

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“OPTIMIZACIÓN DE UN PUNTO DE TRANSFERENCIA  
EMPLEANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS”**

**Memoria para optar al Título de:  
INGENIERO MECÁNICO**

**ALUMNO : Nicolás I. Jeria Ramírez**  
**PROFESOR GUÍA : José I. Vergara**

**2018**

## Resumen

El presente trabajo está enfocado a la optimización de un punto de transferencia que presenta problemas de desgaste acelerado. Este elemento forma parte de un sistema de transporte de correas transportadoras en una operación minera de cobre, en la etapa de chancado primario, en la línea de producción que conduce el mineral chancado a las pilas de acopio.

Se utilizó el método de elementos discretos (DEM) mediante el programa LIGGGHTS, con el fin de analizar los problemas del punto de transferencia de estudio, con lo que se logró determinar y validar los parámetros que reproducen el comportamiento del material en la simulación. Los resultados extraídos por este medio fueron comparados con los registrados en terreno, los cuales permiten cuantificar las magnitudes de interés como el desgaste de los revestimientos al interior del punto de transferencia.

Posteriormente se procedió a diagnosticar las causas del desgaste acelerado, esta información fue utilizada para realizar la optimización, considerando, además, criterios de diseño en puntos de transferencia estudiados.

Se desarrolló la optimización del punto de transferencia mediante simulación DEM, en condiciones de operación nominal. Se logra un funcionamiento adecuado bajo todos los parámetros evaluados, entre los más relevantes el desgaste en las zonas de impacto, ángulos de impacto, velocidades de impacto del material y espacios adecuados en la sección transversal para el buen desplazamiento del flujo al interior del punto de transferencia. Estos resultados permitieron reconocer los cambios en el comportamiento dinámico del mineral, como también las ventajas mecánicas que tiene la nueva geometría respecto a la original. La incorporación de una cama de piedras a un punto de transferencia convencional, disminuye el desgaste en los revestimientos de este. Este análisis realizado comprueba que el proceso de transporte al interior del punto de transferencia se puede optimizar mediante modificaciones aplicadas. Específicamente para este caso se logra

reducir en un 93% el desgaste en la zona de impacto más crítica en el revestimiento del punto de transferencia, aumentando hasta 15 veces su tiempo de recambio.

## Agradecimientos

A Cinética Ingeniería, empresa con la que realicé esta memoria.

A Andrés por su apoyo, simpatía, paciencia y buena disposición a enseñarme, lo que me ayudó mucho a sintetizar toda la información implicada en este trabajo.

A Mario y Miguel por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto, por confiar en mí, brindarme las herramientas que estuvieran a su alcance y por su buena disposición en general.

A Natalia por su apoyo, comprensión y cariño durante todo este periodo.

Gracias a mi familia por su apoyo durante esta tesis, en especial a Egidio y Cristina, quienes han puesto su mejor esfuerzo para apoyarme durante todo mi desarrollo académico y personal.

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Descripción del problema .....	8
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo General .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3. Alcances.....	15
1.4. Metodología.....	16
2. Puntos de transferencia .....	16
2.1. Características de los puntos de transferencia entre correas transportadoras .....	17
2.2. Problemas de los puntos de transferencia.....	18
2.2.1. Desgaste y daños en la cinta transportadora.....	18
2.2.2. Derrame de material.....	18
2.2.3. Degradación de material .....	18
2.2.4. Acumulación de material .....	19
2.2.5. Bloqueo de material .....	19
2.2.6. Generación de ruido.....	19
2.3. Tipos de puntos de transferencia.....	20
2.3.1. Placa de impacto .....	21
2.3.2. Hood.....	22
2.3.3. Caja de rocas.....	22
2.3.4. Spoon .....	24
2.4. Diseño de un punto de transferencia .....	25
2.4.1. Principios de diseño para puntos de transferencia .....	27
2.4.1.1. Principio 1: Prevenir la acumulación de material .....	27

2.4.1.2.	Principio 2: Asegurar área de la sección transversal.....	31
2.4.1.3.	Principio 3: Control de flujo .....	33
2.4.1.4.	Principio 4: Minimizar el desgaste.....	34
2.4.1.5.	Principio 5: Control de polvo.....	35
2.4.1.6.	Principio 6: Minimizar desgaste del material .....	36
3.	Método de los elementos discretos .....	37
3.1.	Descripción del método.....	37
3.2.	Estado del arte.....	38
3.3.	Ecuaciones de movimiento .....	40
3.4.	Modelo de contacto .....	41
3.5.	Ciclos de cálculo .....	47
3.6.	Ventajas y desventajas.....	49
3.6.1.	Ventajas.....	49
3.6.2.	Desventajas.....	49
4.	Software LIGGGHTS .....	51
4.1.	Parámetros considerados en DEM .....	53
4.1.1.	Módulo de Young.....	53
4.1.2.	Coefficiente de Poisson.....	54
4.1.3.	Coefficiente de restitución.....	54
4.1.4.	Coefficiente de fricción.....	55
4.1.5.	Intervalo de tiempo (Time-step).....	56
4.1.6.	Parámetros de desgaste .....	57
4.1.6.1.	Modelo de Finnie .....	58
5.	Modelación mediante DEM .....	61
5.1.	Configuración de los archivos de entrada.....	61

5.2.	Implementación de geometrías en LIGGGHTS.....	62
5.3.	Parámetros de simulación y análisis de sensibilidad.....	62
5.3.1.	Granulometría y distribución de partículas .....	63
5.3.2.	Condiciones operacionales.....	63
5.3.3.	Propiedades físicas del material y revestimientos .....	64
5.3.4.	Variables del pre-proceso.....	65
5.4.	Proceso de Simulación y Post-proceso.....	66
6.	Simulación en LIGGGHTS.....	67
6.1.	Diseño de un punto de transferencia para situación actual.....	67
6.1.1.	Descripción del problema.....	67
6.1.2.	Implementación computacional.....	68
6.1.2.1.	Modelo geométrico actual .....	68
6.1.2.2.	Desarrollo .....	72
6.1.3.	Presentación y análisis de resultados .....	73
6.1.3.1.	Monitoreo de flujo másico.....	73
6.1.3.2.	Resultados comportamiento del material .....	74
6.1.3.3.	Resultados para velocidad de partículas .....	78
6.1.3.4.	Resultados para desgaste .....	79
7.	Optimización de un punto de transferencia específico .....	90
7.1.	Implementación computacional .....	90
7.1.1.	Modelo geométrico optimizado.....	90
7.1.1.1.	Desarrollo .....	93
7.1.2.	Presentación y análisis de resultados .....	94
7.1.2.1.	Monitoreo de flujo másico.....	94
7.1.2.2.	Resultados comportamiento del material .....	95

7.1.2.3.	Resultados para velocidad de partículas .....	97
7.1.2.4.	Resultados para desgaste .....	99
8.	Conclusiones y recomendaciones .....	111
9.	Bibliografía.....	113

## Índice de Figuras

Figura 1: Producción y precio del cobre 2003 – 2017. Fuente: Consejo Minero.....	1
Figura 2: Inversión de la Gran Minería 2004 – 2015. Fuente: Consejo Minero. ....	2
Figura 3: Punto de transferencia. Fuente: The Practical Resource for Total Dust & Material Control, Martin Engineering Company, 2002. ....	3
Figura 4: Proceso productivo del cobre. Fuente: Elaboración propia.....	4
Figura 5: Ciclo de cálculo DEM. Fuente: Elaboración propia. ....	6
Figura 6: Representación gráfica de la interacción entre partículas en el DEM. Fuente: Elaboración propia. ....	7
Figura 7: Vista isométrica de un punto de transferencia real y su modelo en DEM. Fuente: Chute designs and trajectories using the discrete element method, David J. Kruse, 2009. ...	8
Figura 8: Un punto de transferencia convencional consta usualmente de las siguientes partes básicas: A) Descarga del chute B) Caída del chute C) Bandeja de Carga, y D) Zona de Sedimentación Fuente: The Practical Resource for Total Dust & Material Control, Martin Engineering Company, 2002.....	9
Figura 9: Foto de la correa principal, punto de transferencia actual y stacker de apilamiento. Fuente: Cinética Ingeniería. ....	11
Figura 10: Disposición general punto de transferencia PT-1. Fuente: Cinética Ingeniería. 13	
Figura 11: Vista lateral del punto de transferencia actual. Fuente: Cinética Ingeniería. ....	14
Figura 12: Etapas empleadas para la optimización del punto de transferencia actual. Fuente: Elaboración propia. ....	16
Figura 13: Problema de desgaste en un punto de transferencia. Fuente: Chute designs and trajectories using the discrete element method, David J. Kruse, 2009. ....	20
Figura 14: Representación de una placa de impacto. Fuente: Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers, Shams T. Huque, 2004.....	21
Figura 15: Representación de un Hood. Fuente: Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers, Shams T. Huque, 2004.....	22
Figura 16: Representación de puntos de transferencia con cajas de rocas. Fuente: The Practical Resource for Total Dust & Material Control, Martin Engineering Company, 2002. ....	23

Figura 17: Representación de un Spoon. Fuente: Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers, Shams T. Huque, 2004.....	24
Figura 18: Representación DEM de la situación de un punto de transferencia. Fuente: Cinética Ingeniería.....	25
Figura 19: Etapas del diseño de puntos de transferencia Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 20: Velocidad de una partícula después del impacto en chute. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	28
Figura 21: Curva típica de la presión de impacto en función del ángulo entre el flujo de material y la superficie. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	29
Figura 22: Velocidad de una partícula después de dos impactos. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	30
Figura 23: Curvas típicas de velocidades en función del ángulo de fricción y ángulo de inclinación. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	31
Figura 24: Diagramas de fuerzas de una partícula sobre: (a)Superficie inclinada.; (b)Superficie curva. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	32
Figura 25: Trayectoria del material sobre la correa de recepción. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	34
Figura 26: Punto de transferencia con pequeñas cajas de rocas. Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.....	35
Figura 27: (a)Dominio discretizado (b)Representación gráfica de la búsqueda de contactos. Fuente: Cáceres Soto & Gamboa Gaioli, 2014.....	38
Figura 28: Representación del modelo de contacto no lineal resorte-amortiguador. Fuente: Elaboración propia,.....	42
Figura 29:Representación del método de elementos discretos, donde interactúan dos partículas esféricas Fuente: Duque, 2016.....	43
Figura 30: Ciclo del procesamiento computacional una simulación DEM. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 31: Lógica de consideración. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 32: Mallado del tambor en software Salomé. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 33: Parámetros de la simulación. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 34: Inserción de partículas. Fuente: Elaboración propia.....	66

Figura 35: Esquema del punto de transferencia actual. Fuente: Cinética Ingeniería.....	69
Figura 36: Modelo geométrico computacional del punto de transferencia actual y sus componentes. Fuente: Elaboración propia. ....	70
Figura 37: Dimensiones del modelo geométrico actual, vista lateral (milímetros). Fuente: Elaboración propia. ....	71
Figura 38: Dimensiones del modelo geométrico actual, vista superior (milímetros). Fuente: Elaboración propia. ....	71
Figura 39: Modelo geométrico y condiciones de operación para análisis DEM del chute. Fuente: Elaboración propia. ....	72
Figura 40: Caída libre de material al interior del chute actual. Vista frontal. Fuente: Elaboración propia. ....	75
Figura 41: Caída libre de material al interior del chute actual. Vista lateral. Fuente: Elaboración propia. ....	76
Figura 42: Índice de desgaste en función del material de la placa de impacto. Fuente: Protección contra el desgaste Metso Minerals. ....	77
Figura 43: Esquema de la trayectoria del material en el chute actual. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 44: Zona de impacto de material a velocidades mayores a 4 m/s. Fuente : Elaboración propia. ....	79
Figura 45: Esquema de zonas de estudio de desgaste para caso actual. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 46: Representación gráfica de las zonas de desgaste de la placa de impacto. Fuente: Elaboración propia. ....	81
Figura 47: Representación gráfica de las zonas de desgaste de la placa de impacto. Vista frontal. Fuente: Elaboración propia. ....	82
Figura 48: Representación gráfica de las zonas de desgaste de las paredes sin revestimiento. Fuente: Elaboración propia. ....	83
Figura 49: Elementos de control de desgaste en placa de impacto.. Fuente: Elaboración propia.....	84
Figura 50: Elementos de control de desgaste en paredes del chute. Fuente: Elaboración propia.....	85

