

# Modelación de un tambor aglomerador mediante el método de elementos discretos.

Carlos Henríquez Navarrete<sup>1</sup>, Manuel Moncada Merino<sup>2</sup>, Cristian Rodríguez Godoy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad De Concepción, Chile. Email: chenriquezn2019udec.cl

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad De Concepción, Chile. Email: manuelmoncada@udec.cl

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad De Concepción, Chile. Email: crrodrig@udec.cl

## Resumen

En la industria minera, existen múltiples equipos que permiten llevar a cabo el proceso de aglomeración. El tambor aglomerador se destaca como uno de los equipos más utilizados para el proceso de granulación, especialmente en la preparación del material para la lixiviación por pilas, donde se busca reducir los finos y mejorar la permeabilidad. A pesar de su amplia aplicación, existen limitados estudios que propongan modelos numéricos para profundizar en la optimización y mejora de estos equipos.

En esta investigación se presenta un estudio detallado del comportamiento de un tambor aglomerador mediante simulación numérica por el método de elementos discretos (DEM). El objetivo principal es analizar el proceso de aglomeración de material en un tambor de 4.8 m de diámetro y 16.3 m de largo, ubicado en la minera BHP Spence, utilizando el software ANSYS Rocky. Se utilizó un modelo de contacto con puente líquido para simular la adherencia entre partículas durante el proceso. Se calibraron los parámetros del modelo según investigaciones previas y ensayos experimentales similares. Los resultados incluyen el comportamiento del material al interior del tambor, demanda de potencia y torque durante la operación del tambor. Se compararon los resultados de la simulación DEM de BHP con simulaciones realizadas por dinámica de fluidos computacional.

Se concluye que del modelo numérico DEM se obtiene resultados de potencia y torque, el cual tiene un error del 24% respecto a la simulación CFD. Por otra parte, se obtiene que el modelo tiene un error del 11% en potencia y torque con datos experimentales de un tambor aglomerador con dolomita.

**Palabras clave:** Tambor aglomerador, aglomeración, simulación DEM.

## Abstract

In the mineral processing industry, there are several equipment used for the agglomeration process. The agglomerator drum stands out as one of the most employed devices for granulation, especially in preparing materials for heap leaching, aiming to reduce fines and enhance permeability. Despite its widespread use, there are limited studies proposing numerical models to delve into the optimization and improvement of these equipments.

In this research presents a detailed study of the behavior of an agglomerator drum using numerical simulation via the Discrete Element Method (DEM). The primary objective is to analyze the material agglomeration process within a drum measuring 4.8 m in diameter and 16.3 m in length, located at BHP Spence mine, utilizing ANSYS Rocky software. A liquid bridge contact model was used to simulate particle adherence during the process.

Model parameters were calibrated based on previous research and similar experimental trials. Results include the material's behavior inside the drum, power demand, and torque during drum operation. Comparison was made between BHP's DEM simulation results and Computational Fluid Dynamics simulations.

It is concluded that the DEM numerical model provides power and torque results with a 24% error compared to CFD simulations. Additionally, the model shows an 11% error in power and torque compared to experimental data from a dolomite agglomerator drum.

**Keywords:** Agglomerator drum, agglomeration, DEM simulation

## 1. Introducción

Chile posee una de las reservas de cobre más grandes del mundo, con estimaciones que superan los 190 millones de toneladas, permitiéndole ser el mayor productor de cobre a nivel mundial, con una participación en el mercado del 26.5% en 2022. La

industria minera es una de las actividades industriales más importantes para la economía de Chile, representado 14.6% del producto interno bruto del país y representado el 58% de las exportaciones totales del país en 2022 [1]. Por otro lado, la ley promedio de los minerales de cobre ha disminuido con el tiempo, debido a esta consideración, es necesario la

optimización o la búsqueda de nuevos métodos de extracción de cobre [2].

Uno de los métodos de extracción de cobre para minerales oxidados, es mediante el proceso de lixiviación, un proceso hidrometalúrgico donde se obtiene cobre de alta pureza por medio del uso de soluciones líquidas para su recuperación. Para lograr una lixiviación eficiente es necesario un proceso previo denominado aglomeración. El proceso de aglomeración es considerado como un método de pretratamiento del material, antes de llegar al apilamiento, que tiene como fin promover la operación de lixiviación en pilas. El proceso de aglomeración consiste en la formación de glómeros o partículas de mayor tamaño a partir de la unión de los finos (partículas más pequeñas) que se adhieren alrededor de partículas más gruesas, gracias a la adición de humedad [3]. Según investigaciones y base de datos industriales, el proceso de aglomeración mejora la permeabilidad del material mineralizado utilizado en la lixiviación, en un rango de 10 a 100 veces. Esta mejora conlleva una reducción del tiempo necesario para el proceso entre un 33% y 50%, y la reducción en el uso de ácido sulfúrico entre un 20 y 30%. En efecto, el buscar nuevos métodos de optimización del proceso de lixiviación, podría ayudar a disminuir los costos operacionales de la industria y el uso eficiente de la energía [2].

