportadoras hasta los procesos posteriores [Jeswiet y Szekeres, 2016].

En la operación del chancador se puede controlar el tamaño del producto, la velocidad y el flujo de entrada ajustando la tolva de alimentación, tanto para cambiar el tamaño del producto como para compensar el desgaste del revestimiento [Moncada, 2021].

El chancado se realiza en tres etapas principales: primaria, secundaria y terciaria, tal como se muestra en la Figura 3.1. El proceso de chancado comienza con el chancador primario (a) que tritura el material ROM, el flujo triturado es recibido por el harnero primario (b) que separa estas rocas mediante una malla de 5 cm aproximadamente, el material menor o igual a estas dimensiones es llevado directamente al chancador terciario (e) que vuelve a triturar y filtrar en el harnero terciario (f), que posee una malla aproximada de media pulgada. El mineral mayor a 5 cm que quedó sobre la malla del harnero primario (b) será llevado al chancador secundario (c) donde será nuevamente triturado para posteriormente ser llevado al harnero secundario (d), este posee la misma abertura del harnero terciario (f), luego el mineral de menor dimensión ya es considerado producto final y el de mayor dimensión pasa al chancador terciario (e) completando el ciclo [Moncada, 2022].

3.2 Tipos de Chancadores

En esta sección se detallará y describirá los principales tipos de chancadores presentes en el proceso de conminución.

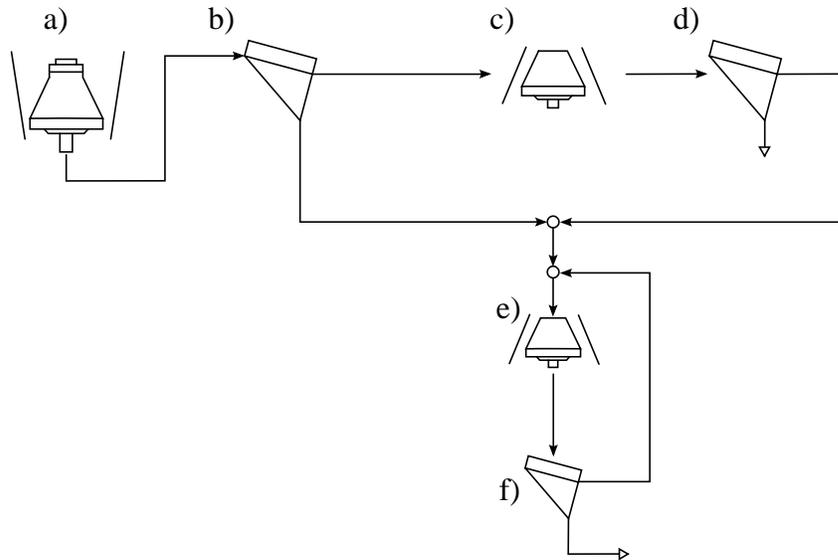


Figura 3.1. Esquema del proceso de conminución: (a) chancador primario, (b) harnero primario, (c) chancadores secundarios, (d) harneros secundarios, (e) chancadores terciarios, (f) harneros terciarios [Fuente: Moncada, 2022].

3.2.1 Chancador giratorio

La máquina de chancado giratoria o primaria consta de una cabeza móvil y una carcasa cóncava fija. La cabeza es un cono truncado cubierto por una pieza de desgaste llamada manto, y el componente exterior es una estructura cóncava fija. La cámara de chancado es el espacio entre las superficies del manto y la cóncava [Chen et al., 2020]. El chancador giratorio es utilizado principalmente en la trituración primaria de los minerales metálicos como lo son el hierro y el cobre, como es el caso de la minería chilena [Chen et al., 2020].

La velocidad de rotación en el chancador primario puede variar entre 85 y 150 [rpm] [Toledo, 2022]. La cámara de trituración durante el funcionamiento del chancador interactúa directamente con el mineral, dado esto, el rendimiento de la máquina depende del funcionamiento de la cámara. Dentro de los factores que se pueden destacar se tiene el movimiento del eje, la geometría del manto, ángulo de inclinación del poste, velocidad del eje, entre otros.

La acción de compresión del mineral se realiza con un movimiento nutacional en un cono interior mientras que un cono exterior permanece fijo. Se utiliza un buje excéntrico para transferir el movimiento de rotación del eje de transmisión al eje principal a través de una corona dentada. El manto gira libremente alrededor del eje principal y rueda sobre el lecho de partículas de roca, actuando como una rueda planetaria en un engranaje planetario [Quist et al., 2016].

3.2.2 Chancador de cono

Los chancadores de cono tienen un funcionamiento similar al chancador giratorio, compartiendo piezas principales, la gran diferencia radica en que estas piezas son de menor dimensión. Dado esto, es más recurrente encontrar este tipo de chancador en la etapa secundaria y terciaria del chancado [Johansson et al., 2017].

De esta manera al igual que en los chancadores primarios, la trituración se produce mediante la compresión del manto que es el elemento móvil y la cóncava que es fija. A diferencia del chancador giratorio, los chancadores de cono giran a una velocidad entre 700 a 1000 [rpm]. Existen dos tipos de diseños principales de máquinas trituradoras de cono: el diseño Hydrocone y el diseño Symons [Quist et al., 2017].

a) Hydrocone

El diseño del chancador Hydrocone incluye un eje principal que se apoya horizontalmente en un cojinete liso en la parte superior y en un cojinete liso radial en la parte inferior. El componente de fuerza vertical se maneja a través de un cojinete liso axial en el extremo del eje que está conectado a un pistón hidráulico para el posicionamiento vertical del conjunto del eje y el manto. La posición vertical del eje principal y el manto se utiliza para controlar el CSS.

b) Symons

En cambio, el chancador Symons cuenta con un cojinete liso con forma esférica en la parte superior del eje principal que maneja la fuerza vertical, mientras que el componente de fuerza horizontal se maneja solo mediante el cojinete liso radial excéntrico.

En la Figura 3.2 se tienen los principales componentes presente en estos dos tipos de diseño de chancadores de cono en la sección transversal de ellos.

3.3 Modelación del chancador

A continuación, se presentarán los diferentes modelos de potencia, fuerzas y modelo energético de un chancador.

3.3.1 Potencia

El movimiento excéntrico o nutacional se produce debido al montaje del manto del chancador, donde el eje principal descansa en un casquillo excéntrico, de esta manera se crea un ángulo entre eje del manto y el eje principal [Gröndahl et al., 2018], este movimiento es producido por un motor eléctrico que está instalado mediante un acople al contra eje, y que está conectado a la excéntrica mediante un

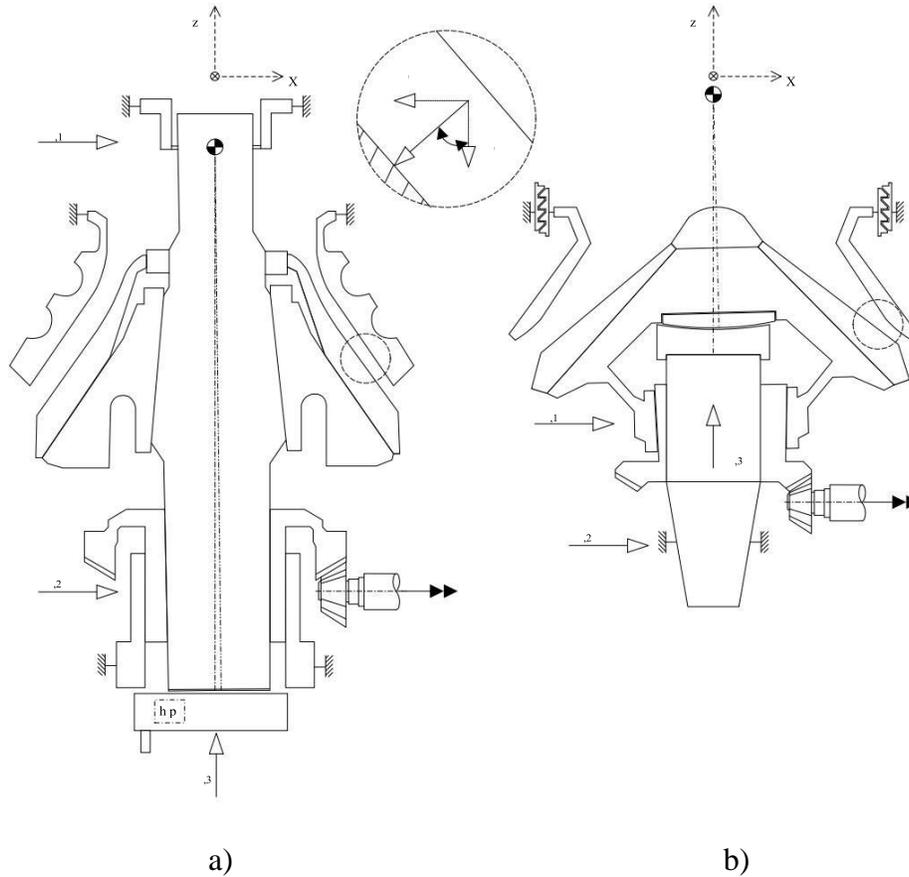


Figura 3.2. Plano de corte de un chancador de cono a) Hydrocone, b) Symons [Fuente: Quist et al., 2017].

engranaje helicoidal [Moncada, 2021]. Mediante un estudio de potencia consumida por el motor a una tasa de muestreo elevada es posible estimar el cambio en las fuerzas que actúan sobre el manto a través del tiempo [Gröndahl et al., 2018].

De esta manera para calcular la potencia se debe obtener y analizar la potencia en vacío P_0 y potencia de chancado P_{ch} , quedando representada la potencia en la Ecuación 3.1 [Moncada, 2021].

$$P = P_0 + P_{ch} \quad 3.1$$

La potencia se puede relacionar con el torque T a través de la velocidad angular ω , obteniéndose la Ecuación 3.2 [Moncada, 2021].

$$P = T \cdot \omega \quad 3.2$$

3.3.2 Modelo energético de chancado

Para el cálculo energético existen varios modelos para estimar el consumo de energía de conminución, donde se tiene el modelo de von Rittinger [von Rittinger, 1867], el modelo de Kick [Kick, 1885] y el modelo de Bond [Bond, 1852]. Estos modelos se enuncian en las Ecuaciones 3.3, 3.4, 3.5 respectivamente.

$$E_{Rittinger} = W_{Ritt} \cdot \left(\frac{1}{p_{80}} - \frac{1}{f_{80}} \right) \quad 3.3$$

$$E_{Kick} = W_{Kick} \cdot \ln \frac{p_{80}}{f_{80}} \quad 3.4$$

$$E_{bond} = W_{Bond} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{p_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{f_{80}}} \right) \quad 3.5$$

Donde E es el consumo de energía por tonelada de material triturado, W_{Ritt} , W_{Kick} , W_{Bond} es el índice de trabajo de la roca que se obtienen experimentalmente con la metodología de cada autor, p_{80} y f_{80} corresponden al tamaño que está el 80% del producto y partículas de alimentación respectivamente. Todos los modelos tienen en común que a medida que el tamaño del producto final se acerca a cero el consumo energético tiende al infinito [Lindqvist, 2008].

En el estudio de Lindqvist [Lindqvist, 2008] realizó pruebas donde se percató de un inconveniente presente en los modelos energéticos antes descritos, al analizar tres distribuciones de tamaños arbitrarios, se obtiene el mismo valor debido a que se considera un único tamaño de producto p_{80} .

Dada esta problemática Lindqvist propuso un modelo energético para un chancador de cono, este se basa en la energía potencial de alimentación y el producto, analizaron la función de distribución de tamaño para la obtención de la energía. El modelo propuesto se muestra en la Ecuación 3.6.

$$E = W_{Matt} \cdot \left(\int_0^1 g_1(y)^{-0.5} dy - \int_0^1 g_2(y)^{-0.5} dy \right) \quad 3.6$$

Donde W_{Matt} es el índice de trabajo obtenido por Lindqvist, $g_1(y)$ y $g_2(y)$ son la función inversa de la distribución de tamaño del producto y de la alimentación respectivamente.

A partir de la energía obtenida por Lindqvist se puede obtener la potencia de chancado mediante la Ecuación 3.7 [Moncada, 2022].

$$P_{ch} = k_m \cdot E \cdot \dot{M} \quad 3.7$$

Donde k_m es una constante del chancador y \dot{M} es el flujo másico del producto.

