

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

Christian Rojas López<sup>1</sup>, Cristian Rodríguez Godoy<sup>1</sup>, Manuel Moncada Merino<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.

\* Email: manuelmoncada@udec.cl

### Resumen

Los chancadores son fundamentales en la minería del cobre en Chile debido a su alto consumo energético y costos operativos. Para entender parámetros como potencia, torque y desgaste, se emplea el método de elementos discretos (DEM), que simula con precisión los procesos mineros. Mejorar el estudio del desgaste puede reducir significativamente los costos operativos relacionados con el reemplazo de revestimientos. Este trabajo utiliza un modelo DEM para cuantificar las fuerzas en distintas zonas del chancador y relacionarlas con el desgaste del revestimiento, optimizando así el mantenimiento y la durabilidad del equipo. Se analizó un chancador Metso Superior 60-89 de la mina Highland Valley Copper en Canadá, evaluado con sensores láser. El modelo mostró buenos resultados en flujo másico, potencia y distribución de tamaño, con errores de 3,3%, 38,5% y 20,1% respectivamente, identificando mayores fuerzas entre 0,8 y 1,6 metros de altura y mayor desgaste a 0,5 metros.

**Palabras clave:** chancador primario; método de elementos discretos; desgaste.

### Abstract

Crushers are fundamental in copper mining in Chile due to their high energy consumption and operating costs. To understand parameters such as power, torque, and wear, the discrete element method (DEM) is employed, accurately simulating mining processes. Improving the study of wear can significantly reduce operating costs related to the replacement of liners. This work uses a DEM model to quantify the forces in different zones of the crusher and relate them to liner wear, thus optimizing maintenance and equipment durability. A Metso Superior 60-89 crusher at the Highland Valley Copper mine in Canada was analyzed, evaluated with laser sensors. The model showed good results in mass flow, power, and size distribution, with errors of 3,3%, 38,5%, and 20,1% respectively, identifying higher forces between 0,8 and 1,6 meters in height and greater wear at 0,5 meters.

**Keywords:** gyratory crusher, discrete element method; wear.

### 1. Introducción

El proceso de conminución es uno de los procesos más importantes dentro de la industria minera. Este proceso consiste en la fractura de las rocas extraídas de la mina sin procesar y esta fractura ocurre mediante esfuerzos mecánicos obteniendo fragmentos más pequeños [Mosher, 2011]. La conminución se divide en dos categorías principales: trituración y molienda. La primera etapa tiene como función

reducir el tamaño de las rocas, con el objetivo de facilitar el transporte del mineral a la etapa posterior, molienda, la cual tiene el objetivo de reducir el material chancado a tamaño de micras [Merello, 2016].

Para las distintas etapas de trituración existen varios tipos de chancadores donde, tenemos chancadores mandíbula, giratorio, de cono, de rodillo y de impacto. En la etapa primaria los chancadores suelen ubicarse en minas subterráneas debido a la complejidad de

transportar las grandes rocas a la superficie [Jeswiet Szekeres, 2015]. El tipo de máquina se selecciona de acuerdo con su flujo de alimentación, utilizando chancador de mandíbula cuando la alimentación es baja y un chancador giratorio cuando el flujo de alimentación es elevado y supera las 1000 tph [Mosher, 2011]. Un chancador giratorio consiste en un poste con giro excéntrico que tiene un cono como elemento de molienda. El manto es el elemento de desgaste que recubre el cono. El poste está apoyado en la parte superior por una estructura llamada araña, una plataforma excéntrica a través de un buje y en su zona inferior por un hidrosset, este último es un sistema hidráulico ajustable verticalmente.

La compresión del mineral se produce entre el poste (manto) y la cóncava, debido al movimiento nutacional que posee. El espacio más pequeño entre el cono y la cóncava se denomina ajuste de lado cerrado (CSS), mientras que el espacio opuesto a esta zona tiene una mayor abertura y se conoce como ajuste de lado abierto (OSS) [Quist et al., 2016].