En la actualidad, determinar los parámetros óptimos de trabajo de un tambor aglomerador minero de forma empírica en la industria, considerando los múltiples parámetros de operación, implica la exposición a un gran riesgo. El mayor riesgo expuesto al realizar una acción de este tipo es el daño parcial o total de la maquinaria [4]. Las consecuencias principales para las empresas son la no producción por periodos de tiempo y gastos de mantenimiento no previstos.

Dada la mencionada problemática, en la actualidad existen investigaciones que orientan sus objetivos en validar un modelo computacional capaz de simular el comportamiento del mineral o material en los equipos mineros. Los modelos numéricos desarrollados por diversos autores son capaces de generar resultados cercanos o representativos a la realidad [5]. Los resultados de estos modelos numéricos permitirían maximizar y mejorar el diseño y la eficiencia de operación de estos equipos. Un modelo por el método de elementos discretos (DEM) o por dinámica de fluidos computacional (CFD) permite evaluar las fuerzas, potencia y torque a los que se somete el tambor y su sistema motriz. El analizar y estudiar los resultados que se pueden obtener por los métodos numéricos, es posible determinar los parámetros adecuados de operación. Sin embargo, el flujo de partículas al interior del tambor aglomerador no está del todo estudiado [6, 7].

Nosrati et al. [8] realizó un análisis del comportamiento de la aglomeración en un tambor con datos experimentales. Concluyeron que, a partir de una dosificación de aglutinante y tiempo preestablecidos, el aumento de la velocidad del tambor conduce a la producción de gránulos más grandes. Trung et al. [9] investigaron el crecimiento de un único gránulo dentro de un flujo denso de una distribución inicialmente homogénea de partículas húmedas y secas con el método de elementos discretos. Pachón-Morales et al. Las simulaciones DEM fueron útiles para estudiar los efectos aislados de la distribución y cohesión del flujo de partículas. Wang et al. [10] estudiaron la granulación en un tambor rotatorio con un modelo DEM para su aplicación en el proceso de sinterización de mineral de hierro.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo numérico por el método de elementos discretos (DEM), a través del software ANSYS Rocky, con el objetivo de modelar y analizar el comportamiento del mineral durante la aglomeración para un tambor aglomerador minero. Considerando modelos de adhesión y parámetros de operación reales. El propósito principal es comprender y analizar comportamiento del material al interior del tambor, y generar datos de potencia y torque en el tiempo. Se espera que los resultados se asemejen a las condiciones reales de operación, para lograr la optimización del proceso y toma de decisiones importantes en la industria minera.

## 2. Metodología

El modelo numérico se desarrolló mediante el método de elementos discretos. El método de elementos discretos es una técnica numérica utilizada en la ingeniería y ciencias aplicadas para el estudio de flujos granulares. Nos permite conocer y analizar el comportamiento de las partículas con su entorno.

Para esta investigación se utilizaron los siguientes modelos para representar las fuerzas de interacción entre partículas y paredes.

- I. Fuerzas normales: resorte lineal histerético.
- II. Fuerzas tangenciales: resorte lineal con límite de Coulomb.
- III. Resistencia a la rodadura: resorte lineal con límite a la rodadura (tipo C).
- IV. Fuerzas adhesivas: puente líquido.

## 3. Calibración de parámetros

En la literatura [11, 12] se establece que la composición del material que entra al tambor aglomerador este compuesto en un 98% de partículas de un diámetro menor a 19 mm. Debido al costo computacional que involucra generar la una cantidad de partículas de este tamaño, y las limitaciones existentes de los equipos, se

escalas las partículas un 45%, considerando los factores de escala para un material manteniendo un grado aceptable de precisión en los resultados [13].

### 3.1. Densidad

Para la configuración de las paredes del tambor aglomerador, se investigan algunos de los fabricantes de los equipos. El fabricante de tambores aglomeradores menciona que la fabricación de los equipos se realiza con acero al carbono ASTM A36, el cual posee una densidad de  $7850 \text{ kg/m}^3$  [14]. Para la simulación de mineral, se considera la densidad aparente de la pulpa igual a  $1600 \text{ kg/m}^3$  [11].

### 3.2. Coeficiente de restitución

Se obtiene el coeficiente de restitución de la investigación de [11], con un valor igual a 0.4, el cual es obtenido por simulaciones realizadas por CFD por otros autores con materiales utilizados en la industria minera del cobre.