3.4 Modelo de fuerzas

En Evertsson [Evertsson, 1999] se llevó a cabo una modelación del flujo másico en un chancador, en la que analizó las ecuaciones que describen el movimiento de las partículas dentro de la cámara de chancado. Este análisis permitió caracterizar el movimiento de las partículas en tres etapas principales: partículas en contacto, en caída libre e impacto. Para llevar a cabo este análisis del movimiento, se utilizaron los diagramas de movimiento de partículas que se muestran en la Figura 3.3.

Analizando los diagramas y considerando el caso de deslizamiento se obtiene las Ecuaciones 3.8 y 3.9 las cuales representan el equilibrio en ambas direcciones.

$$N_{res} \sin(\xi - \gamma) - mg \sin \theta = ma_x \quad 3.8$$

$$N_{res} \cos(\xi - \gamma) - mg \cos \theta = ma_y \quad 3.9$$

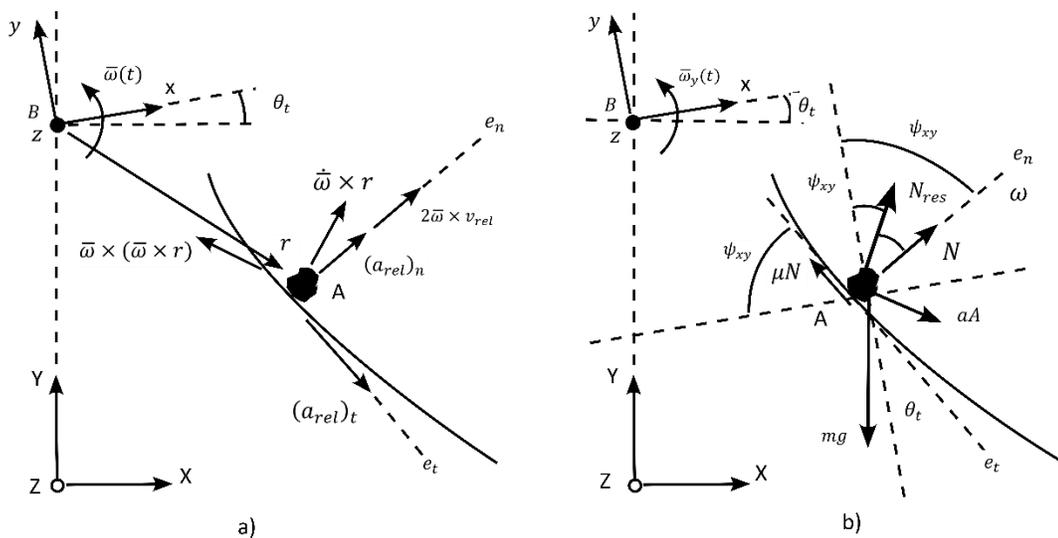


Figura 3.3. Movimiento de una partícula respecto con el sistema de coordenadas en rotación. a) Las componentes de aceleración; b) Fuerzas que actúan sobre la partícula [Fuente: Evertsson, 1999].

De aquí se deduce que m representa la masa de cada partícula, g es la aceleración de gravedad, a_x y a_y son las aceleraciones en las direcciones x e y respectivamente, N_{res} denota la fuerza resultante ejercida por el manto del chancador sobre la partícula, θ es el ángulo entre la dirección de la fuerza de gravedad y el eje y , ξ es el ángulo entre el eje x y la fuerza de roce, γ es el ángulo entre la fuerza resultante del manto del chancador sobre la partícula y la fuerza normal del manto [Toledo, 2022].

Además, Evertsson [Evertsson, 1999] determinó la aceleración absoluta de una partícula con respecto a los ejes de rotación, como se muestra en la Ecuación 3.10.

$$a_a = a_b + \dot{\bar{\omega}} \times r + (\bar{\omega} \times r) + 2\bar{\omega} \times v_{rel} + a_{rel} \quad 3.10$$

Donde r es la posición relativa de la partícula respecto al sistema de coordenadas en rotación.

Svensson y Steer [Svensson y Steer, 1990] en sus estudios propusieron una relación entre las fuerzas de chancado y la presión del sistema hidráulico, esta relación se puede apreciar en el esquema mostrado en la Figura 3.4.

De donde se tiene que R_1 y R_2 son reacciones horizontales, F_i es la fuerza de chancado de una partícula y R_y es la reacción vertical en el pistón. Los autores indican que mediante sensores y monitoreando la presión hidráulica se puede obtener una directa medida de la fuerza de chancado [Moncada, 2022].

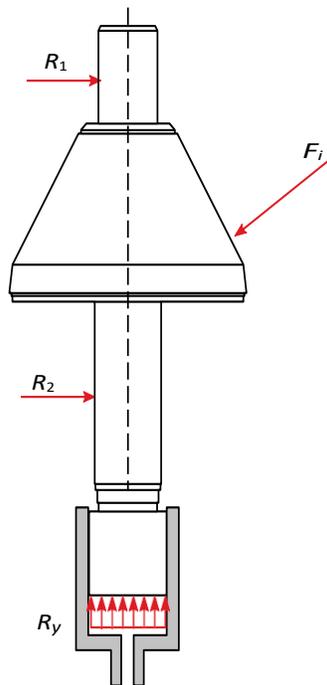


Figura 3.4. Esquema del balance de fuerzas externas sobre el poste [Fuente: Svensson y Steer, 1990].

En un estudio posterior realizado por Lindqvist y Evertsson [Lindqvist y Evertsson, 2004] propusieron un modelo de capacidad, presión en el hidrosset y potencia, este modelo depende la distribución de presiones en el manto, aplicado en un ángulo que se obtiene a partir del mismo modelo, el esquema de lo obtenido por los autores se muestra en la Figura 3.5.

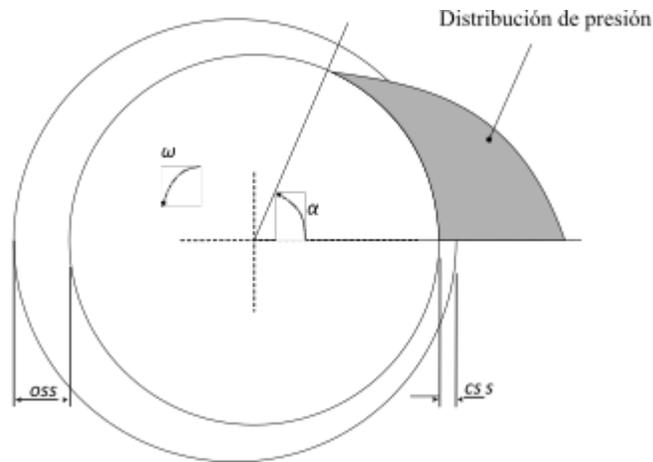


Figura 3.5. Distribución de presión mostrado en la sección transversal horizontal del chancador [Fuente: Lindqvist y Evertsson, 2004].

Por otro lado, en la investigación que realizaron Liu et al. [Liu, et al., 2018] propusieron un modelo que permite calcular la energía de conminución, que elaboraron mediante mediciones experimentales en un chancador de cono. Además, propusieron una distribución de presión en el manto del chancador como se muestra en la Figura 3.6 que está influenciada por la distribución del tamaño de alimentación y la relación de compresión, esta última varía con la velocidad del manto y los parámetros de la estructura.

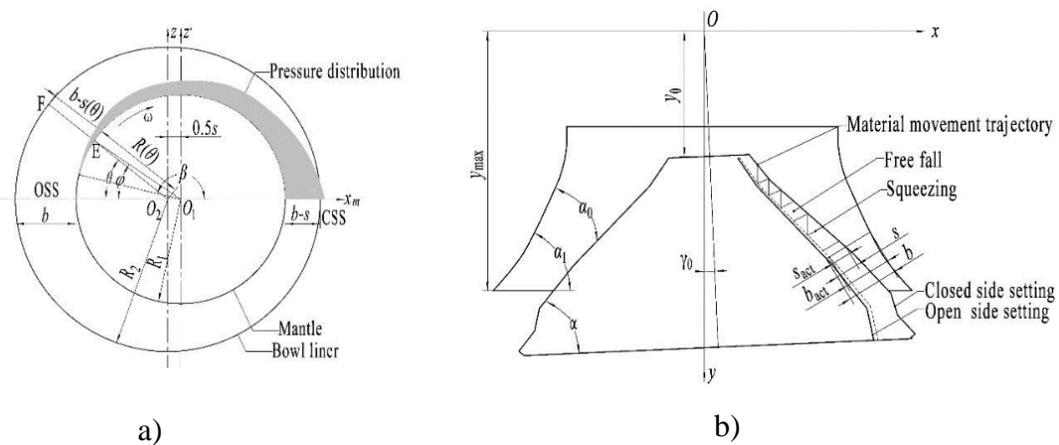


Figura 3.6. Sección transversal de la cámara de chancado [Fuente: Liu et al., 2018].

Como se observa en la Figura 3.6 la presión mínima se encuentra en la configuración OSS y la presión máxima en el CSS. Para definir la distribución de tamaño de las partículas los investigadores propusieron la Ecuación 3.11.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^q \lambda_j (\bar{d}_j - \bar{d})}}{\bar{d}} \quad 3.11$$

Donde λ_j es el rendimiento del tamaño de la partícula j , q es el número de partículas, \bar{d}_j es el tamaño medio de la partícula j , \bar{d} es el tamaño promedio de todas las partículas.

Por otro lado, se tiene la relación de compresión real en la cámara, este depende de la velocidad del manto, dado que a mayor velocidad la relación de compresión real será menor, este valor se obtiene por medio de la Ecuación 3.12.

$$i_{act}(\theta) = \frac{s_{act}(\theta)}{b_{act}} = \frac{s(\theta + \beta - \pi)}{R_b + 0,5 \cdot s_{act}(\theta) - R_a} \quad 3.12$$

De donde se tiene que R_b es el radio del revestimiento y R_a es el radio del manto, $s_{act}(\theta)$ refleja y cuantifica el proceso de compresión, esta se obtiene con la Ecuación 3.13.

$$s(\theta) = R(\theta) + \frac{s}{2} - R_a \quad 3.13$$

Donde $R(\theta)$ y s se obtienen mediante las Ecuaciones 3.14 y 3.15 respectivamente.

$$R(\theta) = \sqrt{R_a^2 - s^2 \cdot \sin^2 \theta} - \frac{s \cdot \cos \theta}{2} \quad 3.14$$

$$s = 2 \cdot \gamma_0 \sqrt{R_a^2 + y^2} \quad 3.15$$

Finalmente, la presión de chancado para Liu et al. [Liu, et al., 2018], se obtiene de la siguiente manera tal como se muestra en la Ecuación 3.16.

$$p = i_{act}^2 (-263,01\sigma^2 + 393,673\sigma - 51.603) + i_{act} (189,563\sigma^2 - 127,847\sigma + 51,452) \quad 3.16$$

Liu et al. [Liu et al., 2018] además de obtener la presión de chancado, los investigadores propusieron un modelo para calcular la energía de chancado, este modelo se resume en la Ecuación 3.17.

$$E = E_0 + 16,67 \cdot n \int_{(1-k) \cdot \pi}^{y_{max}} \int_{(1-k) \cdot \pi}^{\pi} \int_0^{R(\varphi) + \frac{s}{2} - R_a} p(i_{act}, \sigma) R_a ds(\varphi) d\psi dy \quad 3.17$$

Dentro de los resultados que obtuvieron se encuentran los factores que influyen en el consumo de energía, donde la relación de compresión y desplazamiento son principalmente influenciados por la velocidad del manto y los parámetros de estructura de la cámara de trituración del chancador de cono.

Capítulo 4

Método de elementos discretos

DEM es un método numérico mediante el cual es posible modelar distintos problemas ingenieriles en materiales granulares y discontinuos. Este método permite obtener las fuerzas de las distintas interacciones presentes en la simulación mediante los modelos de contacto. Las fuerzas generalmente se obtienen explícitamente a través del tiempo [Weerasekara et al., 2016]. Para obtener las fuerzas, DEM relaciona las posiciones y velocidades de las partículas, resolviendo la segunda ley de Newton, en un ciclo iterativo derivando dos veces para encontrar posición y velocidad [Di Renzo y Di Maio, 2004].

4.1 Dinámica de las partículas

Un análisis de elementos discretos implica un enfoque dinámico y transiente para evaluar la interacción entre las partículas de un sistema que tienen la capacidad de interactuar entre sí [Weerasekara et al., 2013]. Al utilizar un modelo de partículas simuladas con DEM, se puede crear un sistema compuesto de partículas rígidas ideales que tienen la capacidad de moverse.

El movimiento de las partículas se obtiene mediante la integración de las ecuaciones de Newton para los grados de libertad de rotación y traslación como se muestran en la Ecuación 4.1 y 4.2 respectivamente.