El chancador es una máquina de vital importancia en la minería, dado esto su mantención y prevención resulta esencial para mantener esta máquina la mayor parte del tiempo disponible. Uno de los principales problemas es el desgaste, ya que el constante uso y la presión que se ejerce a la estructura para comprimir y fractura el material ocasiona un desgaste irregular a la geometría del revestimiento afectando el tamaño del espacio y el perfil de la cámara de alimentación [Lindqvist y Evertsson, 2006]. Este problema además perjudica la calidad y costo del producto, ya que se pierde la uniformidad del tamaño del producto, por tanto, baja el rendimiento del equipo. Esto provoca una reducción de la vida útil del revestimiento, ya que para mejorar la calidad de la producción es necesario realizar una mantención y reemplazar el revestimiento del chancador, lo que ocasiona un costo elevado en la producción minera [Walker, 2012].

Por lo tanto, analizar y comprender el desgaste resulta beneficioso a la minería, ya que lograr predecir las zonas de mayor magnitud del desgaste en periodos de tiempo establecido permite planificar mantenciones preventivas lo que ocasiona un menor tiempo fuera de servicio provocando que las mantenciones realizadas posean una mayor eficiencia aumentando el rendimiento y disponibilidad del chancador.

A lo largo de los años, se han llevado a cabo varias investigaciones de desgaste en los chancadores. Bearman et al. [Bearman et al., 1998] estudió las principales causas asociadas al desgaste en chancadores. De su estudio, se obtuvieron tres principales causas: a) mala alimentación de la máquina; b) mala distribución del tamaño del mineral; c) subalimentación del chancador. Lindqvist y Evertsson [Lindqvist y Evertsson, 2006], formularon

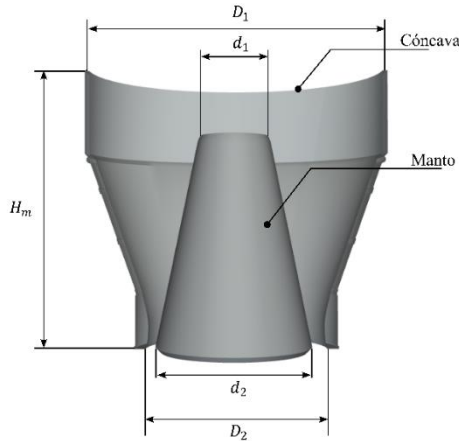
un modelo numérico capaz de obtener el desgaste del chancador que considera tanto los esfuerzos normales y de corte a lo largo de la superficie de trituración. Se obtuvieron buenos resultados, no obstante, los autores destacaron que el modelo no ha sido ejecutado en condiciones ideales en todo momento, lo cual es una limitación en el estudio y en la capacidad numérica del modelo. Persio Rosario [Rosario, 2003] analizó el desgaste del revestimiento y cómo afectaba en el rendimiento del chancador primario en la planta Highland Vallue Copper, Canadá. Para su estudio, cuantificó el desgaste a través de sensores láser que medían la geometría del perfil desgastado. Los resultados cuantificaron que el desgaste impactaba significativamente el rendimiento del chancador, además si se mejora la optimización y manejo de las mantenciones y reemplazo de los revestimientos se incrementa considerablemente la eficiencia y rentabilidad de las operaciones mineras. Quist et al. [Quist et al., 2016] analizaron y estudiaron el desgaste a través del método de elementos discretos (DEM), donde a través de la simulación buscaba evaluar el impacto que tiene el desgaste en el revestimiento en la capacidad, fragmentación de las rocas, y qué tanto afecta a la uniformidad del tamaño de las rocas. Dentro de los resultados obtenidos se destaca que el rendimiento de los chancadores giratorios cambia significativamente entre los revestimientos nuevos y desgastados a pesar de buscar mantener el CSS objetivo ajustando la posición vertical.

Dado esto en la comunidad científica existe el interés de analizar y cuantificar el desgaste y sus principales parámetros influyentes en la generación del desgaste, por lo que este trabajo tiene como objetivo modelar un chancador giratorio mediante el método de elementos discretos para su posterior análisis de las fuerzas de chancado.