### 3.3. Coeficiente de roce

Para simplificar la calibración de parámetros, y el sistema estará en constante movimiento, se considera que el coeficiente de roce estático y dinámico son iguales. A partir del trabajo de [13] y [15], se obtiene coeficiente de roce entre partículas en un rango de 0.6 y 0.8, por lo que se decide utilizar un promedio, un coeficiente igual a 0.7. De forma análoga, se obtiene el coeficiente de roce entre pared y partículas igual a 0.3.

## 4. Verificación y precisión del modelo DEM

En este capítulo, se estudiará investigaciones relacionadas con tambores aglomeradores con la finalidad de ajustar y calibrar los parámetros del modelo numérico DEM. Se utilizan resultados bibliográficos para comprar los resultados con simulaciones DEM que permitan ver la confiabilidad y precisión del modelo numérico.

### 4.1. Distribución de humedad y aglomeración de partículas

Para calibrar el modelo numérico del tambor real en términos del comportamiento de humedad e inyección de agua, se utilizan la investigación, con el cual se determinan los parámetros relacionados con el puente líquido e inyección de agua, con la finalidad de determinar la distribución de humedad y la existencia de fuerzas de adhesión que provocara aglomeración de partículas, en efecto, la formación de glómeros. Se utiliza el estudio realizado por [10] para determinar parámetros no físicos del puente líquido.

Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 1. A partir de los resultados obtenidos y de la literatura [10], podemos mencionar que se obtiene una distribución de humedad similar en el tiempo, a partir de una zona de inyección de agua. En la simulación se visualizan

formación de glómeros, los cuales desarrollan su crecimiento con el paso del tiempo y humectación. A partir de los resultados obtenidos, se obtienen parámetros de no adhesión de partículas en las paredes, asignado un valor igual 0 en la contribución de volumen del puente líquido en la interacción entre partículas – paredes. Además, se obtiene el ángulo de contacto entre partículas para obtener la aglomeración, con un valor igual a  $30^\circ$ .

**Tabla 1.** Parámetros para simulación de tambor aglomerador para el proceso de sinterización de mineral de hierro.

Parámetros	Valor
Dimensiones [m]	0.1x0.05
Velocidad de rotación [rpm]	28
Grado de llenado [%]	12
Densidad [ $\text{kg/m}^3$ ]	4760; 1100; 2800
Diámetro de partículas [mm]	0.6-10; 0.5; 0.5
Numero de partículas	179797; 29739; 61201
Módulo de Young [MPa]	24.2; 5.37; 24.2; 205400
Coeficiente de fricción partícula - partícula	0.5
Coeficiente de fricción partícula – pared	0.4
Coeficiente de restitución partícula - partícula	0.5
Coeficiente de restitución partícula - pared	0.5
Coeficiente de rodadura	0.3
Fracción de volumen del puente	0.05
Relación de separación mínima del puente	0.01
Tamaño de zona de inyección [m]	0.02x0.005x0.05
Ángulo de contacto del puente [ $^\circ$ ]	30
Tamaño de zona de inyección [m]	0.1x0.03x0.4
Humedad [%]	8

### 4.2. Torque y potencia

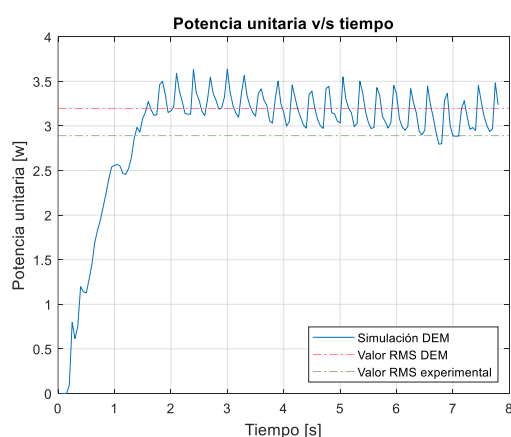
Para determinar la precisión del modelo en torque y potencia, se utiliza el estudio experimental [11], en el cual utilizan un tambor para aglomerar dolomita, para obtener datos de potencia y torque en el tiempo. En la simulación se utilizan los modelos de contacto. Los parámetros utilizados en la simulación se muestran en la Tabla 2.

En la Figura 1, la curva de color azul muestra los resultados de la simulación realizada por DEM, en el cual se obtuvo la potencia unitaria, durante 8 segundos. Se calcula la potencia RMS entre los segundos 2 y 8, donde el flujo de partículas se estabiliza y el tambor se encuentra en régimen estacionario, el valor RMS de la potencia unitaria es de 3.20W. El valor RMS de la potencia unitaria en régimen estacionario obtenido experimentalmente por [16] es de 2.85W, obteniendo

un error del 12% entre la simulación DEM y resultados de laboratorio.