Figura 51: Modelo geométrico computacional del punto de transferencia optimizado y sus componentes. Fuente: Elaboración propia .....	91
Figura 52: Dimensiones del modelo geométrico optimizado, vista lateral (milímetros). Fuente: Elaboración propia. ....	92
Figura 53: Dimensiones del modelo geométrico actual, vista superior (milímetros). Fuente: Elaboración propia. ....	92
Figura 54: Modelo geométrico y condiciones de operación para análisis DEM del chute optimizado. Fuente: Elaboración propia. ....	93
Figura 55: Zona de impacto de material y detalle cama de piedras Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 56: Esquema de la trayectoria del material en el chute optimizado. Fuente: Elaboración propia. ....	96
Figura 57: Caída libre del material al interior del chute optimizado. Vista frontal. Fuente: Elaboración propia .....	97
Figura 58: Caída libre del material al interior del chute optimizado. Vista lateral. Fuente: Elaboración propia .....	98
Figura 59: Representación gráfica de las zona de desgaste en la cama de piedra del chute. Fuente: Elaboración propia. ....	100
Figura 60: Implementación barrera limitadora de movimiento. Fuente: Elaboración propia. ....	101
Figura 61: Representación gráfica de las zonas de desgaste de las paredes del chute optimizado. Fuente: Elaboración propia. ....	102
Figura 62: Elementos de control de desgaste en chute optimizado, específicamente cama de piedras. Fuente: Elaboración propia. ....	103
Figura 63: Elementos de control de desgaste en chute optimizado, específicamente paredes con desgaste moderado. Fuente: Elaboración propia.....	104

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Distribución granulométrica del mineral. Fuente: Cinética Ingeniería. ....	63
Gráfico 2: Área de control flujo másico en la salida del chute actual. Fuente: Elaboración propia.....	73
Gráfico 3:Área de control flujo másico en la salida del chute optimizado. Fuente: Elaboración propia .....	94

## Índice de Tablas

Tabla 1: Condiciones de operación de la correa de alimentación CV-1. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 2: Propiedades de los materiales.. Fuente: elaboración propia. ....	64
Tabla 3: Parámetros de los materiales. Fuente: Elaboración propia. ....	64
Tabla 4: Datos de referencia punto de transferencia actual, para análisis DEM. Fuente: Elaboración propia. ....	68
Tabla 5: Tamaña de elementos de control, zona placa de impacto del chute actual. Fuente: Elaboración propia. ....	86
Tabla 6: Tasa de desgaste, zona de la placa de impacto del chute actual. Fuente: Elaboración propia. ....	87
Tabla 7: Tiempo de recambio de la placa de desgaste. Fuente: Elaboración propia. ....	87
Tabla 8: Tamaño de elementos de control de pared inferior frontal. Fuente: Elaboración propia.....	88
Tabla 9: Tasa de desgaste de pared inferior frontal. Fuente Elaboración propia. ....	88
Tabla 10: Tiempo de recambio de revestimientos. Fuente: Elaboración propia. ....	89
Tabla 11: Tamaño de elementos de control, zona pared vertical de la cama de materia.. Fuente: Elaboración propia. ....	105
Tabla 12:Tasa de desgaste, zona pared vertical de la cama de material.. Fuente: Elaboración propia.....	105
Tabla 13: Tiempo de recambio pared vertical cama de piedra. Fuente: Elaboración propia. ....	106
Tabla 14: Tamaño de elementos de control, zona pared horizontal de la cama de material.. Fuente: Elaboración propia. ....	106
Tabla 15: Tasa de desgaste, zona pared horizontal de la cama de material.. Fuente: Elaboración propia.....	107
Tabla 16: Tiempo de recambio pared horizontal cama de piedra. Fuente: Elaboración propia.....	107
Tabla 17: Tamaña de elementos de control, zona frontal del chute optimizado.. Fuente: Elaboración propia. ....	108

Tabla 18: Tasa de desgaste, zona frontal del chute optimizado. Fuente: Elaboración propia. .....	108
Tabla 19: Tiempo de recambio zona frontal del chute optimizado Fuente: Elaboración propia.....	109
Tabla 20: Comparación de los resultados de tasas de desgaste entre chute actual, chute optimizado y datos de referencia. Fuente: Elaboración propia. ....	109
Tabla 21: Comparación de los resultados del tiempo de recambio de placas entre chute actual, chute optimizado y datos de referencia. Fuente: Elaboración propia. ....	110

# 1. Introducción

La minería ha sido protagonista de la senda de crecimiento que ha tenido la economía chilena en las últimas décadas. Desde 1870 Chile se posiciona como el primer exportador de cobre en el mundo, en los últimos años la minería ha representado el 31% de la producción mundial alcanzando una producción de 5,7 millones de toneladas anuales de cobre en el 2015, como se muestra en la Figura 1. Actualmente el sector minero en Chile presenta un gran desafío que permitiría alcanzar los 7,8 millones de toneladas anuales en el 2024, si se ejecutan los proyectos mineros en carpeta (Consejo Minero, 2016).



Nota: corresponde a producción de cobre de mina.  
 \* Acumulado a Abril para producción Chile, a Marzo para producción Resto del Mundo y promedio del precio a Mayo 2017.

Figura 1: Producción y precio del cobre 2003 – 2017.  
 Fuente: Consejo Minero.

Cabe destacar que la participación del sector minero en la economía del país sigue siendo la más importante, contribuyendo a las utilidades del país, con una participación en el PIB entorno al 13% en años recientes (Consejo Minero, 2016).

Debido a las necesidades crecientes del mercado, por la generación de materias primas desde el sector minero, se han experimentado grandes inversiones de la gran minería en Chile. La Figura 2 muestra el nivel de inversión en la última década y su tendencia conforme avanzan los años.

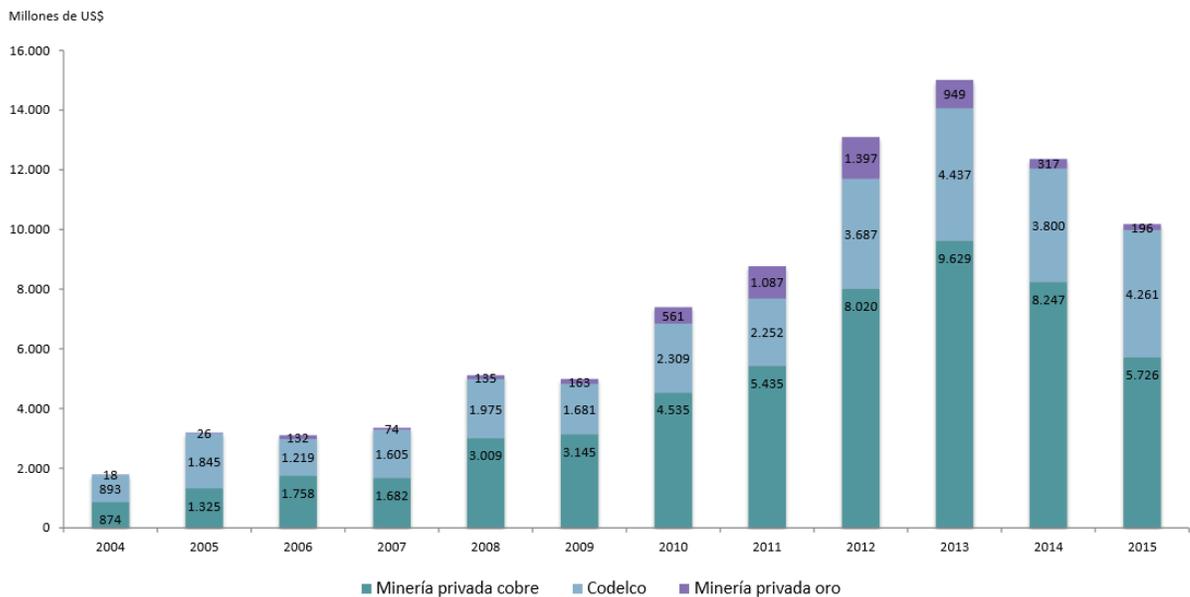
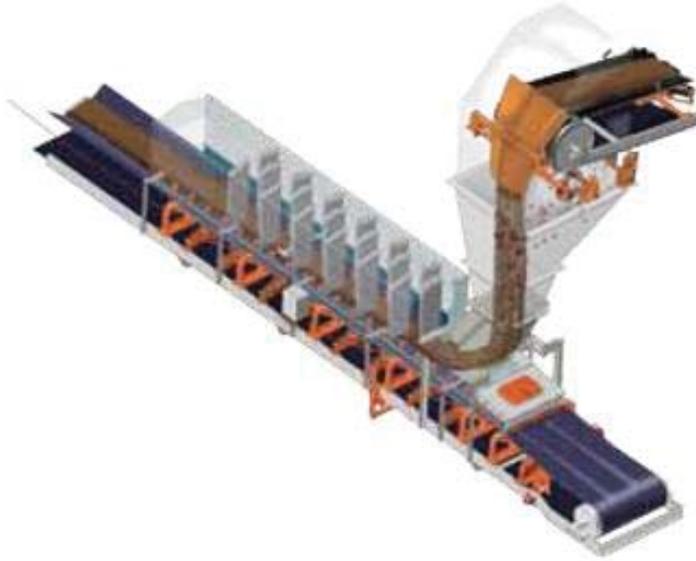


Figura 2: Inversión de la Gran Minería 2004 – 2015.  
Fuente: Consejo Minero.

La minería nacional presentada en cifras, ha permitido adaptar y recibir nuevas tecnologías en base a las necesidades del sector minero. Es así como se ha estudiado que en las operaciones mineras son comunes los problemas de desgaste en los elementos mecánicos de las líneas de transporte, específicamente al producirse la transferencia de mineral entre correas transportadoras. En base a la confiabilidad sobre los sistemas de transporte, lo cual se refiere al grado de predictibilidad sobre una posible falla, las operaciones mineras han experimentado una evolución en su diseño durante los últimos años, siendo uno de los más relevantes la introducción a los puntos de transferencia cuya función es la de redirigir el material a

diferentes etapas del proceso. Se llama punto de transferencia o chute al lugar donde ocurre el intercambio de material entre una correa a otra (Figura 3).