## 2. Metodología

El análisis se realiza mediante el método de elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés), este es un método numérico mediante el cual es posible modelar distintos problemas ingenieriles tanto para materiales granulares y discontinuos. El chancador primario modelado corresponde al chancador superior de Metso 60-89 operando con mineral de cobre [Rosario, 2003]. En la Figura 1 podemos ver la geometría utilizada para la simulación DEM, esta fue obtenida a partir de un perfil del chancador y diseñada mediante un Software CAD. En la Tabla 1 se pueden ver las principales dimensiones que posee el chancador simulado. El movimiento de nutación del chancador se obtiene a partir de un punto de pivoteo, que se calcula a partir de la excentricidad y el ángulo de inclinación, que son  $46,05^\circ$  y  $0,24^\circ$  respectivamente. Dado que durante la trituración las partículas entran

en contacto entre sí y con el chancador (pared) se deben definir los parámetros de contacto que caracterizan el modelo los cuales se simplifican en la Tabla 2.



**Figura 1.** Geometría empleada para la simulación del chancador giratorio.

**Tabla 1.** Parámetros geométricos y materiales de las geometrías de la simulación DEM.

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

Para realizar la simulación es necesario definir el modelo de fractura que se utilizará en la simulación, en este estudio se utiliza el modelo de fractura de Tavares [Tavares, 2009] utilizando además la función Beta incompleta para la distribución de tamaño. Los parámetros de estos modelos para mineral de cobre son obtenidos de la literatura [De Arruda Y Tavares, 2022] y sus resultados son adjuntados en la Tabla 3.

No obstante, de los parámetros de la literatura, se modificó el valor de  $E_\infty$  a 100 J/kg. Esto se debe a que, en simulaciones iniciales, se obtuvieron valores elevados de potencia, por lo que se ajusta la curva de energía específica de fractura mediante este parámetro. Una vez realizada esta modificación, el valor de potencia de chancado se acercó a la realidad.

En la Tabla 4 se muestra los principales parámetros de material, tanto de la partícula (mineral de cobre) y las paredes de la geometría (acero).

**Tabla 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

**Tabla 3.** Parámetros del modelo de fractura para mineral de cobre [De Arruda y Tavares, 2022].

Variable	Valor
$E_\infty$ [J/kg]	100
$d_0$ [mm]	8,07
$\zeta$	1,22
$\sigma$	0,799
$\alpha_{1.2}/\beta_{1.2}$	0,448/10,508
$\alpha_{1.5}/\beta_{1.5}$	0,706/7,913
$\alpha_2/\beta_2$	0,959/5,780
$\alpha_4/\beta_4$	1,105/2,619
$\alpha_{25}/\beta_{25}$	0,981/0,524
$\alpha_{50}/\beta_{50}$	0,956/0,339
$\alpha_{75}/\beta_{75}$	0,934/0,255
$\gamma$	5,0
$A$ [%]	67,7
$b'$	0,029
$d_{min}$ [mm]	15

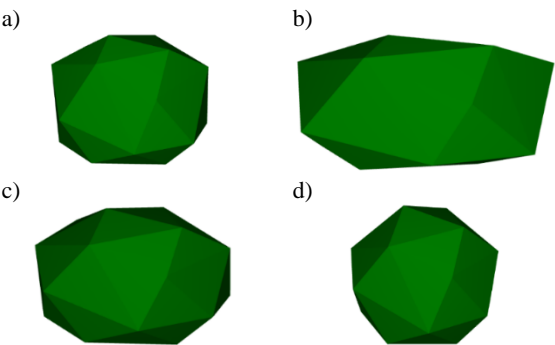
La forma del mineral de cobre se configuró como partículas poliédricas, estos parámetros que representa al mineral de cobre están resumidos en la Tabla 5, estos parámetros fueron estudiados y analizados por André y Tavares [André y Tavares, 2020], en la Figura 3 se presentan la representación de la forma de la roca utilizando los parámetros antes mencionados.

**Tabla 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 <sup>3</sup> ]	2930	7850

**Tabla 5.** Parámetros de forma de las partículas [André y Tavares, 2020].

Parámetros	Partícula			
	1	2	3	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
Número de esquinas	25	20	25	20
Grado supercuadrático	3,0	4,0	2,3	2,0



**Figura 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.

El chancador giratorio Metso Superior se encuentra en la minera Highland Valley Copper, Canadá. El chancador analizado tiene un flujo de alimentación de 4248 tph, una potencia nominal de 520 kW [Rosario, 2003]. El CSS del chancador es variable entre 127 y 140 mm, para el caso de estudio se utiliza el mínimo CSS. La granulometría de alimentación y del producto del chancador se presentan en la Figura 2 [Simkus y Dance, 1998].