**Tabla 2.** Parámetros para simulación de tambor aglomerador para el proceso de sinterización de mineral de hierro.

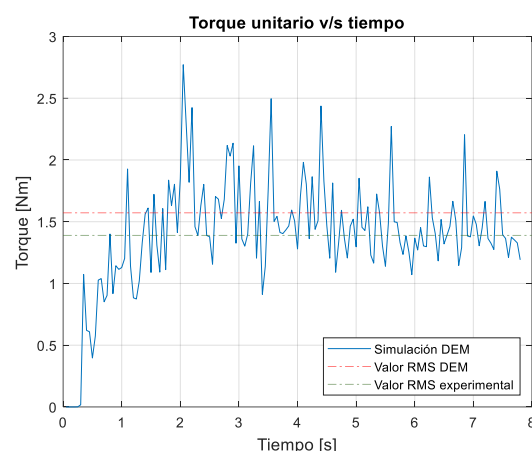
Parámetros	Valor
Dimensiones [m]	0.5x0.4
Velocidad de rotación [rpm]	20
Grado de llenado [%]	10
Ángulo de reposo natural [°]	45
Densidad (aparente) [ $kg/m^3$ ]	1111.3
Diámetro de partículas [mm]	0.5
Numero de partículas	38 491
Módulo de Young [GPa]	58.84
Coefficiente de fricción partícula - partícula	0.5
Coefficiente de fricción partícula - pared	0.4
Coefficiente de restitución partícula - partícula	0.3
Coefficiente de restitución partícula - pared	0.3
Coefficiente de rodadura	0.4
Fracción de volumen del puente	0.05
Relación de separación mínima del puente	0.01
Ángulo de contacto del puente	30
Tamaño de zona de inyección [m]	0.1x0.03x0.4
Humedad [%]	13.5



**Figura 1.** Gráfico de potencia unitaria de resultados obtenidos experimentalmente [16] y por simulación DEM.

De forma análoga al procedimiento anterior, se calcula el torque unitario en el tiempo. Los resultados el valor RMS del torque unitario es de 1.57 N/m a través de simulación DEM. El valor RMS del torque unitario en régimen estacionario obtenido experimentalmente por [16] es de 1.40N/m, obteniendo un error del 12% entre

la simulación DEM y resultados de laboratorio. Los resultados se muestran en la Figura 2.



**Figura 2:** Gráfico de torque unitario de resultados obtenidos experimentalmente y por simulación DEM. Fuente: [16] y Elaboración propia.

## 5. Desarrollo del modelo numérico

En este capítulo se presentan los parámetros y configuraciones utilizadas para la simulación del modelo DEM, basándose en el estudio del tambor de [11]. Además, se considera el mencionado estudio para realizar un análisis comparativo de resultados.

El desarrollo de esta investigación implicó la realización de una simulación por el método de elementos discretos, con el objetivo de estudiar la distribución de las partículas de forma axial y transversal. Por otra parte, debido a él gran tamaño del tambor, la limitación de partículas que se deben generar para el desarrollo del modelo y las capacidades de los equipos del departamento de ingeniería mecánica, se decidió llevar a cabo la simulación con un volumen fijo de partículas.

### 5.1. Caso en estudio

El desarrollo de este trabajo se realiza a partir de un caso real, particularmente el desarrollado por [11], quien estudio el torque de un tambor aglomerador de la minera BHP SPENCE. Minera Spence está ubicada en la comuna de Sierra Gorda, región de Antofagasta, en el kilómetro 62 de la ruta 25, a 1.750 msnm.

Las especificaciones técnicas que posee el equipo son: 4.8 m de diámetro interno, 16.3 m de largo y posee un ángulo de inclinación de 6.5°. Su capacidad nominal es 2800 ton/h. el rango de velocidad de rotación es entre 4 a 7 rpm.

### 5.2. Software y condiciones de simulación

Para el desarrollo de este proyecto de investigación las simulaciones se desarrollaron el software ANSYS Rocky 2023 R1.1 en un computador del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad De Concepción. Las características técnicas del computador se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Características del computador utilizado para simulación.

Componente	Detalle
Procesador	Intel core i7-7700k
Memoria RAM	16 GB
Tarjeta gráfica	Nvidia Quadro P4000
Almacenamiento	HDD 1 TB

El tiempo de ejecución para llevar a cabo la simulación fue de aproximadamente de 10 a 15 días, para obtener como resultado, un tiempo de 15 segundos de simulación. Además, se desarrollaron simulaciones prueba y verificación de parámetros.