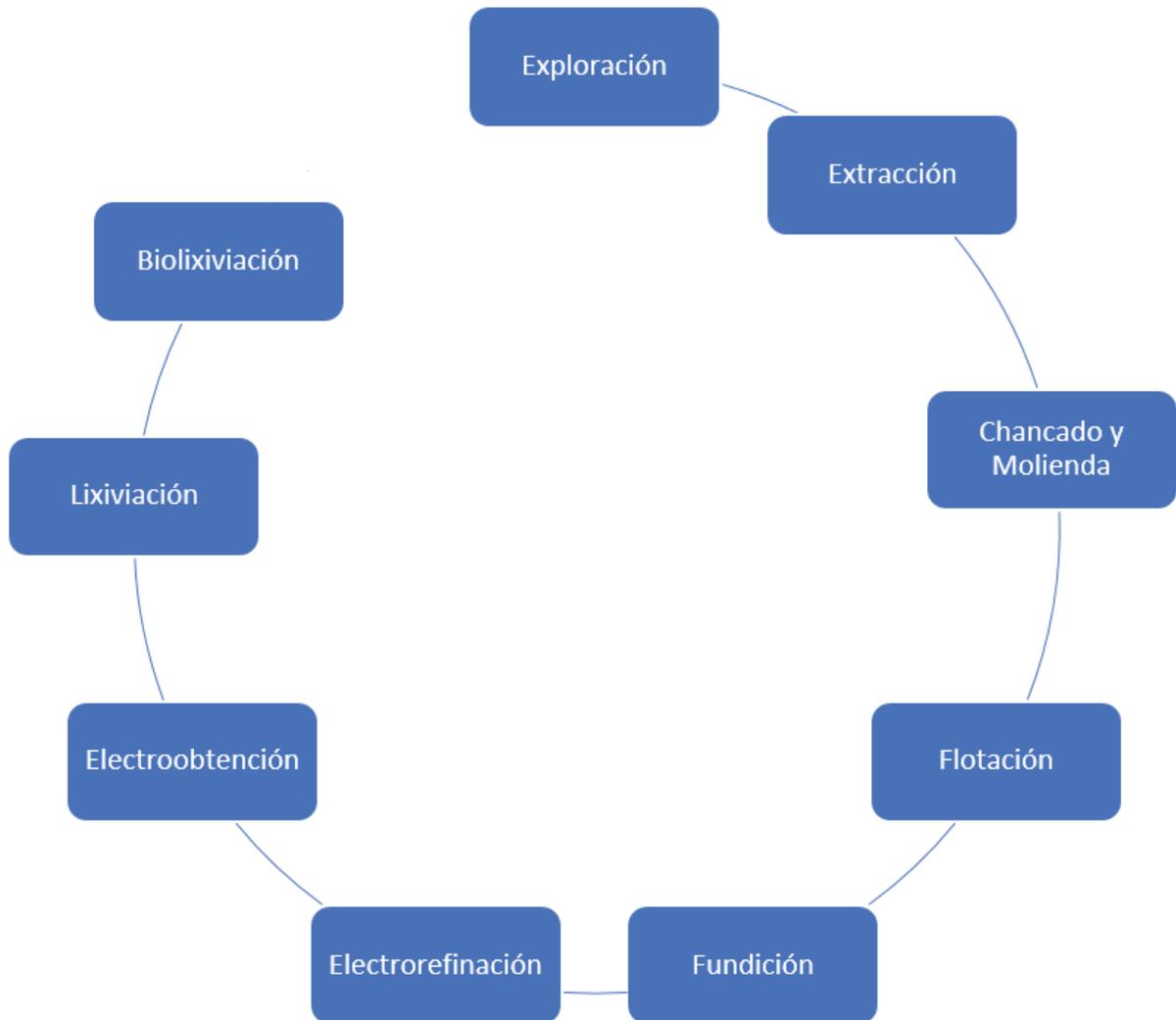
*Figura 3: Punto de transferencia.  
Fuente: The Practical Resource for Total Dust & Material Control, Martin Engineering Company, 2002.*

Se presenta una situación compleja en la actualidad debido al desgaste provocado por la transferencia de material granulado al interior de un punto de transferencia específico, produciendo fallas cuyos costos son elevados y generando pérdidas importantes en la producción. También los tiempos de mantención en la línea de transporte no son adecuados y además esta situación representa un riesgo asociado a los trabajadores que estén cerca de esta transferencia. Frente a la situación por parte de la operación minera surge la necesidad de optimizar la transferencia de mineral entre correas en un punto específico del sistema de transporte.

El sistema de transporte comienza una vez extraído el mineral del yacimiento, el cual debe pasar a la siguiente etapa del proceso productivo (Figura 4) que es el chancado. En esta etapa el mineral presenta una granulometría variada, desde partículas menores a 1 mm hasta fragmentos mayores a 1 metro de diámetro por lo que debe pasar por la etapa de chancado. La etapa de chancado tiene como objetivo reducir el tamaño de los fragmentos de mineral mayores hasta obtener un tamaño uniforme de 0,5 pulgadas, para lograr el tamaño deseado se

utiliza la combinación de equipos que van reduciendo el tamaño de los fragmentos en etapas, las que se conocen como etapa primaria, etapa secundaria y etapa terciaria.

En la etapa primaria el chancador reduce el tamaño máximo de los fragmentos a 8 pulgadas de diámetro, en la etapa secundaria el tamaño del mineral se reduce a 3 pulgadas y en la etapa terciaria el material logra llegar finalmente a 0,5 pulgadas.



*Figura 4: Proceso productivo del cobre.  
Fuente: Elaboración propia.*

El comportamiento del material al interior de un punto de transferencia es posible modelarlo mediante los métodos numéricos y recursos computacionales actuales (método de elementos

discretos y dinámica molecular). Actualmente la información para analizar es mayor con respecto a la posible de obtener hace un par de décadas, lo que permite desarrollar resultados más precisos y con un mayor grado de certidumbre.

En este contexto, el presente trabajo utilizó el Método de Elementos Discretos (DEM) para modelar el comportamiento de un sistema de partículas, identificar los problemas en un punto de transferencia específico y optimizar su diseño.

El DEM es un método numérico para modelar la dinámica de partículas sólidas que interactúan entre sí. Cundall y Strack (1979) inicialmente propusieron estudiar el comportamiento mecánico de rocas, cuyo modelo era bidimensional.

En simulaciones DEM, las propiedades de un conjunto de partículas (por ejemplo: posición, velocidad y fuerzas de contacto) se actualizan en cada paso de tiempo de iteración numérica. Los desplazamientos transicionales y rotacionales de cada partícula se obtienen integrando explícitamente las ecuaciones basadas en la segunda ley del movimiento de Newton, mientras que las fuerzas de contacto entre partículas se calculan utilizando modelos de contacto fuerza-desplazamiento. En este proceso, las interacciones entre las partículas se controlan en todos los contactos y se rastrea el movimiento de cada partícula individual.

La Figura 5 ilustra el ciclo de los cálculos DEM. La simulación comienza por la detección de los puntos de contacto entre las partículas. El punto de contacto y la distancia de superposición de las partículas se utilizan para calcular las fuerzas de interacción a través de la relación fuerza-desplazamiento. Las fuerzas de contacto resultantes se aplican en el centro de cada partícula, lo que hace que las partículas se muevan. De acuerdo con la segunda ley del movimiento de Newton, la aceleración, velocidad y desplazamiento de las partículas se actualizan al final de cada paso de iteración numérica. Este ciclo continúa hasta que se

alcanzan los pasos de tiempo preestablecidos.

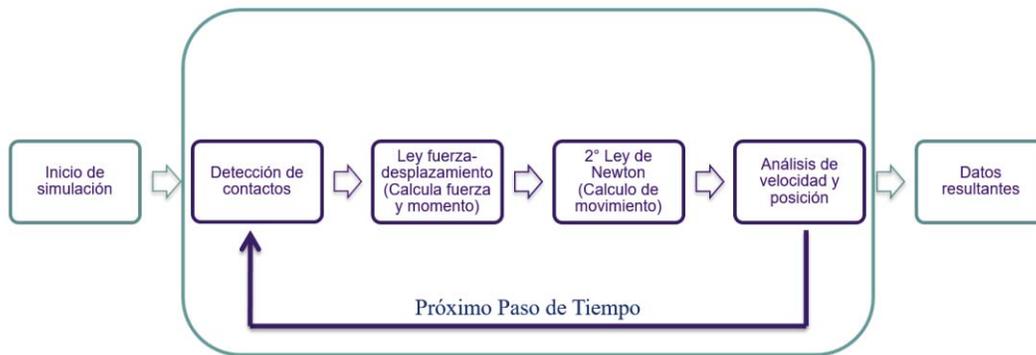


Figura 5: Ciclo de cálculo DEM.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se muestra la interacción entre dos partículas en el DEM denotadas como  $i$  y  $j$ . Las líneas sólidas representan partículas reales que tienen formas irregulares, mientras que el modelo DEM aproxima la forma irregular con círculos (o esferas). Además, se indica la posición inicial de las partículas cuando entran en contacto, se representa con línea segmentada. Se ilustra la fuerza  $\vec{F}_{ij}$  y el momento  $\vec{M}_{ij}$  ejercidos durante la interacción y se indican las variables cinemáticas responsables del movimiento e interacción de las partículas desde el instante inicial al final, en donde  $\vec{v}_i$  y  $\vec{v}_j$  indican las velocidades lineales de los centros de masa, mientras que  $\vec{\omega}_i$  y  $\vec{\omega}_j$  corresponden a las velocidades angulares de las partículas.

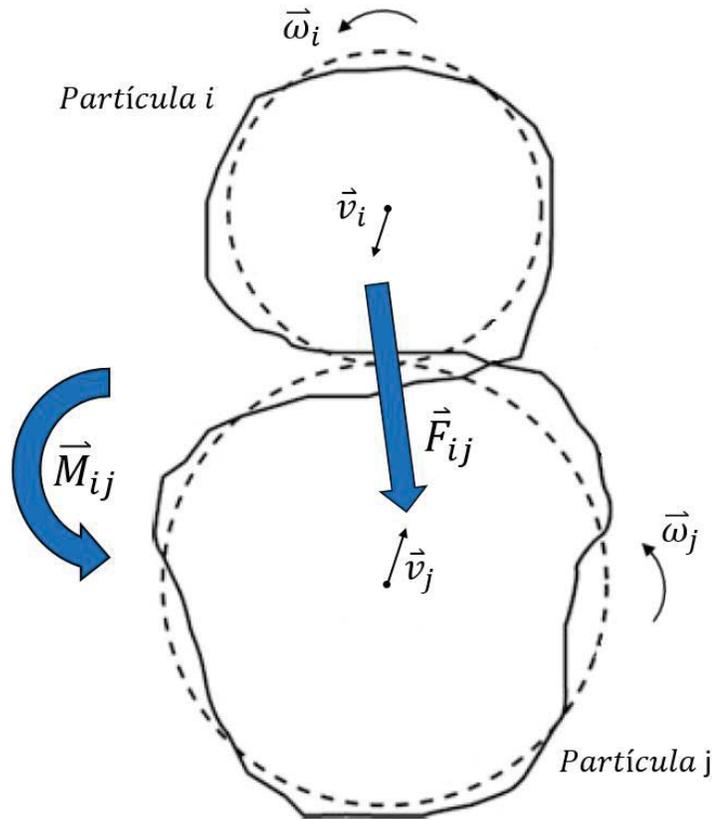


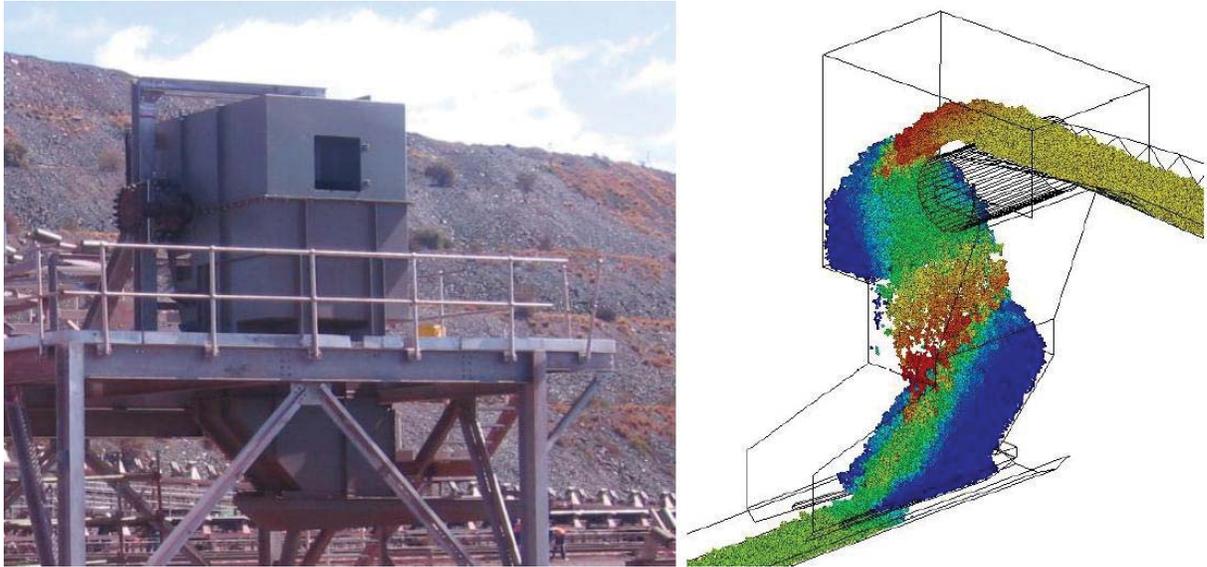
Figura 6: Representación gráfica de la interacción entre partículas en el DEM.  
Fuente: Elaboración propia.

EL DEM permite identificar el comportamiento cinemático y dinámico de cualquier sistema que pueda ser representado por partículas independientes, para observar y validar diseños de sistemas, previo a la fabricación y montaje real, ahorrando costos de pruebas y de diseños deficientes. El campo de aplicación más común en la industria es el manejo de materiales granulares sólidos, a partir de los resultados de una simulación DEM se logra detectar el origen de problemas de desgaste, a través de la visualización del comportamiento de un flujo de partículas y luego ver la influencia de los parámetros.