3. Resultados

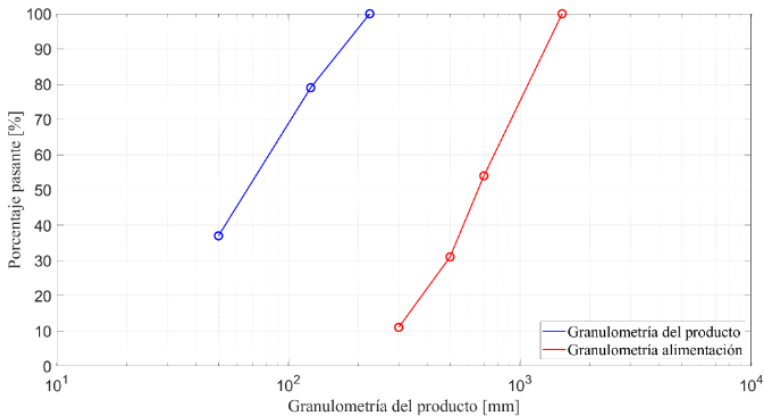
El modelo es validado comparando los resultados experimentales de la literatura con los obtenidos en las simulaciones DEM. Se comparará la potencia de chancado, flujo másico del producto y el  $p_{80}$  del producto. Los resultados obtenidos en la investigación se resumen en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados obtenidos de la validación de la simulación.

Parámetros	Experimental	Modelo DEM	Error %
Flujo másico [tph]	4150	4013,7	3,3
Potencia RMS de chancado [kW]	448,2	620,6	38,5
$p_{80}$ [mm]	124,2	128,5	3,5

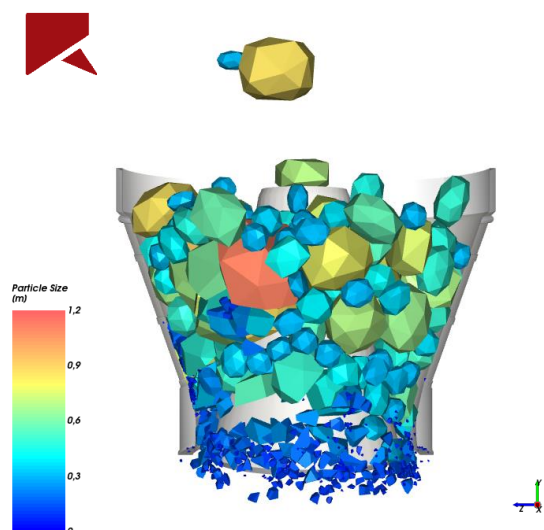
Cabe mencionar que la potencia entregada en el estudio de Rosario [Rosario, 2003] corresponde a la potencia eléctrica, dado esto para compararlo con la potencia de chancado se debe sustraer la potencia en vacío a los resultados. En la Figura 4 tenemos la representación de un instante del tiempo  $t = 15,25$  s, en este instante dentro de la cámara de trituración hay un total de 761 partículas.

Durante el funcionamiento del chancador uno de los principales problemas radica en el desgaste, esto se debe a que las piezas están sometidas a fuerzas ocasionadas por la compresión entre las partículas y la superficie del manto. El mecanismo de desgaste en el funcionamiento del chancador corresponde a la abrasión debido a la alta carga de impacto a la que se encuentran sometidos [Machado et al., 2021]. Este tipo de desgaste se refiere a la eliminación de material de una superficie causada por el contacto con partículas más duras, como asperezas. Existen dos tipos de desgaste abrasivos: de dos cuerpos y de tres cuerpos. En el caso del chancador el desgaste es de



**Figura 2.** Granulometría de alimentación y producto del chancador giratorio [Simkus y Dance, 1998].

tres cuerpos, dado que interactúan las rocas entre la superficie del manto y la cóncava [Ospina y Beltran, 2015].