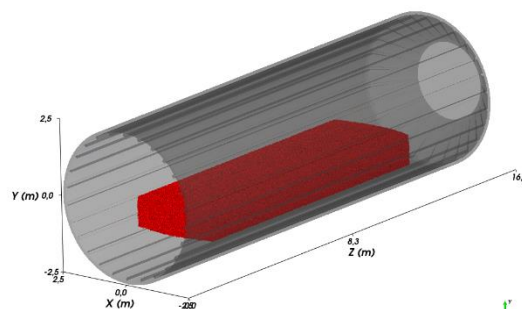
### 5.3. Geometría, movimiento, grado de llenado, humedad y partículas.

Para representar el tambor aglomerador de la minera, se considera un modelo simplificado. En consecuencia, se modela en el programa Inventor de AUTODESK solo la estructura principal. El modelo se muestra en la Figura 3.

La granulometría del material utilizado en el proceso de aglomerado es de 19mm. Por otra parte, debido a las limitaciones de los equipos utilizados, se debió aumentar el diámetro de las partículas, para disminuir el número de ellas. Finalmente, las partículas utilizadas en el modelo son escaladas en un 45% en base al tamaño del material real, resultando en un diámetro de 27.55mm. Además, se utiliza una geometría esférica

Para lograr una comparación de resultados entre la simulación DEM y CFD, se utiliza un grado de llenado del 10% con un porcentaje de humedad del 8%. En consecuencia, se utiliza un ingreso volumétrico de masa de 47194.4 kg o 1616435 partículas, y se agrega una masa líquida de 0.00234 kg por partícula [11].

Se generan múltiples pruebas de simulación, en los cuales no es posible un ingreso constante de partículas (flujo masico), ya que el costo computacional (memoria RAM) no permite generar la cantidad de partículas necesarias para 15 segundos. Por lo tanto, se decide por un ingreso volumétrico de partículas.



**Figura 3.** Geometría CAD del tambor aglomerador y captura del modelo numérico en ANSYS ROCKY DEM. Fuente: Elaboración propia.

### 5.4. Propiedades de los materiales

A continuación, se detallan las propiedades de cada uno de los materiales utilizados para el modelo. Las propiedades que se detallaran son: densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo de corte, características del modelo de puente líquido.

En esta simulación el material de las paredes del tambor, tapas y receptor se consideran que son de acero ASTM A-36. La Tabla 4 presenta las propiedades del material correspondiente a los elementos mencionados.

**Tabla 4.** Propiedades de las paredes del tambor. Fuente: [14].

Propiedades	Valor
Densidad [ $kg/m^3$ ]	7850
Módulo de Young [ $GPa$ ]	210
Coeficiente de Poisson	0.3

Las propiedades del material de alimentación o partículas son los que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Propiedades del material de cobre (partículas). Fuente: [11].

Propiedades	Valor
Densidad [ $kg/m^3$ ]	1600
Módulo de Young [ $GPa$ ]	0,1
Coeficiente de Poisson	0.3

El líquido que se utilizó como intermediario en la fuerza de adhesión fue el agua, con las propiedades que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Propiedades del líquido – agua. Fuente: [17].

Propiedades	Valor
Densidad [ $kg/m^3$ ]	1000
Viscosidad [ $Pa s$ ]	0,001
Tensión superficial [ $N/m$ ]	0.072
Fracción máxima de líquido	0.01

5.5. Interacción entre materiales

En esta simulación se tienen 2 materiales, los cuales corresponden a las partículas y paredes (límites), para cada par de materiales en contacto se debe definir un conjunto de propiedades de interacción de materiales.

Las propiedades par interacción entre partículas y paredes, se presenta en la Tabla 7 y para partículas en la Tabla 8.

**Tabla 7.** Propiedades de interacción entre partícula y paredes. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades			Valor
Coefficiente de fricción estática	de	fricción	0.3
Coefficiente de fricción dinámica	de	fricción	0.3
Coefficiente de restitución			0.4
Fracción del puente líquido			0.05
Ángulo de contacto			30°

**Tabla 8.** Propiedades de interacción entre partícula y partícula. Fuente: Elaboración propia.

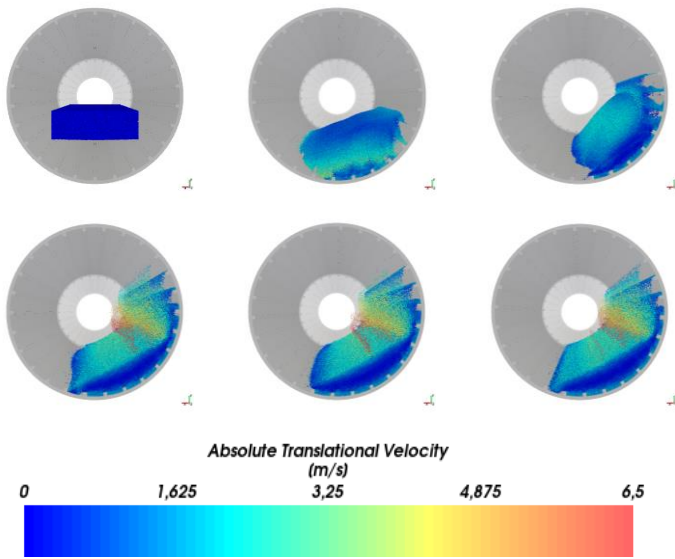
Propiedades			Valor
Coefficiente de fricción estática	de	fricción	0.7
Coefficiente de fricción dinámica	de	fricción	0.7
Coefficiente de restitución			0.3
Fracción del puente líquido			0.05
Ángulo de contacto			30°