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \cdot \vec{g} + \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij} \quad 4.1$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^N \vec{T}_{ij} \quad 4.2$$

De la Ecuación 4.1 se tiene que m_i es la masa de la partícula, \vec{v}_i es la velocidad, y \vec{F}_{ij} es la fuerza de contacto que ejerce j sobre i . Por otro lado, en la Ecuación 4.2, se tiene que I_i es la inercia de la partícula i , $\vec{\omega}_i$ es su velocidad de rotación y \vec{T}_{ij} es el momento de contacto.

4.2 Modelo de contacto

En esta sección se describen los modelos de contacto empleados en la simulación utilizando Rocky [ESSS, 2018].

4.2.1 Modelo de contacto normal

Para la obtención de las fuerzas normales se utiliza el modelo de contacto *Hysteretic linear spring model* propuesto por Walton y Braun, la implementación del modelo depende del tiempo, las ecuaciones que definen este modelo se presentan en la Ecuación 4.3 y en la Ecuación 4.4.

$$F_n^t = \begin{cases} \text{mín}(K_{nl} \cdot S_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu} \cdot \Delta S_n) & \text{si } \Delta S_n \geq 0 \\ \text{máx}(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu} \cdot \Delta S_n, \lambda \cdot K_{nl} \cdot S_n^t) & \text{si } \Delta S_n \leq 0 \end{cases} \quad 4.3$$

$$\Delta S_n = S_n^t - S_n^{t-\Delta t} \quad 4.4$$

De donde se tiene que:

- F_n^t y $F_n^{t-\Delta t}$ son las fuerzas de contacto elástica-plástica en el tiempo t y el tiempo previo $t - \Delta t$, donde Δt es el paso de tiempo.
- ΔS_n es el cambio en el traslapo normal a lo largo del tiempo. Este valor es positivo si las partículas se aproximan entre ellas y negativo cuando se alejan.
- Los valores del traslapo normal para un tiempo y para el tiempo previo es S_n^t y $S_n^{t-\Delta t}$ respectivamente.
- El valor de rigidez de contacto de carga es K_{nl} y el valor de rigidez de contacto de descarga se representa por K_{nu} .
- λ es una pequeña constante adimensional. En el software Rocky este valor se utiliza como 0,001.

4.2.2 Modelo de contacto tangencial

Para las fuerzas tangenciales se utiliza el modelo *Linear Spring Coulomb Limit*. En este modelo las fuerzas tangenciales son de fricción elástica. La expresión para calcular la fuerza elástica se muestra en la Ecuación 4.5.

$$F_{\tau,e}^t = F_{\tau}^{t-\Delta t} - k_{\tau} \cdot \Delta S_{\tau} \quad 4.5$$

Donde $F_{\tau,e}^t$ es la fuerza tangencial, La fuerza tangencial en el tiempo anterior es $F_{\tau}^{t-\Delta t}$, el desplazamiento tangencial relativo durante el paso de tiempo es ΔS_{τ} , la rigidez tangencial k_{τ} se define como se muestra en la Ecuación 4.6.

$$k_{\tau} = r_k \cdot K_{nl} \quad 4.6$$

Donde r_k es la razón de rigidez tangencial y K_{nl} es la rigidez normal de carga que se define como se muestra en la Ecuación 4.7.

$$\frac{1}{K_{nl}} = \begin{cases} \frac{1}{K_{nl,p1}} + \frac{1}{K_{nl,p2}} & \text{Para contacto partícula-partícula.} \\ \frac{1}{K_{nl,p}} + \frac{1}{K_{nl,b}} & \text{Para contacto partícula-frontera.} \end{cases} \quad 4.7$$

La limitante de este modelo es que la fuerza tangencial no puede exceder el valor del límite de Coulomb. De esta manera reescribiendo la Ecuación 4.5 se obtiene que la Fuerza tangencial queda representada por la Ecuación 4.8.

$$F_{\tau}^t = \min(|F_{\tau,e}^t|, \mu F_n^t) \cdot \frac{F_{\tau,e}^t}{|F_{\tau}^t|} \quad 4.8$$

Donde F_n^t es la fuerza normal de contacto en el tiempo y μ es el coeficiente de fricción que está definido por μ_s para contactos sin deslizamiento y por μ_d para contactos con deslizamiento.

4.2.3 Detección de contacto

La detección de contacto en DEM considera todas las interacciones entre partícula-límite. En Rocky DEM se manejan varios tipos de formas de partículas. El costo computacional en la detección aumenta de acuerdo con la complejidad de la partícula, en el caso de partículas esféricas el costo computacional es menor en comparación a las partículas poliédricas, las cuales pueden presentar múltiples tipos de contactos, ya que puede ocasionar combinaciones de caras, bordes y vértices de las partículas.

Rocky considera como partículas vecinas a todas las partículas que se encuentren a una distancia predefinida η , denominada como distancia de vecindad, esta distancia se ilustra en la Figura 4.1. El costo computacional de detectar los contactos en partículas de una geometría compleja es elevado. Dado esto, Rocky detecta las partículas vecinas considerando esferas de contorno alrededor de cada partícula, definiendo como partículas vecinas cuando la distancia entre esferas de contorno es menor o igual a η .

4.3 Modelo de fractura

Para describir el fenómeno físico de ruptura de las partículas se emplea el modelo de fractura de Tavares [Tavares, 2009]. Cabe destacar que en el software Rocky DEM existen dos modelos de fractura disponibles: Ab-T10 y Tavares. Ambos modelos reemplazan las partículas que alcanzan el límite de rotura, por un conjunto de partículas de menor tamaño, sin superar los límites geométricos de la partícula inicial.

La probabilidad de rotura en el modelo de Tavares se basa en una distribución logarítmica normal truncada superiormente a la energía específica de fractura e . Esta distribución se puede determinar por medio de la Ecuación 4.9.

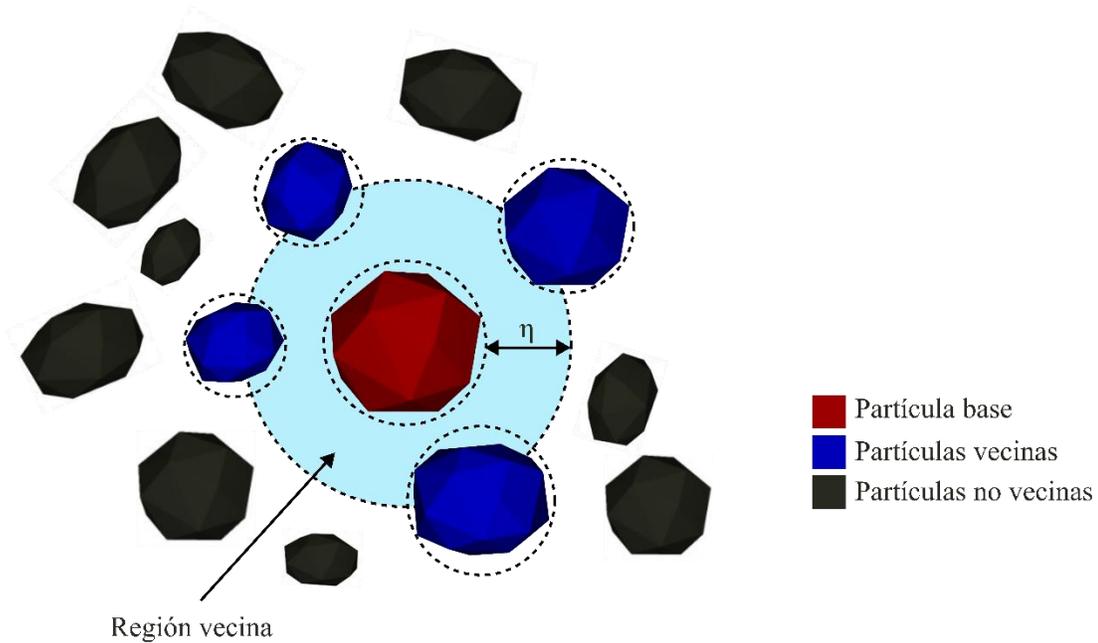


Figura 4.1. Región vecina de una partícula en Rocky [Fuente: Rocky DEM, 2020].

$$P_0(e) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln e^* - \ln e_{50}}{\sqrt{2} \cdot \sigma^2} \right) \right] \quad 4.9$$

donde e_{50} es la energía de fractura específica mediana de la partícula, σ^2 es la varianza de la distribución logarítmica normal de las energías de fractura y e^* es la energía de fractura específica relativa, esta última se calcula por medio de la Ecuación 4.10.

$$e^* = \frac{e_{max} e}{e_{max} - e} \quad 4.10$$

donde e_{max} es la energía específica de impacto en la que todas las partículas se romperían con un único impacto. La energía e_{50} se determina a partir de la Ecuación 4.11.

$$e_{50} = e_{\infty} \left[1 + \left(\frac{d_0}{L} \right)^{\varphi} \right] \quad 4.11$$

donde e_{∞} , φ y d_0 son parámetros del modelo que deben ajustarse a los parámetros experimentales, L que es el tamaño de las partículas. Cada partícula tiene designada una probabilidad de fractura P_0 , asociada a una energía de fractura e_0 a la cual se fractura.

Cuando una partícula sufre una colisión la energía específica de fractura disminuirá debido a la acumulación de daño. Por tanto, en presencia de eventos sucesivos de colisión es necesario calcular una nueva energía específica de fractura mediante la estimación del daño acumulado, esto se realiza mediante la Ecuación 4.12 y Ecuación 4.13.

$$e_n = e_{n-1}(1 - D_n^*) \quad 4.12$$

$$D_n^* = \left(\frac{2\gamma}{2\gamma - 5D_n^* + 5} \frac{\Delta e_{c,n}}{e_{n-1}} \right)^{\frac{2\gamma}{5}} \quad 4.13$$

Donde e_n es la energía específica de fractura específica de la partícula tras n ciclos de carga sin rotura, D_n^* es el daño fraccional en la partícula durante el ciclo de carga n , $\Delta e_{c,n}$ es la energía específica de impacto en la partícula durante el ciclo de carga n , γ es el coeficiente de daño acumulado.

Cuando una partícula se rompe, la geometría de los fragmentos resultantes se genera mediante el algoritmo de fractura de Voronoi, siguiendo una distribución de tamaño definida, esta puede ser Gaudin-Schumann o la función beta incompleta. De esta manera el valor del parámetro t_{10} , se calcula mediante la Ecuación 4.14 y Ecuación 4.15.

$$t_{10} = A \left[1 - \exp \left(-b' \frac{\Delta e_{c,b}}{e_{50b}} \right) \right] \quad 4.14$$

$$e_{50b} = e_{50} \exp \left(\sqrt{2\sigma^2} \operatorname{erf}^{-1} [P_0(\Delta e_{c,b}) - 1] \right) \quad 4.15$$

Donde t_{10} es el porcentaje de fragmentos pasante de tamaño 10 veces inferior al tamaño original de las partículas. A y b' son parámetros del modelo, $e_{c,b}$ es la energía de contacto específica efectiva en la partícula, en el instante de rotura y e_{50b} es la energía de fractura específica media de las partículas trituradas.

4.4 Modelo de distribución de tamaño

La función Beta incompleta se utiliza para la distribución de tamaño que está en función del valor t_{10} , el cual se obtiene por medio de la Ecuación 4.16.

$$t_n(t_{10}) = \frac{100}{\int_0^1 X^{\alpha_n-1} (1-x)^{\beta_n-1} dx} \cdot \int_0^{\frac{t_{10}}{100}} X^{\alpha_n-1} (1-x)^{\beta_n-1} dx \quad 4.16$$

Donde t_n es el porcentaje de fragmentos pasantes en una malla de tamaño n veces más pequeños que el tamaño original, los parámetros α_n y β_n son parámetros que se deben ajustar con datos experimentales [Toledo, 2022].

Capítulo 5

Modelación DEM chancador giratorio

En este capítulo se presentan los parámetros y configuraciones necesarias para la modelación del chancador giratorio.

5.1 Modelación de un chancador giratorio

El chancador primario modelado corresponde al chancador giratorio superior de Metso 60-89, en la Figura 5.1 se muestra un esquema representativo del chancador. Esta máquina minera fue analizada por Persio Rosario [Rosario, 2003], donde realizó mediciones experimentales de desgaste. Para obtener la geometría del chancador se utilizó de referencia un perfil encontrado en la investigación, replicándolo mediante un software CAD. Para términos prácticos de esta investigación solo se obtendrá la geometría del manto y la cóncava.