Su aplicación en puntos de transferencia permite optimizar el sistema de transporte de materiales granulares, previniendo principalmente pérdidas de material, atollo y excesivo desgaste.

En Figura 7 se muestra un punto de transferencia que transporta mineral de hierro altamente cohesivo. El punto de transferencia se diseñó utilizando DEM y se puso en marcha el 2008. Se

instalaron 5 chutes similares en una operación minera, funcionando con éxito, con un desgaste mínimo y excelente fluidez del material(Kruse, 2009).

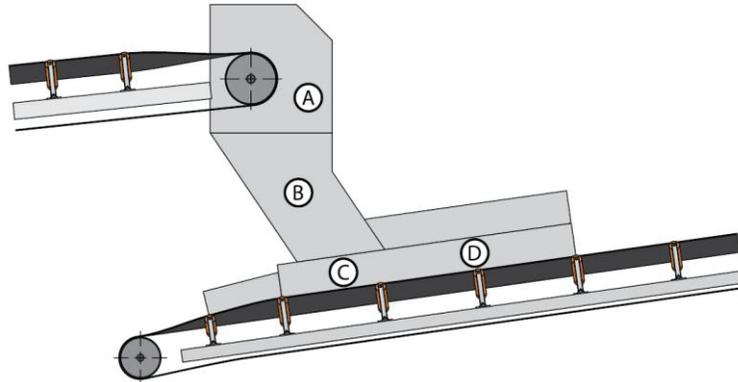


*Figura 7: Vista isométrica de un punto de transferencia real y su modelo en DEM.  
Fuente: Chute designs and trajectories using the discrete element method, David J. Kruse, 2009.*

### 1.1. Descripción del problema

Las transferencias de minerales mediante correas transportadoras dirigen el material a distintas etapas del proceso de producción. La ubicación donde se intercambia material entre una correa y otra es denominado punto de transferencia o chute. Este es un proceso de intercambio de material que debe cumplir condiciones para mantener una adecuada transferencia sin dañar elementos mecánicos, perder el material, dañar a los operarios o el medioambiente. Su función principal es redirigir el material de la correa de alimentación a la correa de recepción de manera adecuada. Los elementos que componen un punto de transferencia como se muestra en

la Figura 8 son: la parte superior o chute de descarga, cuya función es captar el material de la correa de alimentación, la parte intermedia o cuerpo del chute que dirige el material hacia el elemento receptor o chute de carga el que abastece a la correa de recepción.



*Figura 8: Un punto de transferencia convencional consta usualmente de las siguientes partes básicas: A) Descarga del chute B) Caída del chute C) Bandeja de Carga, y D) Zona de Sedimentación  
Fuente: The Practical Resource for Total Dust & Material Control, Martin Engineering Company, 2002.*

Este trabajo se centra en el desgaste de un punto de transferencia específico, lo que consiste en el desgaste de revestimientos al interior de un chute, por el cual fluye el material entre dos correas transportadoras, el cual provoca un desgaste acelerado. Se debe cambiar los revestimientos cada 3 a 4 meses. La operación minera postula a que la causa del desgaste excesivo ocurre por el impacto del material al interior del chute y las condiciones de operación a la cual opera la correa de alimentación.

Este es un punto de transferencia que transporta mineral de cobre en etapa de chancado primario (Figura 4), desde la correa principal a zonas de apilamiento experimentando alto desgaste al interior del chute. Como resultado, esta línea de transporte funciona por debajo del tonelaje de diseño para minimizar el desgaste o aumentando el tiempo de recambio en sus revestimientos. Cuando se produce un desgaste excesivo pueden ocurrir dos cosas, que solo se desgaste el revestimiento o que se desgaste el revestimiento y luego ocurra la rotura del chute y el proceso de apilamiento deba ser detenido hasta que se haga cambio del revestimiento o en caso de rotura se parche o cambie la estructura de acero. Esta medida implica pérdida de

productividad en el área; por otra parte, genera un riesgo para los trabajadores que deben circular en el sector, ya que en caso de rotura se generaría desprendimiento de materiales.

Hay muchos tipos de chutes utilizados en la industria y criterios para la selección. Frecuentemente, las estaciones de transferencia están diseñadas usando una combinación de cajas de roca y chutes curvos o rectos, sin embargo, los puntos de transferencia que usan configuraciones complejas pueden ser difíciles de determinar sus velocidades de flujo y trayectorias de partículas. Un cálculo erróneo de la trayectoria de un flujo de mineral puede ser costoso, ya que el desgaste en superficies inesperadas podría ocurrir en paredes del chute o atoramiento si el material se desacelera repentinamente.

Se procesa mineral que debe ser transportado a través de este punto de transferencia de la instalación después del chancado, consta de rocas de aproximadamente 0,75 pulgadas a 6 pulgadas de diámetro, con diferente distribución granulométrica.

El equipo de procesamiento y sistemas de correas transportadoras en las instalaciones de mineral fueron diseñados y puestos en marcha hace muchos años. Sin embargo, a lo largo de los años, las características (tamaño de rocas) y las propiedades de flujo de mineral han cambiado debido a factores ambientales (por ejemplo, diferentes sitios de explotación) y factores de procesamiento, por esto se ha dificultado el manejo del mineral, dando lugar a problemas de desgaste.

El modelado DEM ha mejorado significativamente, de tal manera que permite obtener resultados razonablemente precisos con parámetros de simulación validados que son ideales para evaluar exhaustivamente el diseño y la funcionalidad de los sistemas de manejo de minerales. Este estudio brinda la oportunidad de demostrar los actuales problemas de flujo del mineral y ajustar posibles mejoras antes de tener que realizar cambios esenciales en el equipo.

La Figura 9 presenta el punto de transferencia de la situación actual, para modelar el flujo de partículas usando DEM y comparar los resultados con observaciones cuantitativas y cualitativas registradas en terreno.



*Figura 9:Foto de la correa principal, punto de transferencia actual y stacker de apilamiento.  
Fuente: Cinética Ingeniería.*

La estación de transferencia mostrada en la Figura 11 está situada entre la correa principal CV-1 y stacker de apilamiento ST-1 como se representa en la Figura 10. A este punto de transferencia para el caso de estudio se denomina PT-1, el cual fue diseñado para ser un chute de bajo mantenimiento donde las descargas de material de la correa transportadora CV-1 impactarán una pared vertical (placa de desgaste). El material se dirige entonces a la sección inferior del chute, que abastece el mineral sobre el stacker ST-1. Los detalles de las correas transportadoras y especificaciones de diseño se describen en el capítulo 5.

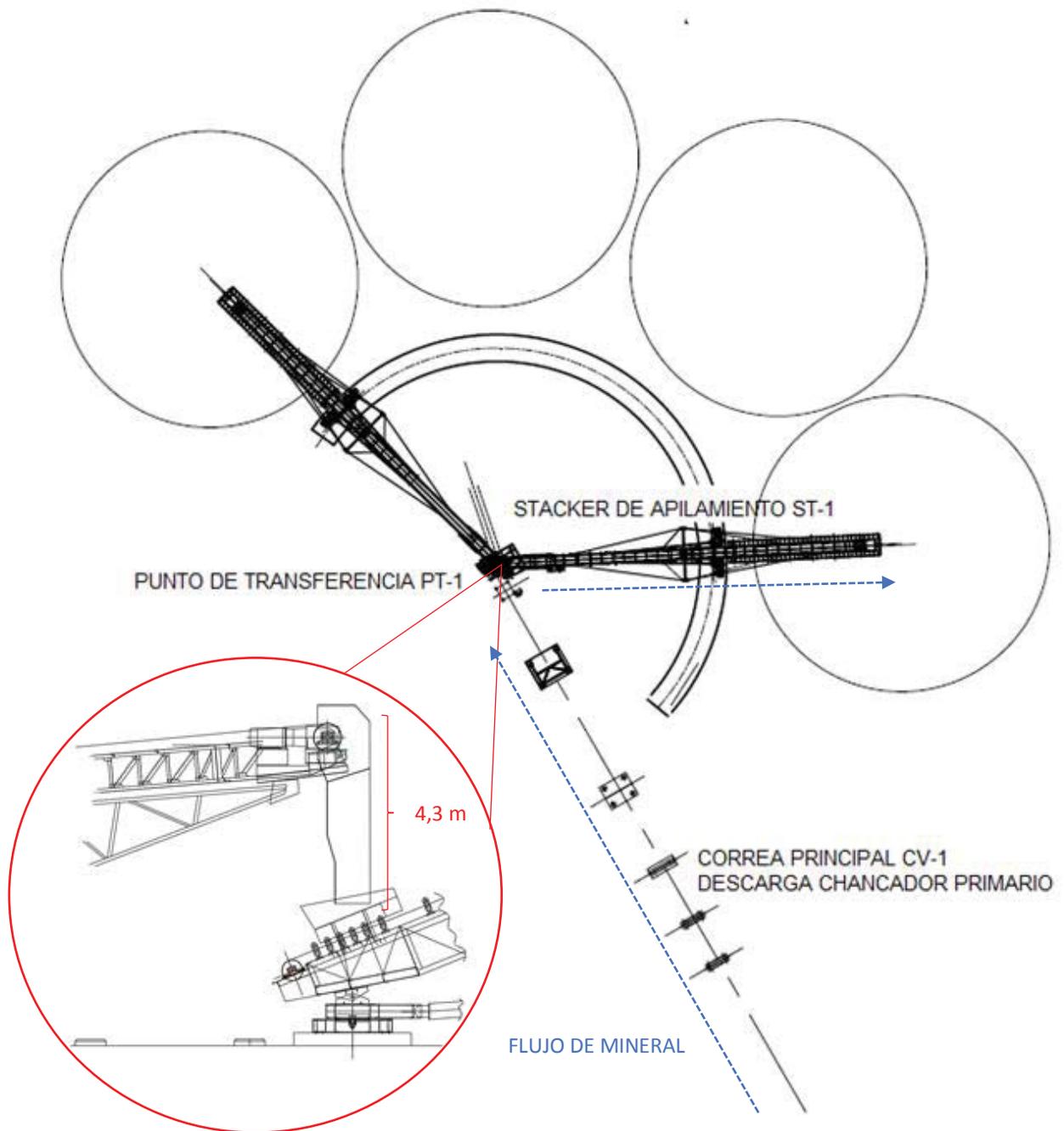


Figura 10: Disposición general punto de transferencia PT-1.  
Fuente: Cinética Ingeniería.

Con la disposición de diseño actual y la gran altura de caída (Ver Figura 10), el punto de transferencia PT-1 sufre los siguientes problemas:

La parte superior del chute no recibe de forma correcta el mineral, causando alto desgaste en las superficies con revestimiento y desgaste innecesario en las superficies sin revestimiento que son difíciles de reemplazar y monitorear debido a la localización.

La correa de alimentación CV-1 está situada a unos 4 m por encima de ST-1, lo que hace que el material caiga verticalmente desde la correa de alimentación y se descargue sobre la correa de recepción provocando el eventual desgaste de las faldas y la cubierta de la correa.



*Figura 11: Vista lateral del punto de transferencia actual.  
Fuente: Cinética Ingeniería.*

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un diseño de los elementos mecánicos de un punto de transferencia, que solucione el problema actual del excesivo desgaste.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Desarrollar una simulación DEM y analizar el desgaste del punto de transferencia para situación actual.

Elaborar una nueva disposición geométrica del punto de transferencia actual, que solucione los problemas de desgaste y desarrollar una simulación DEM del rediseño del punto de transferencia para situación futura.

Desarrollar un análisis comparativo referente al desgaste registrado en terreno entre una geometría y otra, obteniendo resultados cuantitativos.

### 1.3. Alcances

El estudio presente busca proporcionar una mayor comprensión sobre el diseño de un punto de transferencia y los métodos adoptados para optimizar un punto existente, referente al desgaste. Las ventajas mecánicas y productivas que se obtienen al alterar la disposición geométrica de los elementos mecánicos en cada simulación, son validadas mediante el software LIGGGHTS que opera bajo el método de los elementos discretos.

El desgaste presente en los revestimientos y el comportamiento del material serán evaluados y contrastados para determinar de esta forma, cual es la mejor disposición geométrica para este punto de transferencia. Esta determinación otorga a la industria minera una alternativa viable de optimización del proceso de transporte de minerales.