6. Resultados

6.1. Régimen de partículas

Como se muestra en la Figura 4, podemos observar el comportamiento del material en la sección transversal tambor en distintos instantes de tiempos, específicamente en los instantes  $t=0s$ ,  $1s$ ,  $2s$ ,  $8s$ ,  $12s$  y  $15s$ . En el instante tiempo  $t=0s$ , podemos visualizar el volumen de partículas generado. Durante el transcurso del tiempo, las partículas caen sobre las paredes del tambor y se logran distribuir de forma uniforme, y en efecto, el tambor comienza a operar en régimen estacionario. En el tiempo  $t=8s$ , podemos identificar la formación de un perfil en régimen estacionario. Como resultado, se logra reconocer la capa activa y pasiva, en colores celeste y azul, respectivamente. Es importante mencionar que, durante el régimen estacionario, se observa que el material en movimiento adquiere un régimen rodante, un régimen deseado para el proceso de aglomeración.

En conjunto con el mapa de color, podemos evidenciar el perfil de velocidades en el que se encuentra el material en régimen estacionario. Se identifica que la capa pasiva, que se destaca de color azul, adquiere una velocidad traslacional absoluta cercana a los  $0\text{ m/s}$ . Por otra parte, la capa activa, que se destaca de color celeste, las partículas se mueven con una velocidad traslacional absoluta en el rango de los  $1.6$  y  $3.2\text{ m/s}$ . Además, hay partículas que tienen una mayor velocidad, ocasionada por el depósito del material en los lifters del tambor, lo cual ocasiona que por la fuerza de gravedad caigan estas partículas y alcancen velocidades en el rango de los  $4.7$  y  $6.5\text{ m/s}$ .



**Figura 4.** Régimen y distribución de partículas en sección transversal de tambor aglomerado de 4.8m de diámetro en simulación. Tiempos de simulación  $t=0s$ ,  $1s$ ,  $2s$ ,  $8s$ ,  $12s$  y  $15s$ . Fuente: Elaboración propia.



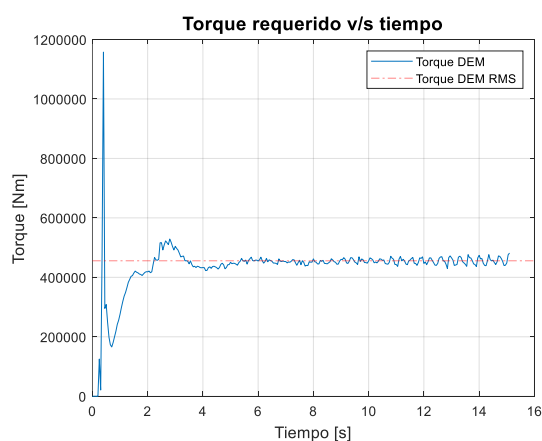
## 6.2. Resultados de potencia

En la **Error! Reference source not found.**, podemos observar un gráfico que muestra la demanda de potencia requerida por el tambor aglomerador para su rotación durante el tiempo que se realizó la simulación. Esta potencia está condicionada a un grado de llenado del 10% y una humedad del material del 8%. Podemos ver que los primeros segundos la potencia se genera un peak, específicamente en el segundo  $t=0.45s$  alcanza una potencia máxima de  $633195\text{ W}$ . Esto es provocado por la caída abrupta del material en el interior del tambor, ya que se requiere una cantidad considerable de energía para lograr sacar las partículas de su estado de reposo.

Los cambios abruptos de potencia entre el segundo  $t = 0\text{ s}$  y  $t = 4.4\text{ s}$ , son debido a la distribución no uniforme de las partículas dentro del tambor. Entre el rango de tiempo  $t = 0\text{ s}$  y  $t = 8.15\text{ s}$  el tambor sufre un proceso de régimen transiente, en el cual las partículas se distribuyen por las paredes del tambor. Finalmente, desde el segundo  $t=8.15$  al  $t=15$  el tambor aglomerador tiene un comportamiento estacionario, donde la demanda de potencia es periódica durante el tiempo. El valor RMS, durante el régimen estacionario, es de  $310180\text{ W}$ .