En la Figura 5.1 se puede ver la geometría realizada para la simulación, donde se tiene la cóncava y manto del chancador giratorio. Además, en la Tabla 5.1 se tienen las principales dimensiones del chancador simulado.

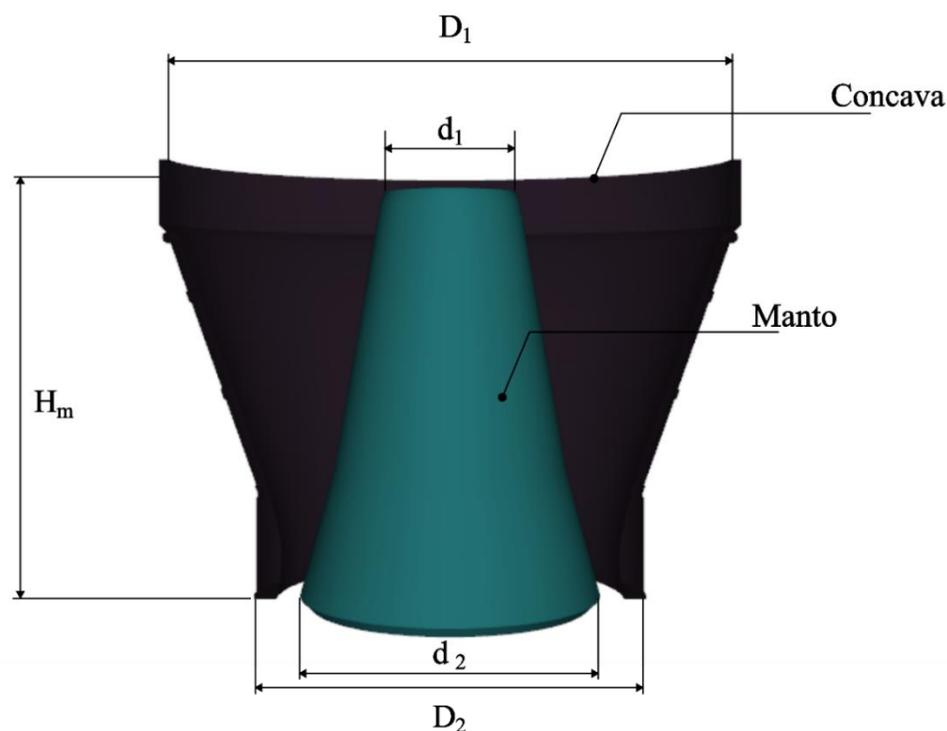


Figura 5.1. Geometría empleada para la simulación del chancador giratorio.

5.1.1 Movimiento

Para describir el movimiento del manto se debe obtener el punto de pivoteo del manto, este se obtiene a partir de la excentricidad y el ángulo de inclinación, los cuales son 46,05 [mm] y 0,24° respectivamente. El movimiento del manto dentro de la simulación se configura a través de un movimiento pendular en torno al punto de pivoteo, y al mismo tiempo el manto posee una rotación de cuerpo libre entorno a su propio eje, resultando necesario obtener la inercia y masa del manto que es calculado mediante el modelo CAD.

Tabla 5.1. Parámetros geométricos y materiales de las geometrías de la simulación DEM.

Variable	Nomenclatura	Valor
Altura del manto [m]	H_m	3,1
Diámetro del manto superior [m]	d_1	1,5
Diámetro del manto inferior [m]	d_2	2,8
Diámetro del cóncavo superior [m]	D_1	4,8
Diámetro del cóncavo inferior [m]	D_2	3,4
Excentricidad en la base del eje principal [mm]	-	46,0502
Densidad [kg/m^3]	-	7850
Inclinación [$^\circ$]	-	0,24
Masa del poste [kg]	-	16016,3
Inercia del poste [kg m^2]	-	80509,6

5.1.2 Modelo de contacto

En la Tabla 5.2 se muestran los parámetros físicos que caracterizan el modelo de contacto.

Tabla 5.2. Parámetros del modelo de contacto.

Variable	Partícula/Partícula	Partícula/Pared
Roce estático	0,3	0,3
Roce dinámico	0,3	0,3
Relación de rigidez tangencial	1	1
Coefficiente de restitución	0,3	0,3

5.1.3 Modelo de fractura

El modelo de fractura utilizado en la simulación es el modelo de Tavares, utilizando la función beta incompleta para la distribución de tamaño. En la publicación realizada por De Arruda y Tavares [De Arruda y Tavares, 2021] investigaron y ajustaron los parámetros del modelo de fractura del cobre, sus resultados se resumen en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Parámetros del modelo de fractura para mineral de cobre [De Arruda y Tavares, 2021].

Variable	Valor
E_{∞} [J/kg]	100
d_0 [mm]	8,07
ζ	1,22
σ	0,799
$\alpha_{1.2}/\beta_{1.2}$	0,448/10,508
$\alpha_{1.5}/\beta_{1.5}$	0,706/7,913
α_2/β_2	0,959/5,780
α_4/β_4	1,105/2,619
α_{25}/β_{25}	0,981/0,524
α_{50}/β_{50}	0,956/0,339
α_{75}/β_{75}	0,934/0,255
γ	5,0
A [%]	67,7
b'	0,029
d_{min} [mm]	15

De los parámetros propuestos por De Arruda y Tavares [De Arruda y Tavares, 2021] se modificó el valor de E_{∞} de 213,5 a 100 [J/kg] esto se debe a simulaciones de prueba realizadas con anterioridad, donde se obtuvieron resultados sumamente elevados de potencia, para solucionar este problema se analizaron los parámetros y se propone un ajuste a la curva de energía e_{50} , dado que este parámetro influye significativamente en la fractura de la roca, ya que, este valor indica la energía necesaria para fracturar la roca en función de su tamaño, además que los parámetros propuestos por Tavares fueron validados para un chancador de cono donde el tamaño de partícula es significativamente inferior a las partículas presentes en el chancador primario, es por esto que, una reducción en el valor de la energía e_{50} ocasiona una disminución en los valores de potencia debido a la menor energía liberada al momento de ocurrir las múltiples fracturas en el funcionamiento de la simulación, en la Figura 5.2 se visualiza la curva del parámetro propuesto en el modelo de Tavares y la curva del parámetro propuesto para el chancador primario.

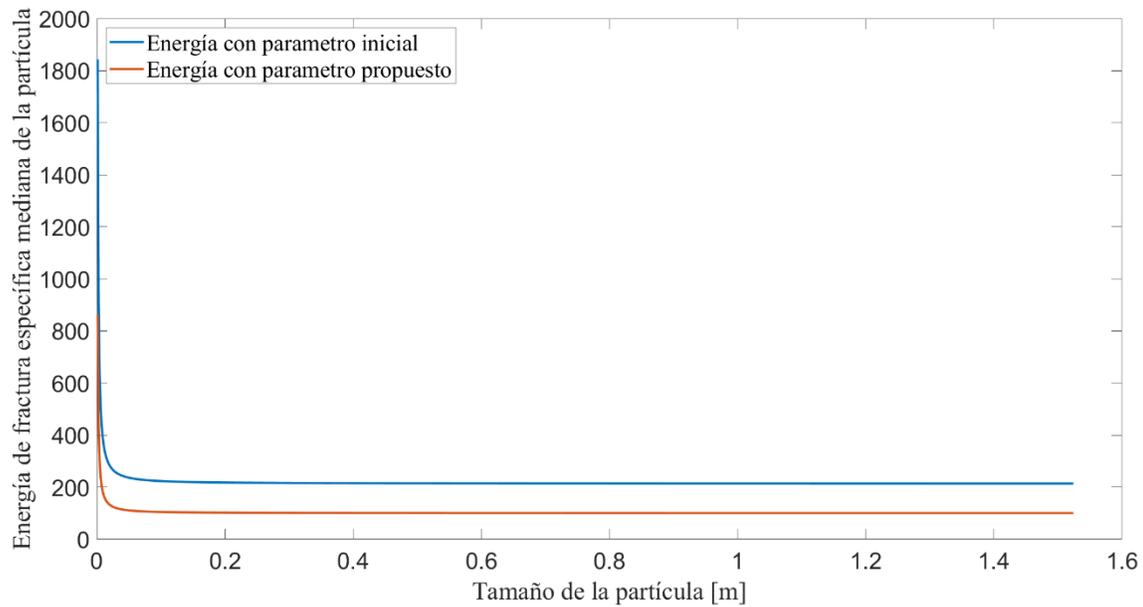


Figura 5.2. Curva de energía del parámetro ajustado por los investigadores y el propuesto.

5.1.4 Materiales y forma de las rocas

En la Tabla 5.4 se muestran los principales parámetros de material de las partículas y la pared del manto [Andres y Tavares, 2020].

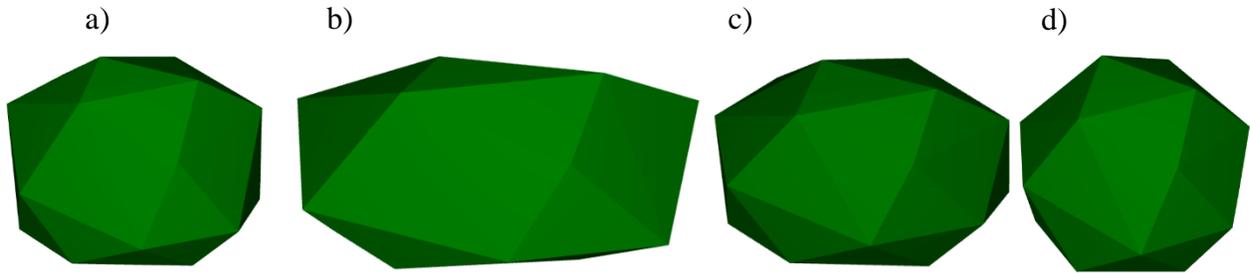
Tabla 5.4. Parámetros de material [André y Tavares, 2020].

Variable	Partícula	Pared
Módulo de Young [MPa]	100	1000
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
Densidad [kg/m ³]	2930	7850

Por otro lado, el mineral de cobre ROM se configuró como partículas poliédricas con 4 formas diferentes. La calibración de estos parámetros fue realizada por André y Tavares [André y Tavares, 2020] obteniendo buenos resultados, que logran representar de buena manera la forma real de la roca. Los resultados obtenidos para modelar las rocas en DEM se encuentran en la Tabla 5.5. Además, en la Figura 5.3 se encuentran como se representan geoméricamente estos parámetros en el software Rocky DEM.

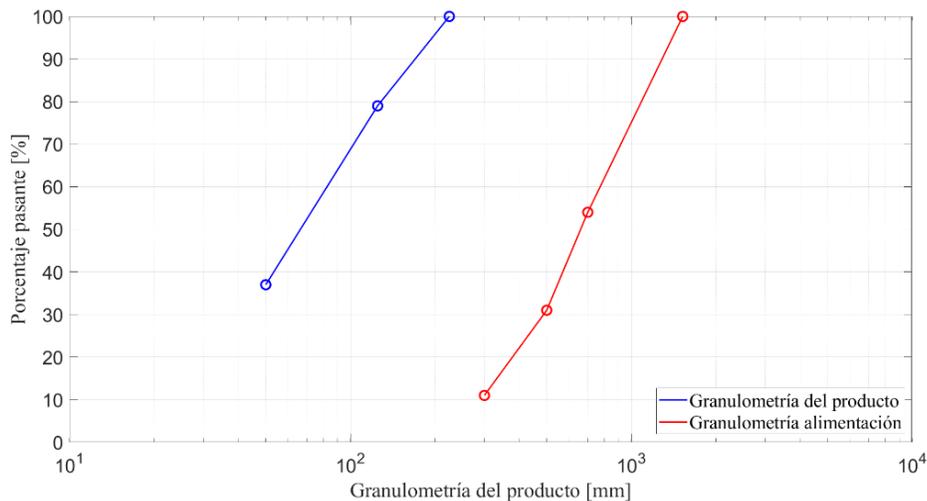
Tabla 5.5. Parámetros de forma de las partículas [André y Tavares, 2020].

Parámetros	Partícula 1	Partícula 2	Partícula 3	Partícula 4
Relación de aspecto vertical	0,8	0,5	0,7	0,95
Relación de aspecto horizontal	1,0	0,8	1,2	1,0
Numero de esquinas	25	20	25	20
Grado supercuadrático	3,0	4,0	2,3	2,0

**Figura 5.3.** Forma de las partículas diseñadas en el modelo DEM para la trituración: (a) partícula 1, (b) partícula 2, (c) partícula 3, (d) partícula 4.