El modelado del punto de transferencia es elaborado en el software Salome<sup>1</sup>, en el que solamente se especifican los elementos que interactúan con el mineral de estudio, es decir; las

---

<sup>1</sup> Software libre que proporciona una plataforma genérica para pre y post procesamiento de simulaciones numéricas+.

dimensiones y materiales de las superficies internas del punto de transferencia, pero no la estructura y elementos de sujeción que le dan soporte.

#### 1.4. Metodología

El estudio se desarrolla en 4 etapas que contempla el estudio y aprendizaje del software LIGGGHTS, el levantamiento de información, el desarrollo del diseño actual y el desarrollo del rediseño optimizado. Estas se separan en sub etapas, que desarrollan los objetivos específicos de este trabajo, como se describen en la Figura 12.



*Figura 12: Etapas empleadas para la optimización del punto de transferencia actual.  
Fuente: Elaboración propia.*

## 2. Puntos de transferencia

En este capítulo se examinará la literatura actual sobre el diseño de puntos de transferencia. Se introducirán a los elementos de unchute y los problemas asociados con los conductos mal diseñados, los tipos y métodos de diseño disponibles para calcular o predecir parámetros de flujo de material en cada componente principal de un punto de transferencia, tales como velocidades de descarga de material, trayectorias de material, el impacto del material y el flujo

a través de los conductos. Esta tesis investigará sólo aquellas configuraciones más recurrentes en la industria.

### 2.1. Características de los puntos de transferencia entre correas transportadoras

Un punto de transferencia es donde el material se mueve de un equipo a otro. Un chute puede ser una zona de carga o descarga, en el caso de que una correa transportadora esté alimentando a otra (Figura 8). Sin embargo, un punto de transferencia podría ser también cuando una correa alimenta otro sistema de manipulación, procesamiento de materiales o donde la correa reciba carga de otro sistema. Estos sistemas pueden ser recipientes de almacenamiento de cualquier tipo; vehículos de carga tales como camiones, vagones, barcos, etc.

La Figura 8 muestra las partes más importantes de un punto de transferencia común, pero existen variados casos con disposiciones geométricas diferentes.

La dinámica de flujos del material al interior del chute revela que el material impacta sobre las superficies, provocando un cambio de dirección y velocidad en este. El efecto de impacto está en función de la disposición geométrica, velocidad de la correa alimentadora y propiedades del material, determinando así el comportamiento del material en su trayectoria al interior del chute. Las paredes interiores llevan un revestimiento para prevenir el desgaste acelerado de las paredes estructurales del chute.

El objetivo de diseño de un punto de transferencia ideal debe ser que la velocidad y dirección final del material que pasa a través de él sea la misma que la velocidad y dirección de la cinta receptora (Colijn y Conners, 1972) y el componente de velocidad normal debe minimizarse, para limitar el desgaste de la cinta receptora y también para minimizar el derrame (Roberts, 2001). Además, debe diseñarse el peor escenario para un material dado. Las propiedades de los materiales que deben considerarse incluyen el ángulo de reposo, densidad aparente, abrasividad, fluidez, distribución de tamaño de partícula, contenido de humedad, forma de partícula y ángulo de sobrecarga. En consecuencia, es importante que los conductos sean adecuadamente diseñados para minimizar los efectos de estas variables y permitir el éxito final de la zona de carga y de todo el punto de transferencia.

## 2.2. Problemas de los puntos de transferencia

Existen muchos factores de diseño que se deben abordar al considerar la aplicación de un punto de transferencia. Los chutes son a menudo considerados como el área que requiere más mantenimiento (Alspaugh, 2004). Sin una planificación cuidadosa y/o falta de conocimiento de las transferencias pueden ocurrir los siguientes problemas si estos son mal diseñados y mantenidos.

### 2.2.1. Desgaste y daños en la cinta transportadora

El desgaste en la superficie de una cinta transportadora receptora puede ser alto debido a la fricción abrasiva si el material no fluye sobre la cinta de manera adecuada. Este daño puede ocurrir si las rocas grandes impactan de una manera incontrolada en la cinta transportadora receptora (Benjamin, 1999).

### 2.2.2. Derrame de material

El flujo descontrolado a través de un punto de transferencia podría ocasionar un derrame de material como resultado de la carga no centrada sobre la cinta receptora (Engineering, Martin, 2002). Esto podría hacer que la correa se deslice, exponiendo el material a los rodillos o espacios entre la correa y las guarderas. La correa también podría llegar hasta el punto de roce en el marco externo, causando daños a la cinta. Las guarderas se instalan comúnmente en la zona de carga para contener el material a derramar y localizarlo en la correa.

Otra causa posible de derrame es en el arranque o apagado. En estos casos, el material no está viajando a toda velocidad y dependiendo del diseño de la transferencia, el material puede no ingresar por la zona de descarga. Se instalan conductos para redirigir este material que se mueve más lentamente al transportador receptor independientemente de la transferencia principal.

### 2.2.3. Degradación de material

La generación de polvo puede resultar de la degradación por impactos del material a medida que viaja a través de un punto de transferencia con un comportamiento turbulento (Lonie, 1989). Considerando que se debe operar bajo leyes de impacto ambiental, que es un tema importante. El material que se forma como resultado de la degradación a veces puede llegar a

ser inútil dentro de un proceso dado y se convierte en un material de desecho. Esto sin duda conducirá a un aumento en los costos, ya que probablemente necesitan incorporar equipo adicional a su proceso para separar este material degradado del flujo de material (Snow, 1991).

#### 2.2.4. Acumulación de material

Si un material tiene un carácter cohesivo o la humedad es alta, puede adherirse a superficies inclinadas y/o verticales dentro de un punto de transferencia y con el tiempo la acumulación puede resultar en bloqueos (Benjamin, 1999) e incluso puede conducir a fallas de la estructura (Lonie, 1989).

#### 2.2.5. Bloqueo de material

Si la velocidad del material que se desplaza a través de una transferencia es demasiado baja, entonces una combinación de cohesión y distribución del tamaño del material puede hacer que un conducto se bloquee, ya que no puede despejarse lo suficientemente rápido (Benjamin, 1999). Esto puede dar lugar a grandes problemas cuando se reinicia el sistema con el transportador de recepción alimentado por inundación. Durante un período de tiempo, el material estará confinado entre las guarderas, pero una vez que se alcance el límite de estas, el material se derramará por los lados (Rozentals, 1991).

#### 2.2.6. Generación de ruido

El material que impacta sobre las superficies dentro de un punto de transferencia generará siempre un grado de ruido, la cantidad de ruido depende del diseño. Si el ángulo de incidencia es demasiado alto, podría producirse un impacto considerable y como resultado, ruido. El flujo turbulento a través de una rampa de transferencia también puede resultar en generación de ruido excesivo (Lonie, 1989).

Todos estos problemas pueden generar un excesivo desgaste dentro del punto de transferencia e incluso dejar inactiva la producción debido a las fallas de un chute mal diseñado, como también el fallo de la correa transportadora. (Engineering, Martin, 2002).

En la Figura 13 se muestra el problema de desgaste, en el revestimiento de un chute con la disposición típica Hood, que se estudiará en el capítulo 2.1.3.



*Figura 13: Problema de desgaste en un punto de transferencia.  
Fuente: Chute designs and trajectories using the discrete element method, David J. Kruse, 2009.*

### 2.3. Tipos de puntos de transferencia

En el diseño de puntos de transferencia no es posible detallar criterios que sigan algún diseño en particular. Por este motivo se pueden proponer varias configuraciones para un mismo punto de transferencia, en que se cumplan los criterios estipulados. Dada la cantidad de configuraciones existentes, este trabajo se limitará a estudiar los puntos de transferencias más utilizados según Engineering, Martin, 2002 y Huque, 2004.

Según el impacto y flujo del material, los elementos de un punto de transferencia son:

- Elementos de la sección superior del chute
  - Placa de impacto
  - Hood
- Elementos de la sección inferior del chute
  - Caja de rocas
  - Spoon

### 2.3.1. Placa de impacto

Una placa o rejilla de impacto es un método para desviar el flujo y absorber el impacto dentro del punto de transferencia. Una placa de impacto es una barrera consumible que se ubica al interior de un chute para absorber el impacto proveniente del material, al caer de la correa alimentadora como se representa en la Figura 14. Las placas de impacto se utilizan con frecuencia en puntos de transferencia no lineales, es decir, cuando se requiere un cambio de dirección con alta velocidad de correa y los espacios disponibles no son amplios. Estos dispositivos redirigen el material en la dirección de la cinta receptora. Las placas de impacto son conocidas como placas de sacrificio ya que absorben gran parte de la energía del material al impactar, desgastándose de manera acelerada, preservando las paredes del chute. Las rejillas de impacto están diseñadas para atrapar el material y desarrollar un impacto material sobre material que preserva la rejilla, el material rebota sobre el material retenido sin golpear realmente la rejilla o paredes del chute.

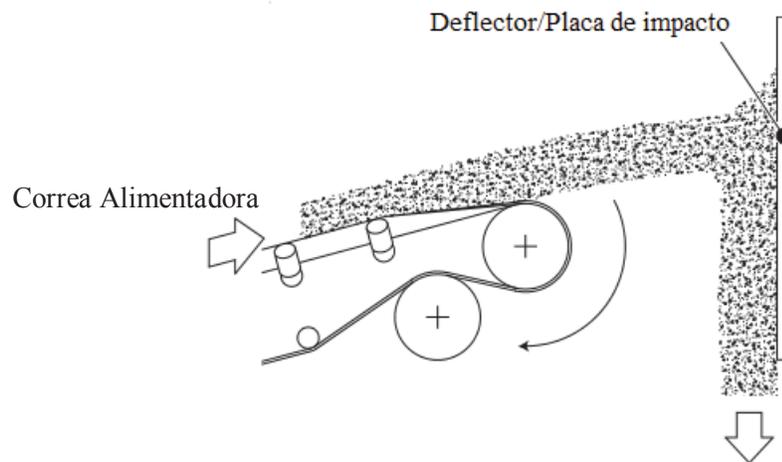


Figura 14: Representación de una placa de impacto.

Fuente: *Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers*, Shams T. Huque, 2004.

### 2.3.2. Hood

Este deflector es una placa curva o inclinada, diseñada para su uso en la sección superior del punto de transferencia, como se representa en la Figura 15. El objetivo del elemento tipo Hood es asegurar el flujo de material sin restricciones a través del sistema, por este motivo es un excelente elemento en la descarga, ya que controla el flujo, evitando acumulación, desgaste excesivo y evita la generación de polvo. Sin embargo, presenta dificultades en su fabricación e implementación debido a una geometría más compleja.

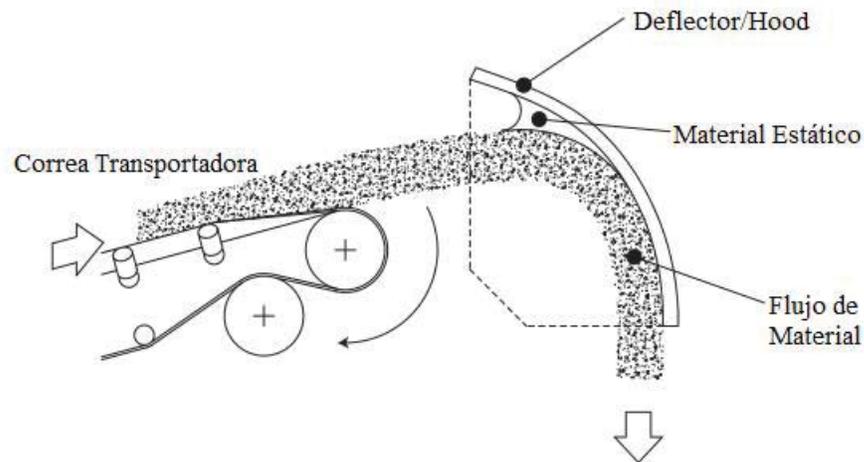


Figura 15: Representación de un Hood.

Fuente: *Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers*, Shams T. Huque, 2004.