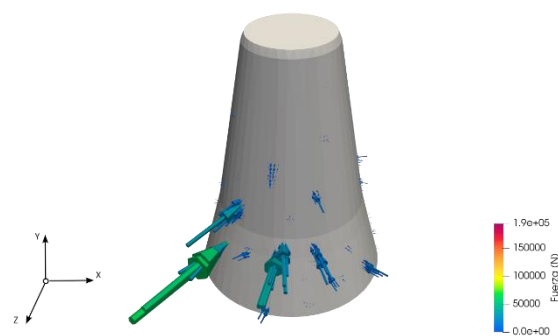


**Figura 4.** Captura de pantalla de la simulación del chancador primario en  $t = 15,25$  s mostrando la sección frontal del chancador. Las partículas están coloreadas de acuerdo con su tamaño, además posee un corte en la cóncava para visualizar las partículas.

Para comprender el desgaste es correcto analizar la distribución de fuerzas espaciales a lo largo de las distintas zonas del chancador, en la Figura 5 se presenta un postproceso en el software Paraview donde se pueden visualizar las fuerzas de chancado presentes en el tiempo  $t = 26,6$  s, en este instante se encuentra el CSS en la zona frontal de la imagen.

En la Figura 5 se puede apreciar que, aunque sea solo un paso de tiempo, la magnitud y cantidad de fuerzas presentes en el manto son de gran envergadura, lo cual provocará una mayor energía de impacto y presión sobre las superficies de chancado, lo que da como resultado una abrasión más significativa. Además, las fuerzas elevadas pueden inducir a fatiga y deformación plástica en la superficie, lo que provoca que el manto sea más susceptible al desgaste. Dado esto se analiza cómo se distribuyen las fuerzas considerando todos los pasos de tiempo de la simulación.

En primer lugar, se realiza una descomposición de las fuerzas de chancado en fuerzas en dirección normal y tangencial a la superficie del manto. Posterior a esto, se grafica en función de la altura del chancador a la cual fue producida la fuerza, esto nos permitirá analizar la altura que presenta una mayor concentración de fuerzas. En la Figura 6 y Figura 7. Fuerza normal resultante clasificada por zona. podemos ver la concentración de fuerzas normales y tangenciales respectivamente.



**Figura 5.** Fuerzas nodales en el tiempo 26,6 segundos.

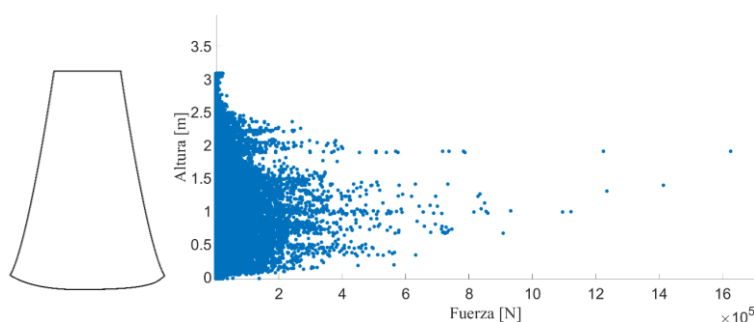
Como podemos notar en la Figura 6 y Figura 7. Fuerza normal resultante clasificada por zona., en ambas distribuciones existe una mayor concentración en la zona media baja del chancador entre 0,5 y 1,5 metros de altura. No obstante, la diferencia radica en la magnitud de las fuerzas, donde en la dirección normal la magnitud de las fuerzas es sumamente elevadas en comparación de las fuerzas en dirección tangencial. Para analizar de mejor manera las zonas principales donde existe una mayor concentración de fuerzas se realiza una clasificación por rangos de altura, esto con el objetivo de visualizar y obtener las zonas con mayor presencia de fuerzas, que nos permitirá efectuar análisis posteriores.

De esta manera se lleva a cabo un estudio de 8 rangos de estudio con un intervalo de crecimiento de 0,4 metros, en la Tabla 7 se resumen los 8 rangos de estudio.