5.1.5 Parámetros operacionales

El chancador giratorio Metso superior se encuentra en la minera *Highland Valley Copper* ubicada en Canadá. Este chancador posee un flujo de alimentación de 4248 [tph], la potencia nominal es de 520 [kW] [Rosario, 2003]. El CSS del chancador es variable entre 127 y 140 [mm] para el caso de estudio se utilizará el mínimo CSS. La granulometría de alimentación y del producto [Simkus y Dance, 1998] presente en el chancador se muestra en la Figura 5.4 para la simulación realizada.

**Figura 5.4** Granulometría de alimentación y producto del chancador giratorio [Fuente: Simkus y Dance, 1998].

CAPITULO 6

Resultados

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de la simulación DEM del chancador giratorio para posteriormente analizarlos y compararlos con valores experimentales obtenidos de la literatura. Además, se realiza un postproceso de los datos de la fuerza de trituración.

6.1 Modelo DEM

En la Figura 6.1 se presenta una captura de pantalla de la simulación del chancador giratorio en el tiempo $t = 15,25$ segundos. En este instante, dentro de la cámara se encuentra un total de 761 partículas. El flujo másico promedio del producto es de 4013,7 [tph]. Dado que la masa total de partículas en la cámara y el flujo másico medio del producto se mantiene con variaciones bajas luego de los 2 segundos de simulaciones, se considera que la simulación se encuentra en un estado estacionario.

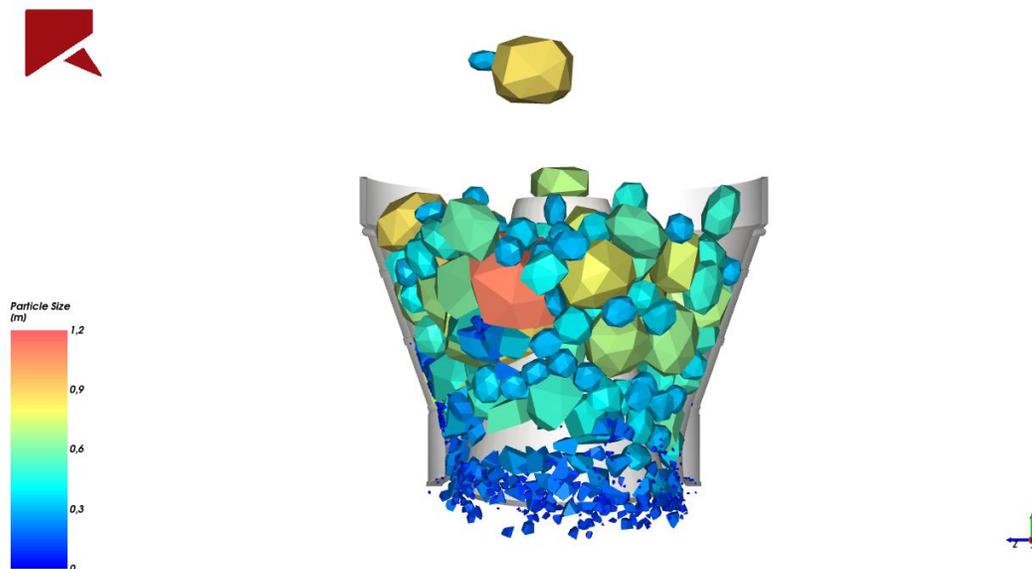


Figura 6.1. Captura de Pantalla de la simulación del chancador primario en $t = 15,25$ segundos mostrando la sección frontal del chancador. Las partículas están coloreadas de acuerdo con el tamaño de las partículas, además posee un corte en la cóncava para visualizar las partículas.

6.2 Validación

En esta sección se realiza una comparación entre la simulación obtenida con las mediciones experimentales realizadas en Rosario [Rosario, 2003] entre los días del 25 de junio del 2002 hasta el 27 de julio del 2002, donde se tiene la potencia eléctrica experimental y flujo másico de salida, además el PSD se validará con la información obtenida en Simkus y Dance [Simkus y Dance, 1998].

6.2.1 Flujo másico

En el chancador giratorio analizado por Rosario [Rosario, 2003], se realizaron mediciones experimentales del funcionamiento de la máquina, en periodos determinados por los cambios de manto debido al desgaste que sufre el recubrimiento. En el rango de días estudiado el flujo de producción inicial, sin elevación del manto es aproximadamente de 4150 [tph].

Para validar la simulación es necesario analizar el flujo másico a la salida del chancador, para esto se realizó un postproceso de datos, obteniendo la masa a la salida del chancador y sumándolos a través de los pasos de tiempo, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 6.2, finalmente el flujo de alimentación es representado por la pendiente de la curva.

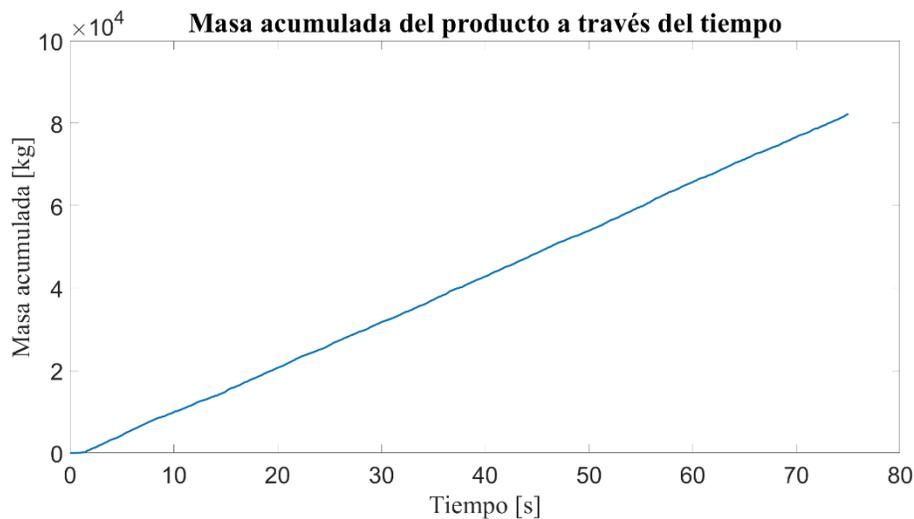


Figura 6.2. Masa acumulada a través del tiempo.

De esta manera el flujo obtenido de la simulación DEM corresponde a 4013,7 [tph], este valor contiene un error de 3,3%.

6.2.2 Potencia

Para validar la potencia de chancado, en primer lugar se analiza la potencia medida experimentalmente en Rosario [Rosario, 2003] esta corresponde a la potencia eléctrica, dado esto utilizando la Ecuación 3.1 se debe restar la potencia en vacío para obtener la potencia de chancado. La potencia en vacío corresponde a los picos inferiores de la señal de potencia eléctrica, debido a que en estos momentos el chancador está vacío, analizando las mediciones se obtiene que la potencia en vacío corresponde a 68,1 [kW].

Por otro lado, para poder comparar la potencia se debe calcular el valor RMS de la potencia, dado esto es necesario digitalizar la potencia eléctrica medida experimentalmente para posteriormente calcular su respectivo RMS, realizando un seguimiento de puntos es posible replicar la potencia eléctrica, tal como se muestra en la Figura 6.3.

De la Figura 6.3 se obtiene que la potencia eléctrica RMS corresponde a 516,3 [kW]. A este valor se le debe restar la potencia en vacío, obteniéndose finalmente la potencia de chancado que corresponde a 448,2 [kW].

Posteriormente, se debe obtener la potencia de chancado de la simulación, para esto se grafica los valores de potencia obtenido en cada paso de tiempo como se ve en la Figura 6.4. Para obtener la potencia se debe considerar los valores entre el rango de 2 y 75 segundos debido, que durante el comienzo de la simulación se produce una acumulación de energía, esto se debe a que aún no comienza la fractura de las partículas, no obstante, si se realiza la compresión entre partículas y paredes. Además, una vez iniciada la fractura de las rocas el proceso se encuentra en proceso transiente, y se espera que el proceso alcance la estabilidad en un estado estacionario para tomar el valor RMS de la potencia de chancado.

Finalmente, la potencia de chancado RMS de la simulación es 620,6 [kW], este contiene un error asociado de 38,5% respecto a la potencia obtenida experimentalmente.

6.2.3 Distribución de Tamaño

Otro parámetro por validar es la distribución de tamaño de las partículas del producto. Para esto se utilizó la distribución del chancador Metso superior de *Highland Valley Copper* documentado por Simkus y Dance [Simkus y Dance, 1998], donde entregan la distribución de tamaño en grano fino, medio y grueso para el flujo de producción del chancador giratorio. Graficando la distribución de tamaño de la simulación se obtiene la gráfica de la Figura 6.5.

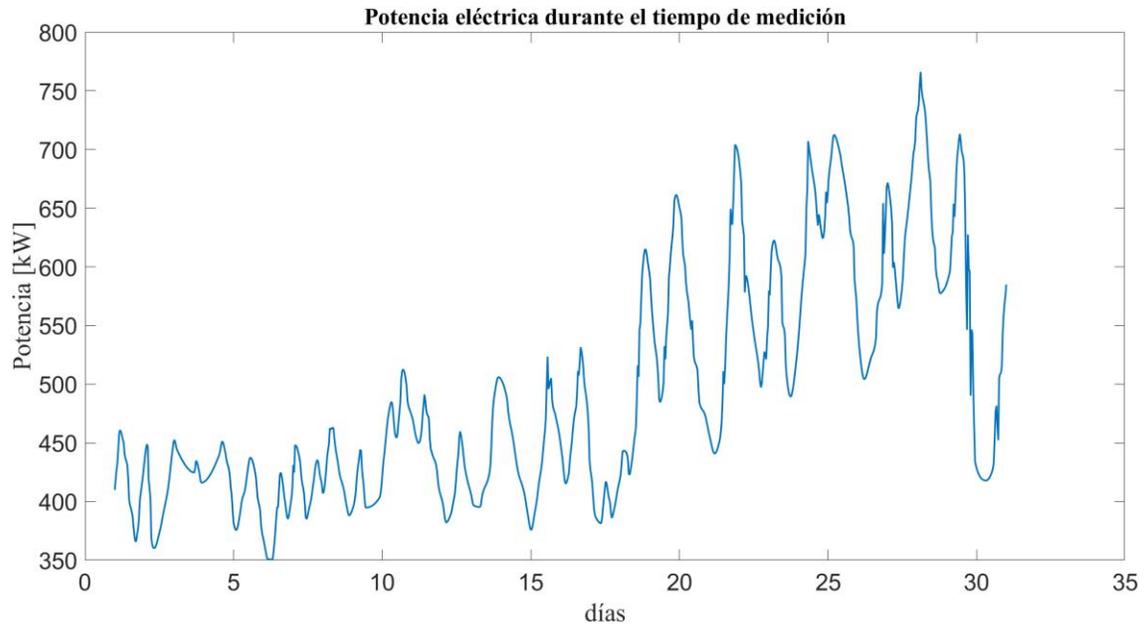


Figura 6.3. Potencia eléctrica de las mediciones experimentales [Fuente: Rosario, 2003].

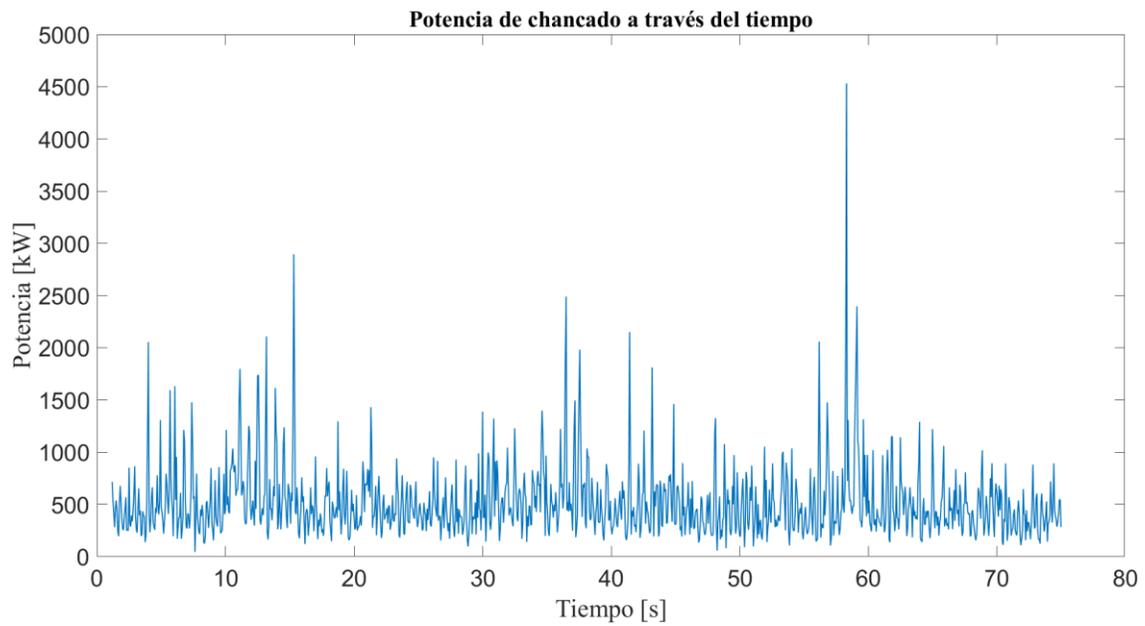


Figura 6.4. Potencia de chancado de la simulación DEM.