### 2.3.3. Caja de rocas

Es otro método para minimizar el desgaste a través del impacto material sobre material dentro del chute. Las cajas de rocas comienzan con una saliente dentro del conducto, acumulándose material, con motivo de que el material subsiguiente se desplace sobre el material acumulado (Figura 16). La fuerza de impacto se disipa a medida que el material rebota sobre el material de la caja. Se reduce el nivel de impacto en la zona de carga y en la correa. Al manipular materiales finos o abrasivos se pueden formar mini cajas de rocas. Estas cajas más pequeñas permiten que el material se deslice sobre el material capturado en las salientes, reduciendo el

desgaste y la abrasión en las paredes del chute. Se denominan cascadas o escaleras de rocas, representadas en la Figura 16 (b). Las cajas están comúnmente dispuestas en lados alternos del chute, de modo que el material nunca tiene caída libre de más de 1,5 a 1,8 metros (Engineering, Martin, 2002). El efecto es reducir el impacto en la correa, así como la fractura del material y la generación de polvo.

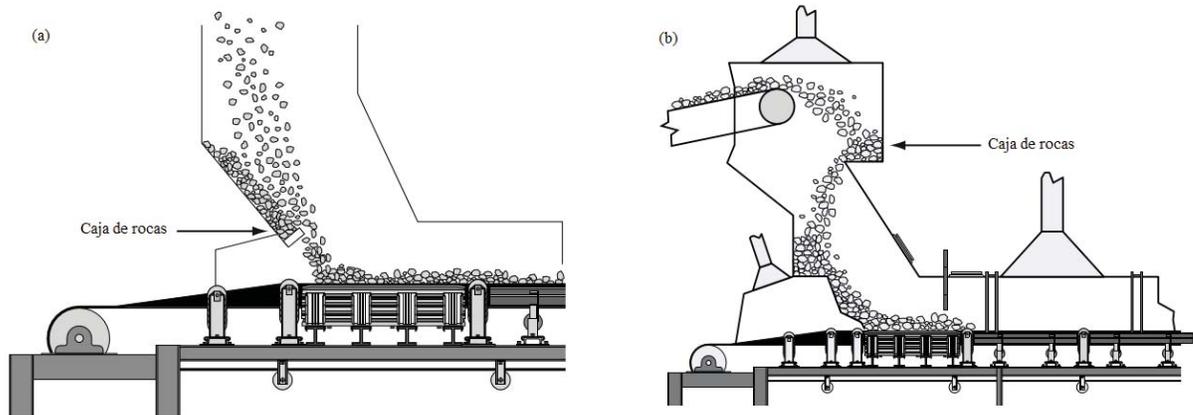


Figura 16: Representación de puntos de transferencia con cajas de rocas.  
Fuente: *The Practical Resource for Total Dust & Material Control*, Martin Engineering Company, 2002.

Es importante manejar las características cohesivas del material para evitar acumulaciones que puedan obstruir los conductos. La superficie de impacto es curva o inclinada dependiendo de las condiciones de cohesión y fricción del material. Después que el material golpea la cara inclinada de la superficie de la caja de rocas, el flujo de salida del material tiene una componente horizontal que es impredecible y puede no estar en la dirección requerida. Este método no debe usarse para materiales frágiles que puedan sufrir degradación o si se transporta más de un material.

#### 2.3.4. Spoon

Este deflector similar al Hood es una placa curva o inclinada, diseñada para su uso en la sección inferior del punto de transferencia, como se representa en la Figura 17. Igualmente asegura un buen control del flujo de material y una adecuada carga a la correa de recepción. Su construcción e instalación presenta dificultades y alto costo.

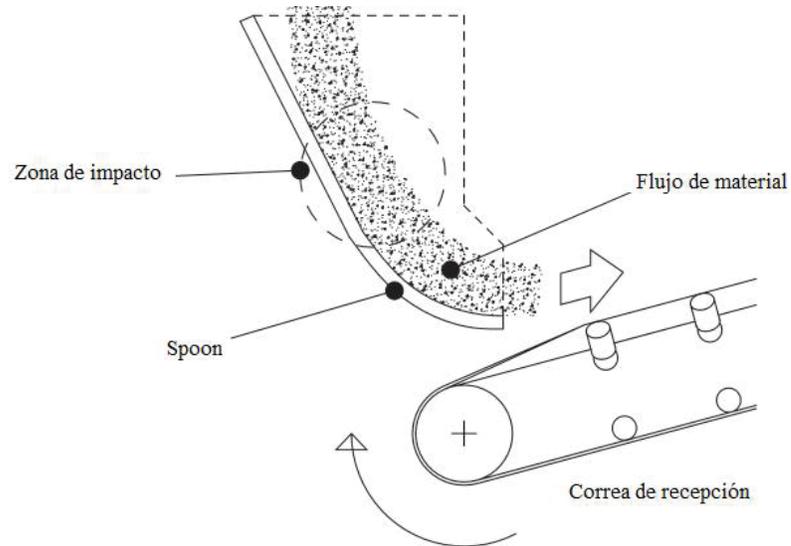


Figura 17: Representación de un Spoon.

Fuente: *Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers*, Shams T. Huque, 2004.

## 2.4. Diseño de un punto de transferencia

Hay tres enfoques básicos adoptados para el diseño de puntos de transferencia. El primero y más común es el método convencional de redacción de una solución utilizando "reglas básicas" para adaptarse a la disposición maestra de los transportadores. Esta sería la solución redactada. El segundo método consiste en especificar los componentes críticos del punto de transferencia y diseñar la disposición general del transportador para minimizar los problemas de un punto de transferencia. El tercer método es una solución de ingeniería. Este método se utiliza para analizar las características del material, producir chutes diseñados a medida que minimizan la interrupción de la trayectoria del material y colocan el material en la siguiente cinta, en la dirección apropiada y a la velocidad de la cinta receptora. Esta tercera clase de puntos de transferencia está tipificada por especificaciones que requieren que el material sea probado para sus propiedades de flujo. Esta ingeniería se puede hacer para un nuevo diseño, o se puede hacer como reingeniería para los puntos de transferencia existentes (Figura 18). Para este estudio el proceso de diseño considera el enfoque de ingeniería.

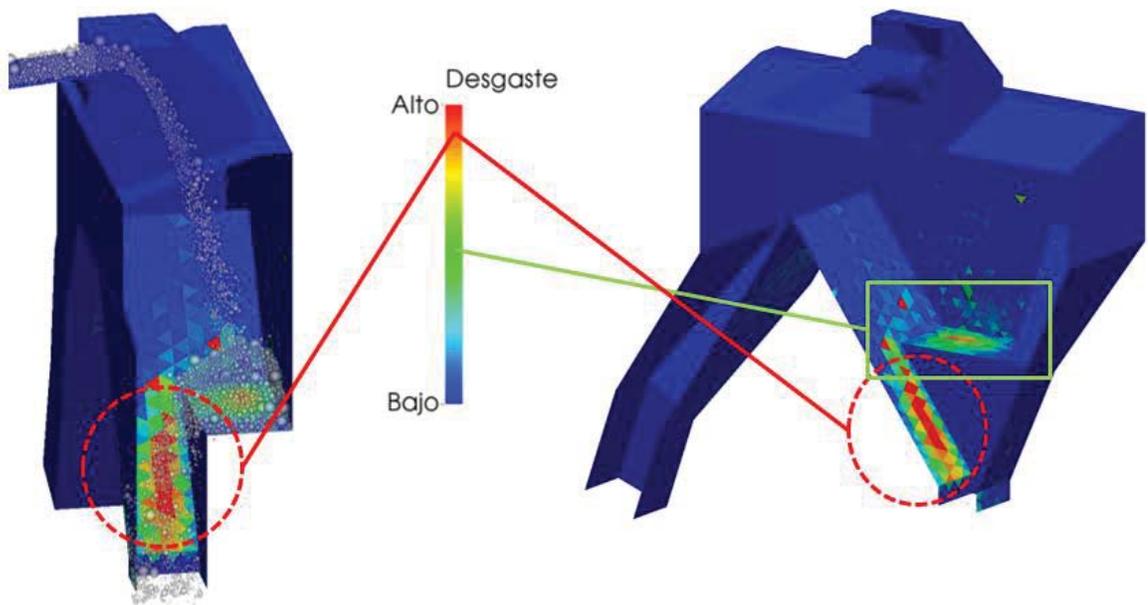


Figura 18: Representación DEM de la situación de un punto de transferencia.  
Fuente: Cinética Ingeniería.

Según autores y operadores en terreno experimentados señalan que un diseño eficaz del chute requiere las siguientes etapas (Colin, 2013):

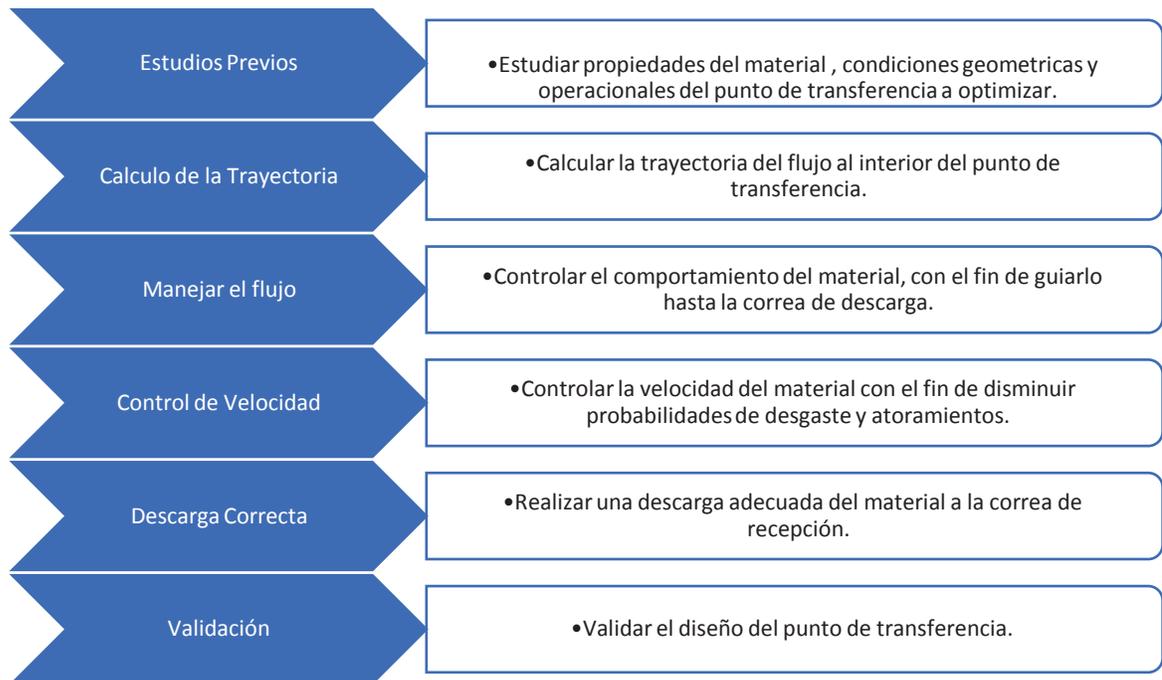


Figura 19: Etapas del diseño de puntos de transferencia  
Fuente: Elaboración propia.

La forma en que se desarrollarán estas etapas es la siguiente:

Estudios previos: Se debe obtener las características más importantes como la granulometría, contenido de humedad del material, velocidad de la correa, disposiciones geométricas de la estructura actual, alturas, ángulo de correa y el tipo de material que debe ser transportado, con motivo de evaluar qué tipo de punto de transferencia debe ser seleccionado como diseño de partida.

Calculo de la trayectoria: Se procede con el método más básico que corresponde a realizar el cálculo con las ecuaciones de movimiento de tiro parabólico, sin embargo, este no entrega las

mitades superiores e inferiores del flujo de material. Por cual es obtenida, realizando una simulación DEM.

Manejar el flujo: Se controla el flujo de material con la forma de la sección transversal del chute, la que puede ser cónica, rectangular o cuadrada.

Control de velocidad: Se debe asegurar que el chute presente una geometría adecuada, todo esto con la finalidad de que el material fluya a las menores velocidades posibles sin producir atollo, ya que, a velocidades mayores, es probable que ocurra desgaste acelerado.

Descarga Correcta: Realizar bien esta etapa es de gran importancia para conservar la integridad de la correa receptora y sus elementos, además de evitar el derramamiento de mineral.