## 6.3. Resultados torque

En la Figura 5, podemos observar un gráfico que muestra la demanda de torque requerido por el tambor aglomerador durante el tiempo que se realizó la simulación.



**Figura 5.** Gráfico de torque requerido para la rotación de un tambor aglomerador con un 10% de grado de llenado y 8 % de humedad por el método DEM. Fuente: Elaboración propia.

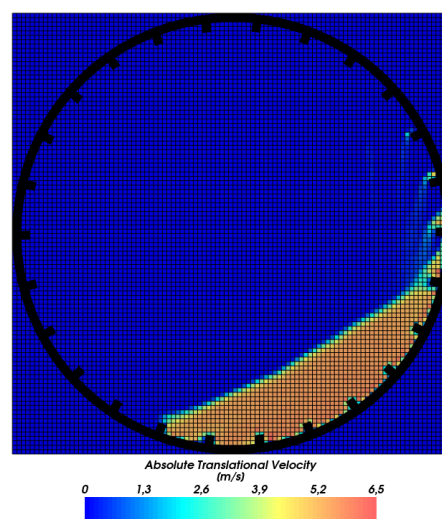
De forma análoga en que se realizó el análisis de potencia del tambor aglomerador, el torque del tambor aglomerador exhibe un comportamiento similar. Durante los primeros segundos hay un régimen transiente, donde hay un pico con un valor máximo de

$1157610\text{ Nm}$  en el segundo  $t = 0.4s$  de simulación. Este régimen transiente se encuentra en el rango de los  $t = 0$  a  $t = 8.5s$ , donde posterior a el tiempo mencionado, hay una estabilización de la demanda del torque requerido. En el rango de tiempo  $t = 8.5s$  al  $t = 15s$  la demanda de torque es periódica y un posee un valor RMS de  $455446\text{ Nm}$ .

## 6.4. Comparación de resultados

A partir de la investigación [11], se realiza una comparación de resultados obtenidos a través de la simulación por el “método de elementos discretos” (DEM) y una simulación validada por “dinámica de fluidos computacional” (CFD) del tambor aglomerador de la minera BHP Spence, con un grado de llenado del 10% y una velocidad de rotación de 6.5 rpm.

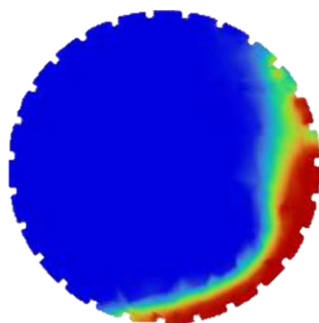
En la Figura 6, podemos ver un post-procesamiento de los resultados obtenidos del perfil transversal del tambor por simulación DEM. Por otro lado, tenemos en la Figura 7, los resultados del perfil transversal del comportamiento del material por simulación CFD. Como se puede visualizar en ambas figuras, ambos resultados se encuentran en régimen rodante, pero existe una diferencia en la distribución de masa en las paredes del tambor. En los resultados de la simulación DEM, se visualiza que la distribución de masa en las paredes del tambor es menor que la simulación en CFD. Este fenómeno podría estar asociado a que la forma en que se está representando el material real son distintos. Por una parte, tenemos que en la simulación DEM tenemos partículas sólidas con una capa de líquido que las rodea (agua), mientras que en la simulación CFD el material está siendo representado como un fluido.



**Figura 6.** Post-procesamiento del perfil transversal del tambor aglomerador por simulación DEM en régimen estacionario. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9, podemos visualizar un resumen de los resultados de potencia y torque, de los resultados en simulación por CFD y DEM. Se observan diferencias entre ambas simulaciones, en los valores pico de potencia y torque, siendo en la simulación DEM donde se registran resultados con valores mayores. Esta discrepancia en los resultados se atribuye a la forma en que se incorporan las partículas o material al tambor durante su simulación. En el modelo CFD tenemos el ingreso de partículas por medio de un flujo masico constante en un lapso de tiempo, mientras que en la simulación DEM el ingreso de partículas se realiza por un volumen determinado de partículas.

Por otra parte, se tiene que los resultados obtenidos de ambas simulaciones, tanto para la potencia como el torque, el valor RMS se encuentran en el mismo orden de magnitud, pero con valores distintos. Los valores RMS de potencia y torque de la simulación DEM poseen una disminución de un 24% con respecto a los valores de la simulación por CFD.



**Figura 7.** Perfil transversal del tambor aglomerador por simulación CFD en régimen estacionario. Fuente: [11]

**Tabla 9.** Resumen de los resultados obtenidos de potencia y torque a través de simulación DEM Y CFD

Variable	Simulación CFD		Simulación DEM	
	Valor pico	Valor RMS	Valor pico	Valor RMS
Potencia [kW]	474.24	407.28	633.20	310.18
Torque [kNm]	697.41	598.94	1157.61	455.45

## 7. Conclusiones

Se realiza un análisis de los parámetros relevantes que inciden en la operación de un tambor aglomerador, explicando conceptos que logran describir y entender el comportamiento del material cuando el equipo se encuentra en operación.