De la Figura 6.5 se puede ver que la granulometría presenta grandes diferencias para el grano más fino, mientras que para tamaños mayores se obtiene buenos resultados en comparación a los resultados experimentales, el error asociado a este cálculo corresponde a 20,1%.

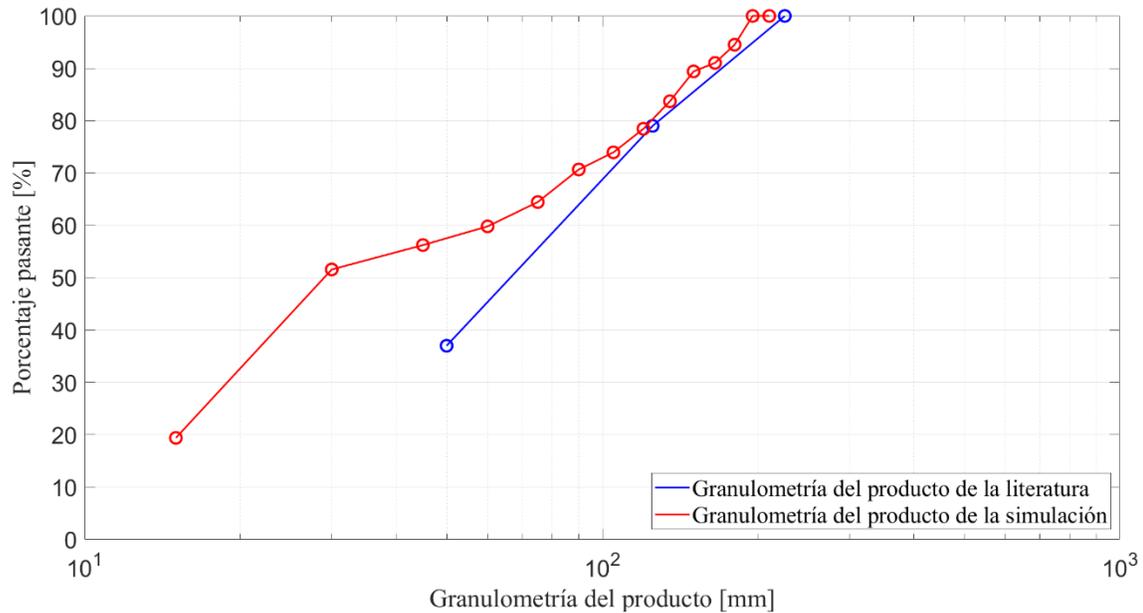


Figura 6.5. Granulometría del producto de la Simulación DEM.

6.3 Análisis de desgaste

Durante el funcionamiento del chancador uno de los principales problemas radica en el desgaste y deterioro del revestimiento del chancador, esto se debe a que las piezas están sometidas a fuerzas ocasionadas por la compresión entre las partículas y la superficie, producido por el movimiento nutacional del manto entorno al punto de pivoteo.

El mecanismo de desgaste que se encuentra principalmente en el funcionamiento del chancador es la abrasión debido a alta carga de impacto a la que se encuentran sometidos [Machado et al, 2021]. El desgaste abrasivo se refiere a la eliminación de material de una superficie causada por el contacto con partículas más duras, como asperezas. Estas partículas pueden ser contaminantes ambientales, residuos de desgaste, óxidos u otros subproductos químicos que entran en contacto durante el deslizamiento [Ospina y Beltrán, 2015]

Existen dos tipos de desgastes abrasivo: De dos cuerpos y de tres cuerpos. El desgaste de dos cuerpos es cuando solamente existe fuerzas e interacción entre superficie y un material, por otro lado, el desgaste de tres cuerpos consiste en la interacción de un material entre dos superficies, como es el caso del chancador que interactúan las rocas entre la superficie del manto y la cóncava [Ospina y Beltrán, 2015]. Debido a esto, para analizar el desgaste se necesita analizar el comportamiento y distribución de las fuerzas de chancado.

En la Figura 6.6 se muestra un postproceso en el software Paraview para representar las fuerzas de chancado presentes en el manto. La representación gráfica corresponde a la fuerza presente en el paso de tiempo 26,6 segundos, en este instante se encuentran el CSS en la zona frontal de la imagen. Dado

que al producirse la compresión de las partículas contra la frontera se puede generar más de una zona de contacto, lo que resulta en más de una fuerza nodal. Esto se representa visualmente en las fuerzas nodales agrupadas en la Figura 6.6.

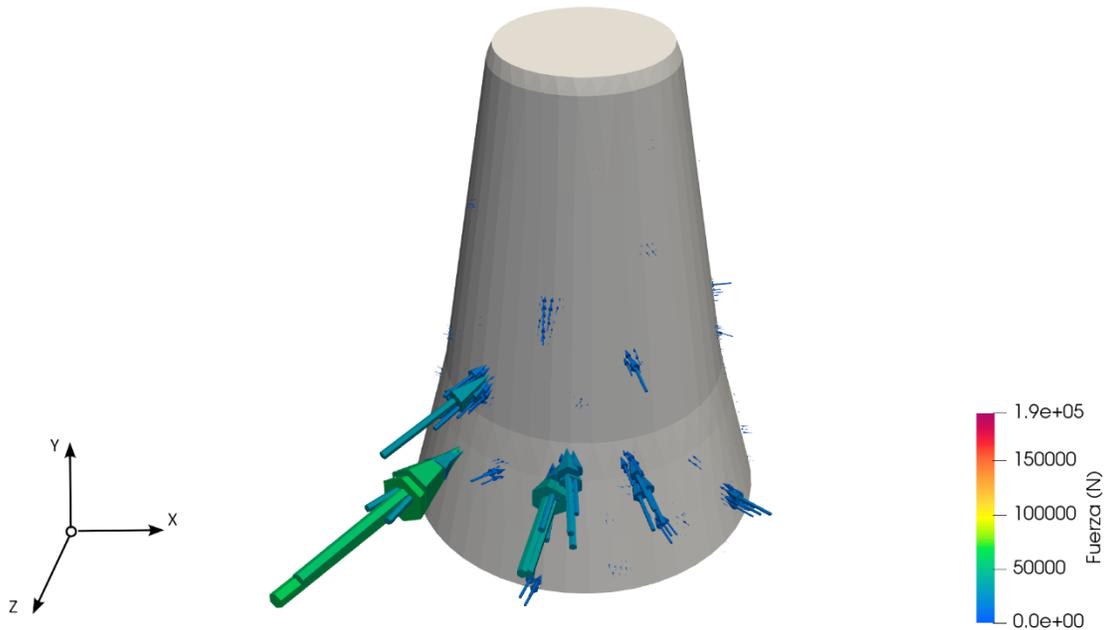


Figura 6.6. Fuerzas nodales en el tiempo 26,6 segundos.

A pesar de ser solo un paso de tiempo, la magnitud y la cantidad de fuerzas aplicadas al manto son elevadas. Dado esto, resulta importante analizar el comportamiento de estas fuerzas a lo largo del tiempo, y como se distribuyen las magnitudes en el manto del chancador. En las zonas con mayor presencia de fuerzas de chancado con magnitudes mayores provocará una mayor energía de impacto y presión sobre las superficies de chancado, lo que resulta en una abrasión más significativa. Además, las fuerzas elevadas pueden inducir a fatiga y deformación plástica en la superficie aumentando la susceptibilidad al desgaste. De esta manera a través de la descomposición de las fuerzas en coordenadas espaciales permite encontrar las fuerzas con mayor incidencia en el desgaste de la geometría.

En primer lugar, se realiza una descomposición de las fuerzas en dirección normal y tangencial a la superficie del manto. Posteriormente, se analizan y grafican en función de la altura del chancador a la que fue producida la fuerza, esto permite visualizar las zonas que presentan una mayor concentración de fuerzas y las zonas que presentan magnitudes más elevadas. Analizando las fuerzas presentes en todos los pasos de tiempo de la simulación se obtiene las fuerzas normales y tangenciales representadas en las Figura 6.7 y Figura 6.8 respectivamente. En estas gráficas se aprecia la gran diferencia que presentan las fuerzas, donde las fuerzas normales presentan una magnitud superior respecto a las fuerzas tangenciales. Esto se debe principalmente a la forma en que se realiza la fractura

de las partículas, ya que, la compresión producida a las rocas por las paredes es principalmente normal a la superficie tal como se puede visualizar en la Figura 6.6.

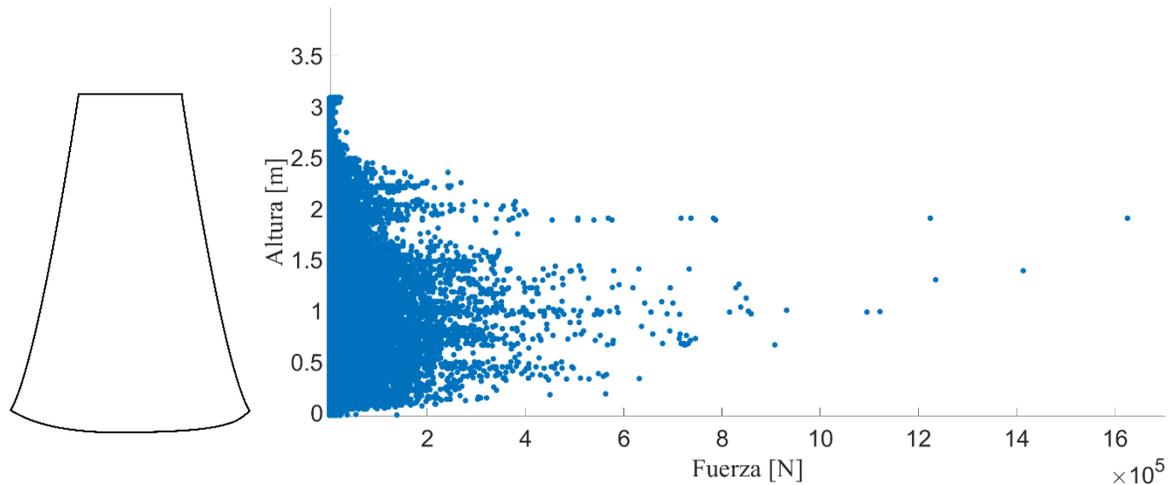


Figura 6.7. Magnitudes de las fuerzas normales respecto a la altura del manto del chancador.

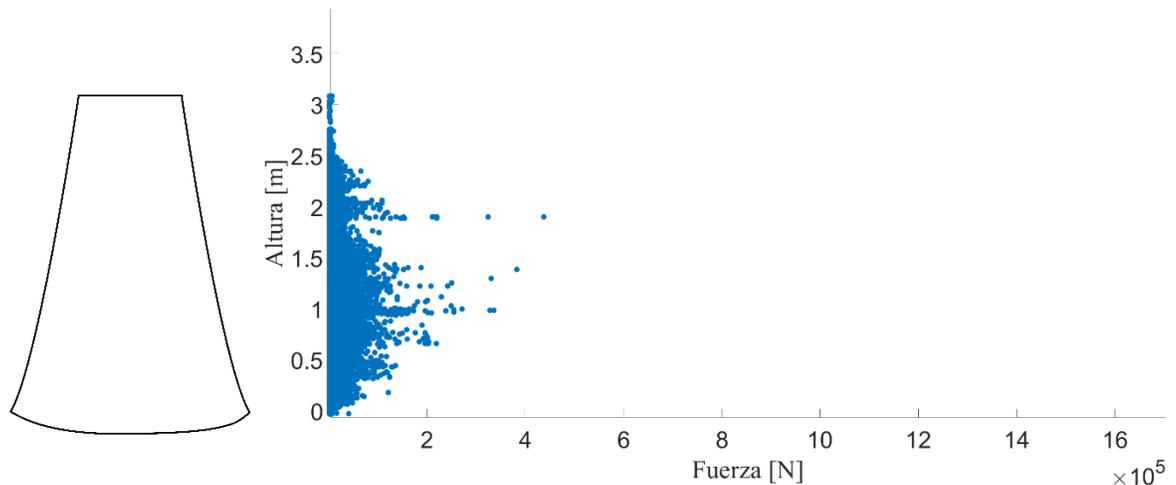


Figura 6.8. Magnitudes de las fuerzas tangenciales respecto a la altura del manto del chancador.