Validación: Una vez que se ha definido las dimensiones y materiales de un punto de transferencia a partir de los criterios de diseño, este será validado por simulación computacional.

#### 2.4.1. Principios de diseño para puntos de transferencia

Stuart-Dick, D. y Royal, T.A han desarrollado criterios básicos para prevenir los principales problemas en los puntos de transferencia.

##### 2.4.1.1. Principio 1: Prevenir la acumulación de material

Se debe analizar la inclinación de las paredes del chute, para permitir el adecuado deslizamiento de un material específico, a las menores velocidades sin producir acumulaciones y mantener mínimos desgastes. Específicamente en los puntos de impacto, después de una caída libre o cuando se cambia de dirección.

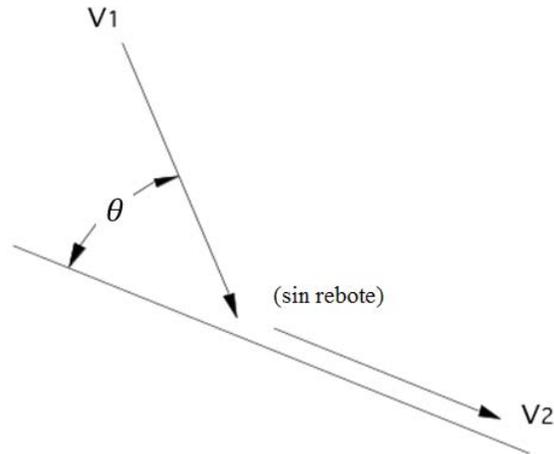


Figura 20: Velocidad de una partícula después del impacto en chute.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992

La Figura 20 representa una placa inclinada de un chute, en la cual interactúa el flujo de partículas, haciendo referencia a la velocidad de estas posteriormente a impactar el chute,  $V_2$  con relación a su velocidad antes del impacto,  $V_1$ :

$$\frac{V_2}{V_1} = \cos \theta - \sin \theta \tan \phi \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\theta$  = ángulo del flujo entrante con relación a la superficie del chute.

$\phi$  = ángulo de fricción interna entre el material y la pared del chute.

Para reducir  $V_2$  a cero la suma de ambos ángulos debe ser de  $90^\circ$  ( $\theta + \phi = 90^\circ$ ). Mientras más lisa sea la superficie del chute, menor será el valor de  $\phi$ , por lo tanto, mayor será el valor crítico del ángulo de impacto  $\theta$  antes que  $V_2$  pase a cero. En este ángulo o mayores de  $\theta$ , no hay deslizamiento del sólido sobre la superficie. Al menos una parte del flujo se “atasca” en la superficie. La presión de impacto,  $\sigma$ , se determina de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{\rho_b V_1 \sin^2 \theta}{g}$$

Ecuación 2

Donde:

$\rho_b$  = densidad aparente del material.

$g$  = aceleración de gravedad.

Una prueba desarrollada por la empresa Jenike & Johanson muestra en la Figura21 el ángulo en el que se desliza el sólido en función de la presión de contacto.

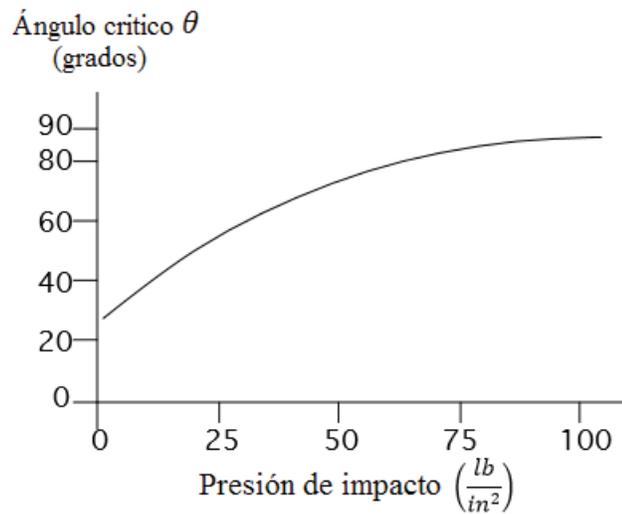


Figura21: Curva típica de la presión de impacto en función del ángulo entre el flujo de material y la superficie.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992

Si el punto de transferencia se diseña para desviar dos veces el flujo (Figura 22), las expresiones que relacionan las velocidades entre cada una de las placas se indican en la Ecuación 3.

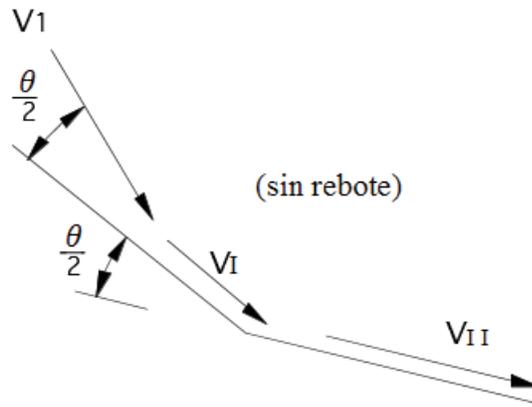


Figura 22: Velocidad de una partícula después de dos impactos.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.

La Figura 22 hace referencia a las velocidades,  $V_1$  corresponde a la velocidad antes del primer impacto y  $V_{II}$  a la velocidad posterior al segundo impacto. Están relacionadas de la siguiente manera:

$$\frac{V_I}{V_1} = \cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \tan \phi \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{V_{II}}{V_1} = \cos \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \tan \phi \quad \text{Ecuación 4}$$

Al segundo impacto, se obtiene la pérdida de velocidad del flujo al pasar por el chute, en la siguiente expresión:

$$\frac{V_{II}}{V_1} = \cos^2 \frac{\theta}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \tan \phi + \sin^2 \frac{\theta}{2} \tan^2 \phi \quad \text{Ecuación 5}$$

En la Figura 23 se muestra una familia de curvas de la relación de velocidades después de impactar un chute de dos o una placa.

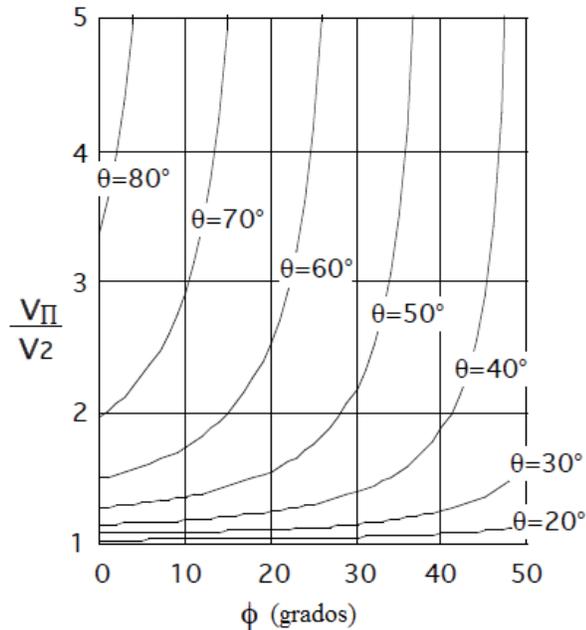


Figura 23: Curvas típicas de velocidades en función del ángulo de fricción y ángulo de inclinación.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.

La ventaja que muestran estas curvas es que la velocidad posterior de salida después del impacto aumenta drásticamente, cuando el ángulo de inclinación  $\theta$  es mayor que  $30^\circ$ , respecto a cuándo se utilizan dos desviaciones en vez de una.

#### 2.4.1.2. Principio 2: Asegurar área de la sección transversal

Mientras el material se desliza sobre las superficies del chute, intervienen nuevas variables como la aceleración. En una superficie inclinada (Figura 24a), se analizan las fuerzas que están relacionadas con esta variable sobre una partícula de material.

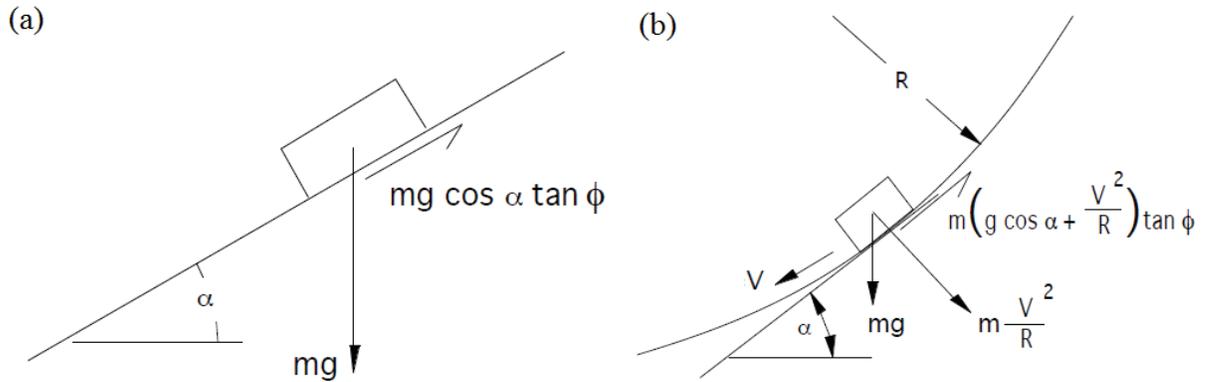


Figura 24: Diagramas de fuerzas de una partícula sobre: (a) Superficie inclinada.; (b) Superficie curva.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.

La aceleración de esta partícula bajo la influencia de la fuerza de gravedad está determinada por:

$$a = g(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) \quad \text{Ecuación 6}$$

Se desarrolla el mismo análisis para una superficie curva, en donde las fuerzas centrífugas se sumarán a las fuerzas normales entre el material y el chute (Figura 24b). La nueva ecuación queda determinada por:

$$a = g(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) - \frac{V^2}{R} \tan \phi \quad \text{Ecuación 7}$$

La velocidad del flujo a cualquier distancia "S" a lo largo de la superficie, con respecto al punto inicial viene dada por:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2aS} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$V_0 =$  velocidad en el punto inicial ( $S = 0$ ).

Para determinar el área de la sección transversal del chute, se debe tener en consideración que el área de la sección transversal de la corriente de material cambiará a lo largo del chute a medida que el flujo se acelera o desacelera. También se recomienda como regla empírica que un canal debe tener un tamaño tal que no esté más de un tercio lleno, en la sección con velocidad mínima. (Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992).

#### 2.4.1.3. Principio 3: Control de flujo

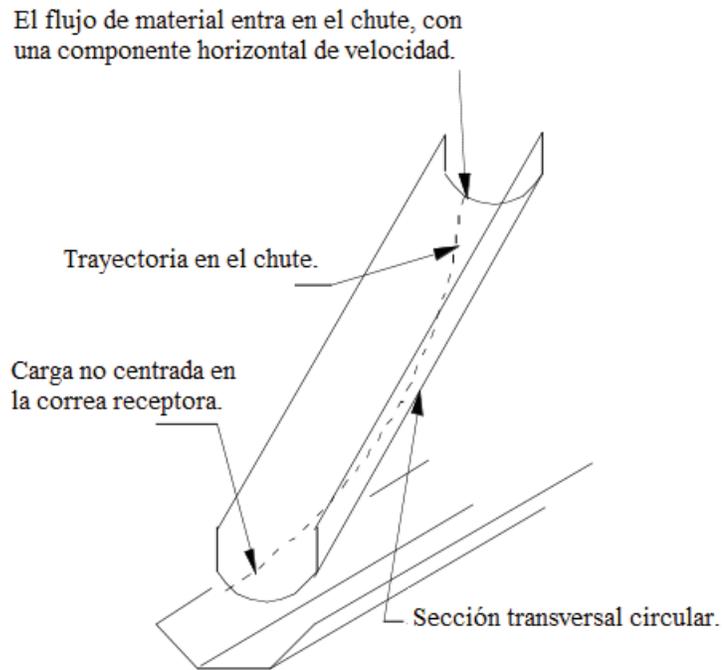
Para controlar la velocidad del flujo de material a través del chute, es ventajoso inclinar las superficies en lugar de permitir que las partículas caigan libremente sobre una sección vertical. Una vez que están en el chute, su dirección debe ser controlada en todo momento independiente del tipo de material. Esto se logra mediante una superficie curvada que dirige el material en una sola dirección. En consecuencia, los conductos del chute deben estar compuestos por superficies cónicas, tubos cilíndricos o placas planas dispuestas lo más cercano a estas configuraciones geométricas.