Se realiza una calibración de parámetros y una evaluación del modelo numérico DEM, a partir de investigaciones existentes, en las cuales hayan realizado ensayos experimentales y/o simulados que permitan un mejor resultado de flujo, potencia y torque en el tambor aglomerador real.

Se modela un tambor aglomerador real, el cual se encuentra ubicado en la minera BHP Spence, utilizando el método de elementos discretos con el software ANSYS ROCKY 2023 R1.1. Además, se utiliza el módulo de “liquid bridge” o “puente líquido”, el cual busca la adherencia entre partículas, un método que busca representar el proceso de aglomeración.

Se logran obtener resultados del perfil transversal del tambor, demanda de potencia y torque, a través del tiempo, por medio de la simulación DEM. Se analizan los resultados y podemos mencionar lo siguiente:

- El resultado del perfil transversal de la simulación DEM presenta un régimen rodante, el cual es óptimo para el proceso de aglomeración. Se observa que la distribución de partículas en las paredes del tambor mediante CFD, es mayor que la simulación en DEM. Esta discrepancia podría explicarse debido a la forma en que se está representado el material en cada modelo.
- El resultado de potencia y torque posee un valor RMS de 310180 W y 455446 Nm, respectivamente. Los cuales son un 24% menor a los resultados obtenidos en la simulación CFD en régimen estacionario.

## 8. Referencias

- Consejo Minero, «Cifras actualizadas de la minería,» 2023. [En línea].
- L. Wang, S. Yin y A. Wu, «Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620337501>. [Último acceso: 8 Agosto 2023].
- G. Walker, «Drum granulation process,» 2007.
- COMECSA, «análisis de esfuerzos por fractura de un sistema eje-piñón de un tambor aglomerador perteneciente a Minera Spence S.A,» 2012. [En línea]. Available: <https://comecsa.com/2013/01/02/analisis-de-esfuerzo-eje-pinon-tambor-aglomerador-minera-spence-s-a/>.
- M. Moncada, P. Toledo, F. Betancourt and C. Rodríguez, “Torque Analysis of a Gyratory



- Crusher with the Discrete Element Method,” *Minerals*, p. 11, 2021.
- [6] S. S. K. J. L. L.-A. T. Susantha Dissanayake, «CFD study of Particle Flow Patterns in a Rotating Cylinder Applying OpenFOAM and Fluent,» Norway.
- [7] H. Z. J. G. J. Z. Y. H. Mengxiao Yu, «Three-dimensional DEM simulation of polydisperse particle flow in rolling mode rotating drum,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591021009396#f0070>.
- [8] J. A.-M. D. J. R. Ataollah Nosrati, «Drum agglomeration behavior of nickel laterite ore: Effect of process variables,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X12001326>. [Último acceso: 4 Agosto 2023].
- [9] T. Trung Vo, S. Nezamabadi, P. Mutabaruka, J. Y. Delenne, E. Izard, R. Pellenq y F. & Radjai, «Agglomeration of wet particles in dense granular flows,» vol. 42, pp. 1-12, 2019.
- [10] Y. Wang, J. Xu, S. He, S. Liu y Z. Zhou, «Numerical simulation of particle mixing and granulation performance in rotating drums during the iron ore sintering process,» *Powder Technology*, vol. 429, 2023.
- [11] C. Peña, «Implementación de modelo numérico para el cálculo de torque en un tambor aglomerador,» Universidad De Concepción, Concepción, Chile, 2022.
- [12] R. C. Cabezas, «CAMBIO DE DISEÑO DE POLINES DE CORREA TRANSPORTADORA DE MINERAL CV110 - MINERA SPENCE BHP PARA AUMENTAR DISPONIBILIDAD,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/52878/3560900267086UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [13] O. C. Scheffler y C. Coetzee, «DEM calibration for simulating bulk cohesive materials,» de *Computers and Geotechnics*, vol. 161, 2023.
- [14] EUROPER, «Ficha tecnica acero ASTM A-36,» [En línea]. Available: <https://europer.cl/wp-content/uploads/2021/10/INFORMACION-TECNICA-ASTM-A-36.pdf>.
- [15] M. Moncada, «Análisis no estacionario de torque en chancadores primarios,» 2022.
- [16] T. G. A. O. Andrzej Heim, «The effect of the wetting droplets size on power consumption during drum granulation,» 2004. [En línea]. [Último acceso: 5 Agosto 2023].
- [17] IAPWS, «The International Association for the Properties of Water and Steam,» [En línea]. Available: <http://www.iapws.org/>.