De las Figura 6.7 y Figura 6.8 se puede visualizar que, en ambas distribuciones de fuerza, en la zona entre los 0,5 y 1,5 metros de altura del chancador se concentran mayoritariamente las fuerzas espaciales. De esta manera, se tiene que estas zonas serian propensas a sufrir desgaste, ya que serían zonas deterioradas que al momento de aplicarse una fuerza de gran magnitud esta puede sufrir un desgaste mayor.

Dado esto, se realiza una distribución en 8 zonas las cuales se describen en Tabla 6.1, esto con el objetivo de cuantificar la zona más crítica, obteniendo las magnitudes promedio de cada zona, siendo

representadas con su respectivo error de cálculo en la Figura 6.9 y Figura 6.10 la fuerza normal y tangencial respectivamente.

Tabla 6.1. Rangos de estudio del chancador.

Zonas	Intervalo (metros)
Rango 1	0 – 0,4
Rango 2	0,4 – 0,8
Rango 3	0,8 – 1,2
Rango 4	1,2 – 1,6
Rango 5	1,6 – 2
Rango 6	2 – 2,4
Rango 7	2,4 – 2,8
Rango 8	2,8 – 3,2

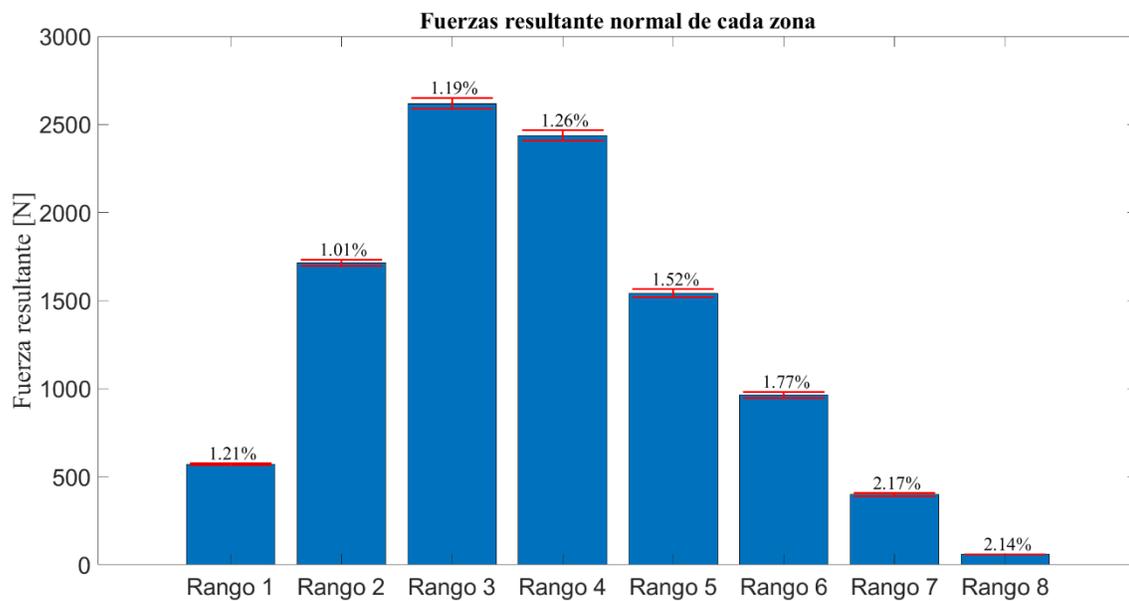


Figura 6.9. Fuerza normal resultante clasificada por zona.

De la Figura 6.9 y Figura 6.10 se tiene que la distribución por zona resultó idéntica en ambas fuerzas, la gran diferencia radica en la magnitud promedio de las fuerzas, donde la fuerza normal en el rango 3 asciende a los 2500 [N] en cambio en las fuerzas tangenciales se queda en los 900 [N].

A continuación, utilizando el filtro por zona obtenido numéricamente, se busca obtener una distribución probabilística de las fuerzas espaciales, la obtención de estas curvas tiene el beneficio que antes del funcionamiento del chancador, se sabrá como se distribuirán las fuerzas en el manto,

logrando tener el conocimiento de las zonas con mayor daño ocasionado por la trituración de las rocas. En la Figura 6.11 se observan las curvas de probabilidades de fuerza normales y tangenciales.

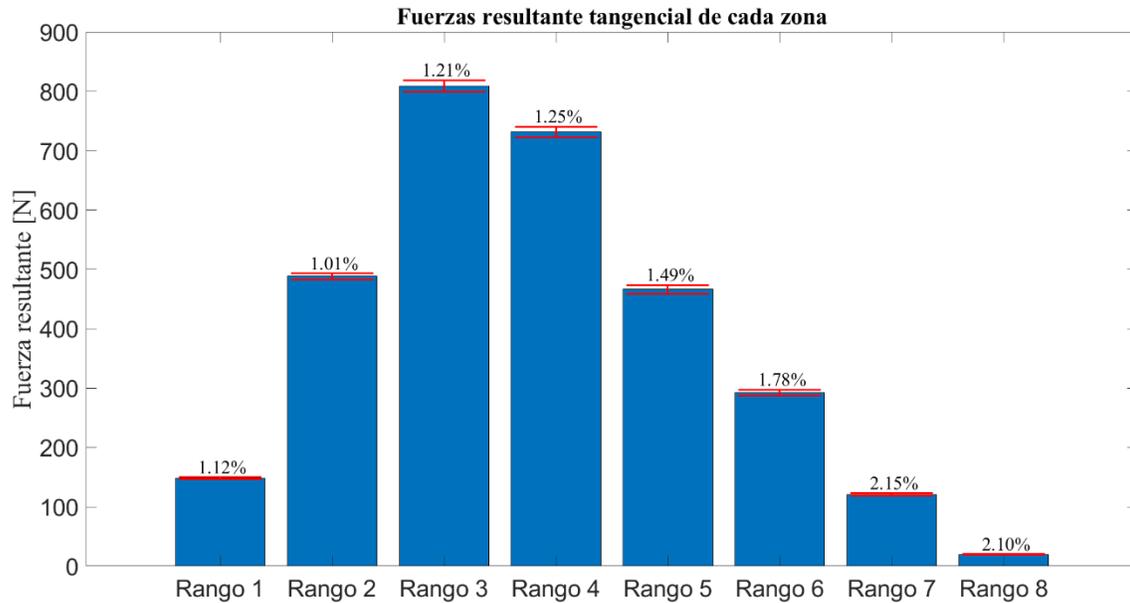


Figura 6.10. Fuerza tangencial resultante clasificada por zona.

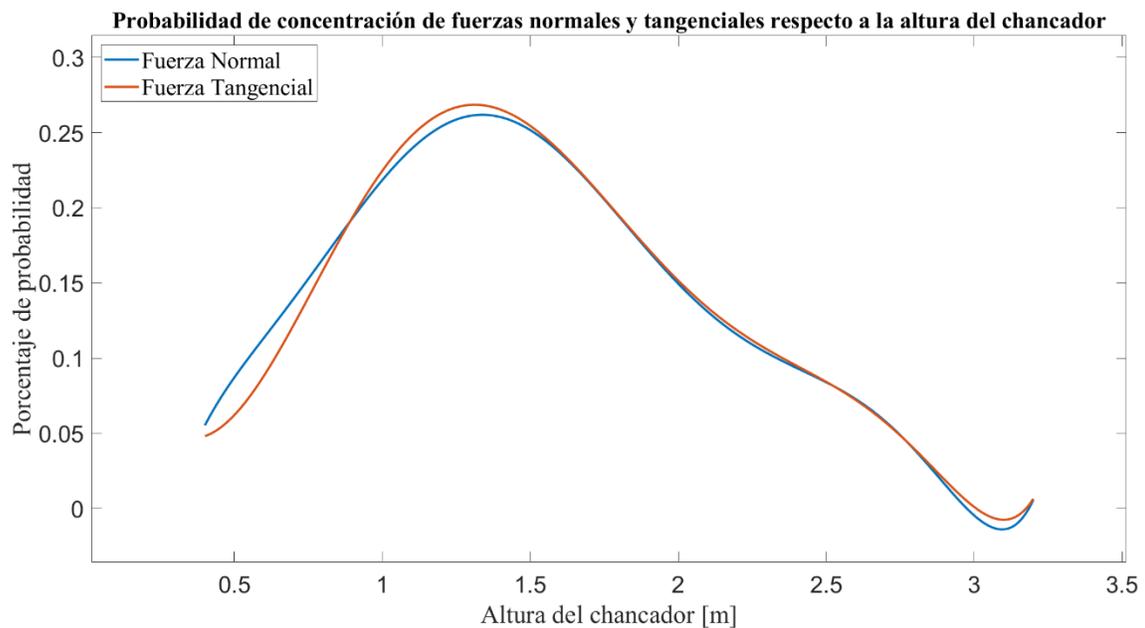


Figura 6.11. Curvas probabilísticas de las fuerzas normales y tangenciales.

Se destaca que las curvas probabilísticas son similares, demostrando que la principal diferencia entre estas fuerzas es la magnitud que poseen, y la dirección de aplicación de la fuerza, esto implica que las fuerzas tangenciales ocasionaran un grado menor de desgaste que las fuerzas normales.

La distribución probabilística entrega una visión de cuáles son las zonas más afectadas por el funcionamiento de la máquina, no obstante, analizando el desgaste medido por Rosario [Rosario, 2003] se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 6.12 que cuantifican el material desgastado antes de la mantención por reemplazo del revestimiento.

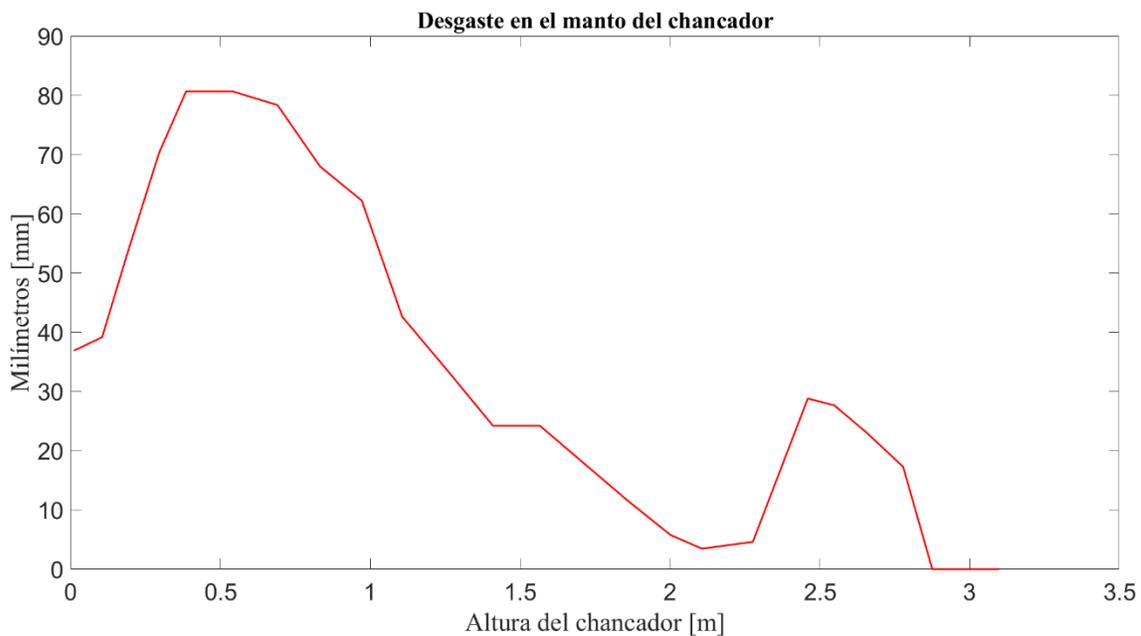


Figura 6.12. Desgaste medido experimentalmente del manto del chancador respecto a su altura [Fuente: Rosario, 2003].