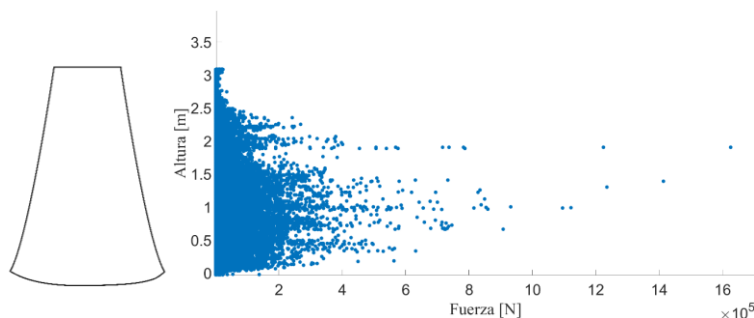
**Tabla 7.** Rangos de estudio del chancador.

Zonas	Intervalo (m)
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

Clasificando en función de su altura es posible analizar las fuerzas promedio presentes en cada rango de altura, obteniéndose los resultados presentes en la Figura 8 y Figura 9, donde se muestran las fuerzas normales y tangenciales respectivamente. Como podemos notar las fuerzas espaciales poseen una distribución similar, no obstante, la gran diferencia entre ambos radica en la magnitud de las fuerzas, donde las fuerzas normales la magnitud promedio en la zona más elevada alcanza los 2500 N, en cambio,



**Figura 6.** Fuerza normal resultante clasificada por zona.



**Figura 7.** Fuerza normal resultante clasificada por zona.

las fuerzas tangenciales se quedan por debajo de los 900 N.

Con los resultados obtenidos se busca obtener un ajuste probabilístico que nos describa el comportamiento de las fuerzas normales y tangenciales, de esta manera, utilizando los resultados obtenidos por cada zona del chancador, se obtiene las siguientes curvas probabilísticas para las fuerzas normales y tangenciales representadas en la Figura 10.

Para analizar las curvas probabilísticas se analizará el desgaste medido [Rosario, 2003] donde en su estudio obtuvo las mediciones de desgaste mostrado en la Figura 11.

En la Figura 11 podemos notar que existe 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 el mayor porcentaje de fuerzas ocurre entre el rango 3 y 4 de estudio que se encuentra entre los 0,5 y 1,6 metros del chancador, esto nos permite deducir que a pesar de tener una mayor concentración de fuerzas no significa que será la zona con mayor desgaste, dado que existe más factores influyentes en la degradación del material, donde en la zona de mayor desgaste pueda existir una mayor velocidad de compresión, o la dirección de la fuerza de compresión, entre otros, lo que podría ocasionar fatiga en el material haciéndolo más susceptible al desgaste. Dado esto resulta importante analizar más factores influyentes en el desgaste que

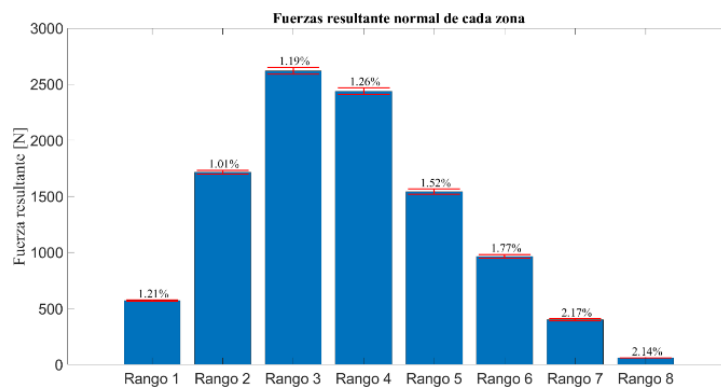
nos permita modelar curvas que nos aproximen de una buena manera el desgaste, logrando de esta manera una correlación entre desgaste y parámetros influyentes en el desgaste.

#### 4. Conclusión

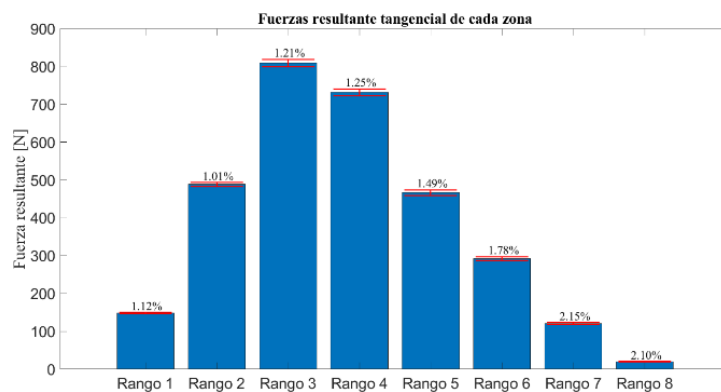
Se modeló un chancador giratorio con el método de elementos discretos usando Rocky DEM. La potencia es compleja de modelar debido a su variabilidad, pero tras ajustar el parámetro  $E_{\infty}$ , el error en la simulación se redujo del 300% a 38,5%. El flujo másico disminuyó con un error aceptable del 3,3%, y el PSD del producto tuvo un error de 20,1%, concordando bien con la literatura.

Las fuerzas de trituración se concentran entre 0,8 y 1,6 metros de altura, aunque el mayor desgaste ocurre en otras zonas debido a la velocidad y fuerzas de impacto. Las fuerzas normales tienen un mayor impacto en el desgaste, debilitando la superficie del chancador.

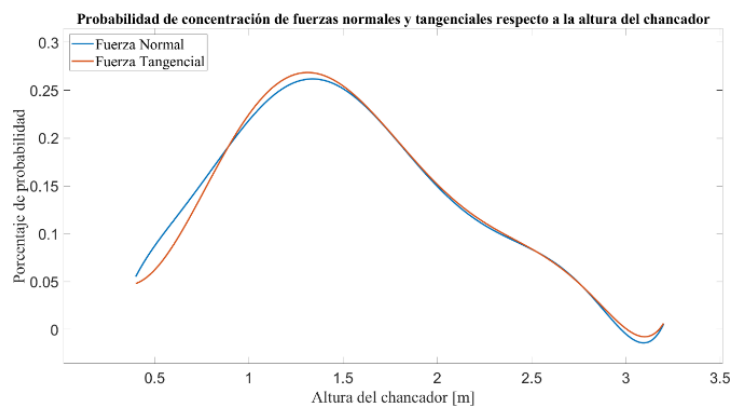
Conociendo las zonas críticas y la distribución de fuerzas, se pueden hacer recubrimientos y durabilidad del manto del chancador, aumentando su disponibilidad. Las curvas de probabilidad ayudan a predecir la distribución de fuerzas y a estimar la durabilidad del manto.



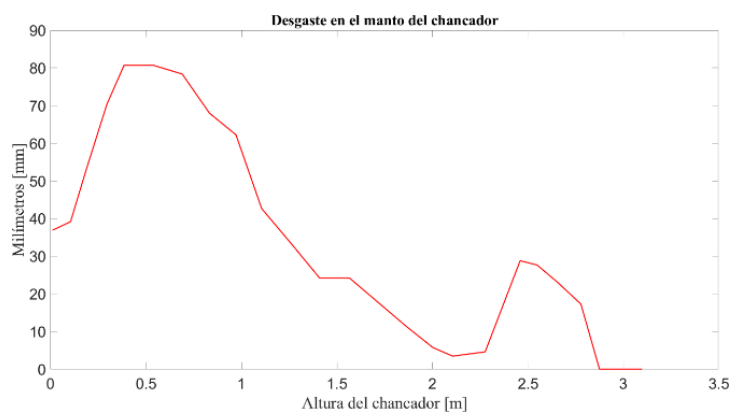
**Figura 8.** Fuerza normal resultante clasificada por zona.



**Figura 9.** Fuerza tangencial resultante clasificada por zona.



**Figura 10.** Curvas probabilísticas de las fuerzas normales y tangenciales.



**Figura 11.** Desgaste medido experimentalmente del chancador respecto a su altura [Fuente: Rosario, 2003].



## 5. Referencias

- [De Arruda y Tavares, 2022] De Arruda Tino, A. A., & Tavares, L. M. (2022). 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>
- [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).
- [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.
- [FLSmidth, 2021] FLSmidth: Products (2021) Giratory Crusher TSUV. FLSmidth Corporation
- [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>.
- [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>.
- [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 Subterránea" [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.
- [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 aspersión 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.
- [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/>.
- [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>.