En la Figura 6.12 se presenta una mayor superficie desgastada a la altura de 0,5 metros del chancador, caso contrario a lo que sucede en la concentración de fuerzas donde la mayor presencia de fuerzas espaciales ocurre en el rango 3 y 4 de estudio, que se encuentra entre los 0,8 y 1,6 metros del chancador, esto permite deducir que a pesar de tener una mayor concentración de fuerzas no significa que será la zona con mayor desgaste, por tanto existen más factores influyentes en la degradación del material, ya sea por la presencia de una fuerza de mayor magnitud en las zonas inferiores que provoquen un mayor desgaste, o que las fuerzas producidas en estas zonas tengan una mayor velocidad de impacto contra la superficie del manto, lo que ocasionaría fatiga en el material, provocando una mayor probabilidad de desgaste en estas zonas a pesar de estar en presencia de menos fuerzas que en las zonas superiores del chancador.

Dado esto resulta importante analizar la composición de la fuerza, velocidad de impacto y la geometría del chancador reforzando las zonas inferiores buscando una mayor resistencia del revestimiento, lo

que permitiría obtener una mejor durabilidad en estas zonas críticas, permitiendo obtener una mayor disponibilidad del chancador.

Capítulo 7

Conclusiones y perspectivas

7.1 Conclusiones

Se modeló un chancador giratorio de la literatura utilizando el método de elementos discretos con el software Rocky DEM.

La potencia es un parámetro complejo dentro de la modelación DEM debido a su alta variabilidad respecto a la partícula. Debido a esto, resulta importante comprender y analizar las curvas de energía del modelo de Tavares, dado que, en chancadores de tamaños superiores, el modelo presenta fallas. No obstante, posterior al cambio realizado al E_{∞} la potencia obtenida mediante la simulación DEM obtiene un error asociado del 38,5%, siendo que antes de la modificación de la curva el error asociado superaba el 300%.

El flujo másico con el cambio de energía se vio afectado disminuyendo su valor. Sin embargo, el error asociado de 3,3% es considerado correcta para términos de validación. El PSD del producto mostró una excelente concordancia con lo de la literatura, con un error asociado de 20,1%.

Con la distribución de fuerzas se tiene que las fuerzas de trituración se concentran mayoritariamente entre los 0,8 y 1,6 metros de altura, no obstante, en estas zonas no ocurre el mayor desgaste, esto se debe a diferentes factores que afectan a la magnitud del desgaste, ya sea por la velocidad y fuerzas de impacto que pueden fatigar y debilitar el revestimiento, dado esto resulta importante analizar más factores que afectan al desgaste, permitiendo comprender de mejor manera esta diferencia.

Mediante la distribución de las fuerzas espaciales se obtiene que las fuerzas normales y tangenciales se distribuyen en la superficie del chancador de igual manera, a pesar de esto, existe una gran diferencia en sus magnitudes, lo que ocasionará que las fuerzas normales tengan un mayor impacto en el desgaste de la superficie del chancador, provocando ya sea un desprendimiento del material o debilitando la superficie provocando que sea más probable que se desgaste en futuras operaciones del chancador.

Con el conocimiento de las zonas más críticas y como se distribuyen las zonas con mayor presencia de fuerza, es factible realizar un recubrimiento y modificaciones de geometría, lo que permitiría una mayor resistencia y durabilidad del manto del chancador, logrando un importante avance en la minera, permitiendo tener una mayor disponibilidad del chancador antes de su mantención.

Las curvas de probabilidad son importantes dado que, si se está analizando un chancador, resulta beneficioso saber cómo se distribuirán las fuerzas a lo largo de la altura del chancador, debido a que teniendo las fuerzas de trituración de ciertos materiales se sabrá el impacto que tendrá en las zonas críticas. Esto permite realizar análisis más profundos del desgaste en estas zonas logrando estimar la durabilidad del manto.

7.2 Perspectiva

Como trabajo a futuro se tiene un análisis exhaustivo de los parámetros del modelo de Tavares viendo las diferencias que resultan a aplicar el mismo modelo en otro software de métodos de elementos discretos como lo es EDEM.

Posteriormente se obtendrá el desgaste de forma numérica mediante diferentes modelos propuestos en la literatura, como lo es el modelo de Archard, Lindqvist, Finnie. Permitiendo comparar y determinar el modelo más preciso para cuantificar el desgaste de forma numérica. Para posteriormente buscar una correlación con los modelos de fuerzas obtenidos en este estudio. Y lograr determinar mejoras que nos permitan obtener una mayor disponibilidad del chancador.

Referencias

- [De Arruda y Tavares, 2021] De Arruda Tino, A. A., & Tavares, L. M. (2021). Simulating breakage tests using the discrete element method with polyhedral particles. *Computational Particle Mechanics*, 9(4), 811-823. <https://doi.org/10.1007/s40571-021-00448-4>
- [André y Tavares, 2020] André, F. P., & Tavares, L. M. (2020). Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles. *Powder Technology*, 372, 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.016>
- [Barrios, et al., 2020a] Barrios, G. K. P., Jiménez-Herrera, N., & Tavares, L. M. (2020). Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model. *Advanced Powder Technology*, 31(7), 2749–2758. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.05.011>
- [Barrios, et al., 2020b] Barrios, G. K., Jiménez-Herrera, N., Fuentes-Torres, S. N., & Tavares, L. M. (2020). Dem simulation of laboratory-scale jaw crushing of a gold-bearing ore using a particle replacement model. *Minerals*, 10(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/min10080717>
- [Bearman et al., 1998] Bearman, R., & Briggs, C. A. (1998). The active use of crushers to control product requirements. *Minerals Engineering*, 11(9), 849-859. [https://doi.org/10.1016/s0892-6875\(98\)00072-7](https://doi.org/10.1016/s0892-6875(98)00072-7).
- [Bond, 1952] Bond, F. C. (1952). Third theory of comminution. *Mining engineering*, 4, 484.
- [Chen et al., 2020] Chen, Z., Wang, G., Xue, D., & Bi, Q. (2020). Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method. *Powder Technology*, 376, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.034>
- [Cleary et al., 2015] Cleary, P. W., & Sinnott, M. D. (2015). Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 - Compression crushers. *Minerals Engineering*, 74, 178–197. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.021>.
- [Cleary et al., 2017] Cleary, P. W., Sinnott, M. D., Morrison, R. D., Cummins, S., & Delaney, G. W. (2017). Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM. *Minerals Engineering*, 100, 49–70. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.005>.
- [Cundall y Strack, 1979] Cundall, P. A. y Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47–65.
- [Delaney, et al., 2015] Delaney, G. W., Morrison, R. D., Sinnott, M. D., Cummins, S., & Cleary, P. W. (2015). DEM modelling of non-spherical particle breakage and flow in an industrial scale cone crusher. *Minerals Engineering*, 74, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.013>
- [Di Renzo y Di Maio, 2004] Di Renzo, A. y Di Maio, F. P. (2004). Comparison of contact force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, 59(3), 525–541.

- [ESSS, 2018] DEM Technical Manual 4.2. ESSS Rocky DEM, S.R.L.
- [Evertsson, 1999] Evertsson, M. (1999). Modelling of flow in cone crushers. *Minerals Engineering*, 12(12), 1479–1499.
- [FLSmidth, 2021] FLSmidth: Products (2021) Giratory Crusher TSUV. FLSmidth Corporation
- [Gröndahl et al., 2018] Gröndahl, A., Asbjörnsson, G., Hulthén, E., y Evertsson, M. (2018). Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*, 127, 15–21
- [Jeswiet y Szekeres, 2015] Jeswiet, J., & Szekeres, A. (2015). Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP*, 48, 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>.
- [Johansson et al., 2017] Johansson, M., Quist, J., Evertsson, M., & Hulthén, E. (2017). Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. *Minerals Engineering*, 103-104, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.015>.
- [Legendre y Zevenhoven, 2014] Legendre, D., & Zevenhoven, R. (2014). Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. *Energy*, 74(C), 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.036>.
- [Lindqvist y Evertsson, 2004] Lindqvist, M. y Evertsson, C. M. (2004). Improved flow- and pressure model for cone crushers.
- [Lindqvist y Evertsson, 2006] Lindqvist, M., & Evertsson, M. (2006). Development of wear model for cone crushers. *Wear*, 261(3-4), 435-442. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.12.010>.
- [Lindqvist, 2008] Lindqvist, M. (2008). Energy considerations in compressive and impact crushing of rock. *Minerals Engineering*, 21(9), 631–641.
- [Liu et al., 2018] Liu, R., Shi, B., Li, G., & Yu, H. (2018). Influence of operating conditions and crushing chamber on energy consumption of cone crusher. *Energies*, 11(5), 1102. <https://doi.org/10.3390/en11051102>.
- [Kick, 1885] Kick, F. (1885). *Das Gesetz der proportionalen Widerstande und seineanwendung*. A. Felix.
- [Machado et al., 2021] Machado, P. C., Pereira, J., & Sinatora, A. (2021). Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test. *Wear*, 476, 203726. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203726>.
- [Merello, 2016] Merello, B. (2016). "Caracterización de la Chancabilidad de Rocas Mineralizadas Provenientes del Proyecto Chuquicamata Subterranea" [Tesis para optar al grado de Magister]. Pontificia Universidad Católica De Chile.
- [Mosher, 2011] Mosher, J. (2011). *Crushing, Milling, and Grinding: Sme Mining Engineering Handbook chapter 14.2* (P. Darling, Ed.; pp. 1461-1480). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 3rd edición.

- [Moncada et al., 2021] Moncada, M., Toledo, P. A., Betancourt, F., & Rodríguez, C. F. (2021). Torque Analysis of a Gyratory Crusher with the Discrete Element Method. *Minerals*, 11(8), 878. <https://doi.org/10.3390/min11080878>.
- [Moncada, 2022] Moncada, M. (2022). «Análisis no estacionario de torque en chancadores primarios» [Tesis para optar al grado de doctor]. Universidad de Concepción.
- [Ospina y Beltrán, 2015] Ospina Villa, D. A., & Beltrán Solano, N. A. (2015). Análisis del comportamiento al desgaste abrasivo en el recubrimiento 140MXC-560AS producido mediante termo aspersion por arco eléctrico.
- [Quist et al., 2016] Quist, J., & Evertsson, C. M. (2016). Cone crusher modelling and simulation using DEM. *Minerals Engineering*, 85, 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.11.004>.
- [Rosario, 2003] Rosario, P. (2003). Optimization of primary gyratory crushing at Highland Valley Copper. University Of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0081159>
- [SERNAGEOMIN, 2021] SERNAGEOMIN (2021). "Anuario de la Minería de Chile 2021".
- [Simkus & Dance, 1998] Simkus R. y Dance A. (1998) Tracking Hardness and Size: Measuring and Monitoring ROM Ore Properties at Highland Valley Copper.
- [Svensson y Steer, 1990] Svensson, A. y Steer, J. (1990). New cone crusher technology and developments in comminution circuits. *Minerals Engineering*.
- [Tavares, 2009] Tavares, L. M. (2009). Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation. *Powder Technology* 90(3):327–339.
- [Walker, 2012] Walker S. (septiembre, 2012). "Combatiendo el Desgaste del Chancador". Equipo minero. <https://www.equipo-minero.com/contenidos/combatiendo-el-desgaste-del-chancador/>.
- [Toledo, 2022] Toledo, P. (2022). Nuevo Enfoque para Determinar el Comportamiento Dinámico de Chancadores para el Mejoramiento del Diseño y Operación [Tesis para optar al grado de Magíster]. Universidad de Concepción.
- [von Rittinger, 1867] von Rittinger (1867). *Lehrbuch der aufbereitungskunde. Erstand Korn*.
- [Walker, 2012] Walker S. (septiembre, 2012). "Combatiendo el Desgaste del Chancador". Equipo minero. <https://www.equipo-minero.com/contenidos/combatiendo-el-desgaste-del-chancador/>.
- [Weerasekara et al., 2016] Weerasekara, N., Liu, L. X., & Powell, M. (2016). Estimating energy in grinding using DEM modelling. *Minerals Engineering*, 85, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.013>.
- [Weerasekara et al., 2013] Weerasekara, N., Powell, M., Cleary, P. W., Tavares, L. M., Evertsson, M., Morrison, R., Quist, J., & De Carvalho, R. M. (2013). The contribution of DEM to the science of comminution. *Powder Technology*, 248, 3-24. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.05.032>.

Anexos

Carta Gantt

A continuación, se presentará la carta Gantt donde se detallan las actividades dispuestas para cumplir cada objetivo establecido para el desarrollo de la memoria de título.

CARTA GANTT - Modelación del desgaste en un chancador giratorio