La mayoría de los chutes tienen secciones transversales cuadradas o rectangulares. Las razones para hacerlo son:

- Las secciones cuadradas o rectangulares están hechas de placas planas de fácil diseño, fabricación, montaje y mantenimiento cuando las secciones se desgastan.
- Fácil instalación de puertas de inspección para detectar conductos bloqueados.

Sin embargo, cuando el material es cohesivo, hay ventajas significativas que tienen las superficies curvadas ya que evitan que se acumule en las superficies, tienen un control más adecuado del material controlando la generación de polvo y centrado de carga.

Es importante controlar la componente horizontal de velocidad y mantener la carga centrada a la salida del chute (Figura 25). Mediante cortinas de caucho, cadenas y nervaduras del chute se pueden evitar estos problemas.



*Figura 25: Trayectoria del material sobre la correa de recepción.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.*

El DEM simula el comportamiento del material para obtener resultados de la trayectoria del material con bastante precisión, sin embargo, la experiencia en muchos casos sigue siendo la herramienta más útil, para dejar la carga bien centrada sobre la correa receptora y si es posible a una velocidad ligeramente mayor que la correa.

#### 2.4.1.4. Principio 4: Minimizar el desgaste

La altura de caída y cambios bruscos de la dirección del flujo de material deben minimizarse para controlar el alto impacto de los sólidos que pueden producir alto desgaste en las superficies del chute, degradación del material y problemas de fluidización de materiales finos. Los diseños se deben ajustar para un solo material. Para materiales abrasivos la solución del alto desgaste es proporcionar cajas de rocas, para eliminar el impacto del flujo de material sobre las superficies del chute. Sin embargo, para materiales cohesivos que sean abrasivos la solución es más difícil. Una alternativa es que la geometría del chute sea lo más cercana a la trayectoria natural del material, reduciendo el impacto y manteniendo la velocidad del

material. Otra solución es minimizar las superficies en contacto con el material en los puntos de impacto. Para esto se utilizan nervaduras con una sección transversal curvada, para crear mini cajas de impacto como se muestra en la Figura 26. Recomendado cuando se está manipulando materiales finos húmedos mezclado con partículas de mayor tamaño.

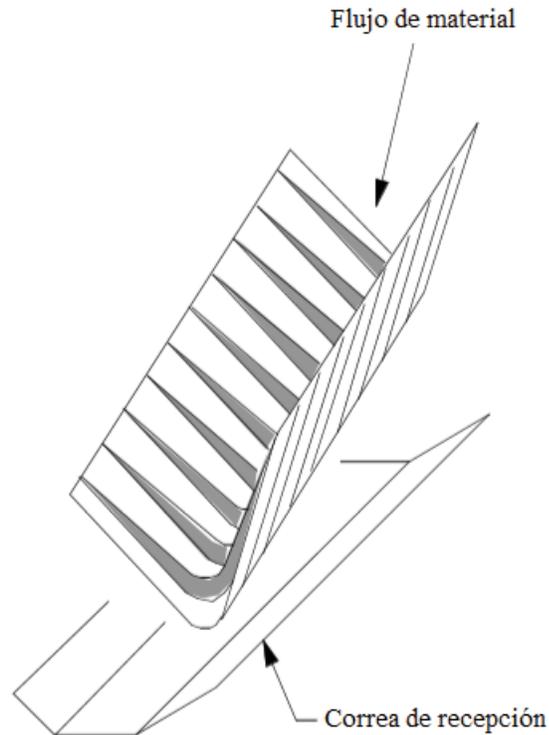


Figura 26: Punto de transferencia con pequeñas cajas de rocas.  
Fuente: Stuart-Dick, D. & Royal, T.A, 1992.

#### 2.4.1.5. Principio 5: Control de polvo

El polvo se genera cuando el material se mezcla por el aire. Para evitar polvo, es esencial:

- Mantener el material en contacto con la superficie del chute.
- Controlar el flujo de material.
- Mantener bajos ángulos de impacto (entre el flujo de material y superficie del chute).
- Mantener una velocidad constante.
- Asegurar la carga en dirección adecuada.

#### 2.4.1.6. Principio 6: Minimizar desgaste del material

Este principio es de suma importancia dado que el desgaste de las partículas puede afectar las condiciones de operación de un chute que fue diseñado para una determinada granulometría. El desgaste ocurre generalmente en los puntos de impacto y se puede minimizar con las siguientes medidas:

- Minimizando el ángulo entre el flujo de material y las superficies de impacto.
- Controlar el flujo de material y mantener en contacto con la superficie del chute.
- Mantener una velocidad constante a través del chute.

### 3. Método de los elementos discretos

El método de los elementos discretos simula el comportamiento mecánico de un medio formado por elementos independientes entre sí, que pueden o no interactuar a través de sus puntos de contacto. El movimiento de cada uno de estos elementos es de manera libre, determinado según las interacciones que se generen en el momento de la simulación. Estas son ecuaciones ideales para representar sistemas granulares y el comportamiento de los elementos que componen un medio o sistema rígido (Ijurra Astudillo, 2016).

La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es aleatoria, por lo que se puede formar medios con diferentes tamaños de partículas distribuidos a lo largo del conjunto, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analiza y se simula mediante esta técnica numérica.

#### 3.1. Descripción del método

El método de elementos discretos es un método numérico que discretiza (divide) el medio en un gran número de partículas independientes, que utiliza las leyes de Newton para modelar el comportamiento de cada una de ellas. El movimiento de las partículas está determinado por las fuerzas externas como la gravedad y las interacciones generadas con su entorno. Dentro de este sistema la ubicación de las partículas es de manera aleatoria, con lo que se pueden formar diferentes tamaños de partículas, reflejando la naturaleza granular del medio en la simulación y análisis.

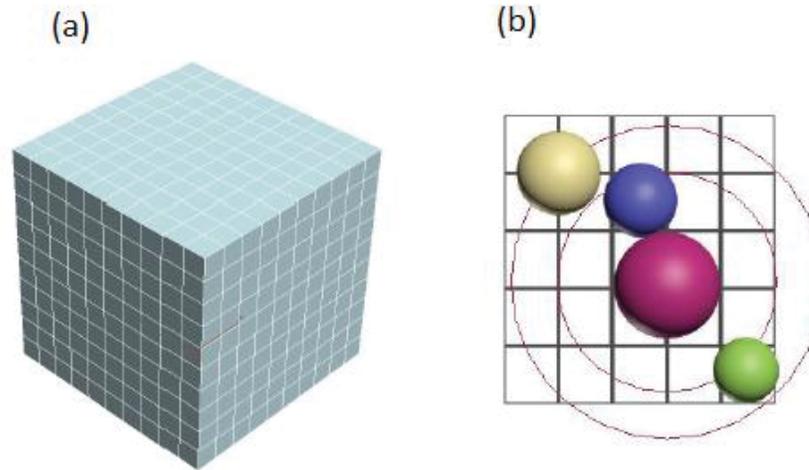


Figura 27: (a) Dominio discretizado (b) Representación gráfica de la búsqueda de contactos.  
Fuente: Cáceres Soto & Gamboa Gaioli, 2014.

La forma de una partícula puede variar según el caso, pueden ser discos para casos bidimensionales, esferas en casos tridimensionales o polígonos irregulares donde se necesita caracterizar un medio distinto.

El DEM incorpora un algoritmo de búsqueda como una “lista de vecinos”, para este caso definidos por cubos (Figura 27) el cual discretiza el dominio de estudio y realiza una búsqueda en una vecindad cercana de partículas disminuyendo el tiempo de cálculo, capaces de identificar las partículas que tienen interacción en un intervalo de tiempo, esta lista de vecinos cercanos cambia en cada paso de tiempo, debido al desplazamiento de las partículas. El movimiento de estas partículas es independiente, lo que genera ilimitados valores de traslación y rotación para cada partícula, siendo muy beneficioso en el área de la geotecnia y movimiento de materiales (Ijurra Astudillo, 2016).

### 3.2. Estado del arte

Este método fue desarrollado por primera vez por Cundall (1971). Cundall y Strack (1979) aplicaron inicialmente el método de elementos discretos en el campo de la geotécnica. La hipótesis de Cundall define que las partículas que forman el sistema son rígidas, lo que quiere decir que no poseen deformación, por lo que la deformación total del conjunto se traduce en menor o mayor espacio entre los huecos de las partículas luego de alguna acción mecánica

entre estas. Las propiedades mecánicas del sistema se definen de acuerdo a la interacción entre las partículas y su entorno, esta interacción se define de acuerdo a la rigidez normal y tangencial, que relaciona las fuerzas que se generan entre las partículas al impactar, de acuerdo a sus desplazamientos.

Los resultados de estos estudios numéricos y experimentales confirmaron que el DEM es una herramienta válida para investigar el comportamiento fundamental de los materiales granulares. Paralelamente al desarrollo de una mayor capacidad de procesamiento computacional, el DEM se ha utilizado cada vez más para investigar el comportamiento de los materiales granulares en el nivel micromecánico y como una herramienta para analizar una gran variedad de aplicaciones industriales, como en la minería y procesamiento de minerales. Estos estudios están en aumento, lo demuestra una extensa literatura publicada en la investigación de Huque, 2004, que hace referencia a:

- Operación de un molino de bolas.
- Puntos de transferencia.
- DEM de un mezclador de arado.
- Descarga de una tolva cilíndrica.
- Máquinas excavadoras.
- Flujos en molinos centrífugos.
- Simulaciones numéricas de flujos de partículas en cilindros giratorios.
- Simulaciones numéricas de partículas que fluyen por una superficie inclinada.
- Simulaciones numéricas del movimiento de partículas bajo la influencia de una fuerza constante.
- Estudios de simulación que se centran en el flujo de corte de un conjunto de partículas.
- Separación de tamaño mediante vibración.
- Otras aplicaciones industriales incluyen: separación por densidad, segregación inducida por el usuario y cucharas de muestreo.

Sin embargo, existen pocos estudios DEM que investiguen el desgaste de los puntos de transferencia entre correas transportadoras. Ninguna de las investigaciones disponibles detalla los procesos de diseño y numéricos utilizados, ni proporcionan suficientes referencias a la literatura. El uso de datos en terreno ha sido un factor predominante para esta investigación,

no obstante, se han desarrollado varios estudios de materiales granulares en puntos de transferencia con diferentes objetivos, por ejemplo, investigaciones sobre calibración de parámetros, validación de teorías, problemas y optimización para el diseño de chutes por Grima, Fraser, Hastie y Wypych (2011). Estos trabajos han desarrollado medios analíticos o computacionales para simular flujos y luego comparar con datos experimentales cuantitativos. La obtención, interpretación y presentación de datos en laboratorio es mas sencilla ya que no tienen que considerar aspectos de flujos irregulares.

En el país, la investigación sobre el tema sigue siendo escasa, se han desarrollado investigaciones universitarias sobre análisis del movimiento de carga de molinos SAG por Ahues & González (2014), estudio del movimiento de carga en un chancador primario de la gran minería de Cáceres & Gamboa (2014) y el rediseño de punto de transferencia en sistema de correas transportadoras de mineral de cobre por Duque (2016).

### 3.3. Ecuaciones de movimiento

La formulación establecida para el desarrollo del método de elementos discretos se basa en las ecuaciones de movimiento para sólidos rígidos mediante las ecuaciones de Newton y Euler, planteadas de manera general para cuerpos de cualquier geometría.

Para el movimiento de traslación, considerando una partícula  $i$  de un sistema discreto, según la segunda ley de Newton se obtiene lo siguiente:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \overrightarrow{F_{i,t}} + m_i \vec{g} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$F_{i,t}$  = fuerza de interacción sobre la partícula  $i$  en el instante  $t$ .

$m_i$  = masa de la partícula  $i$ .

$x_i$  = posición de la partícula  $i$ .

$\vec{g}$  = aceleración de gravedad.

Para el movimiento rotacional, de las ecuaciones de Euler se obtiene:

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \vec{T}_i$$

Donde:

$\vec{T}_i$  = momento resultante.

$I_i$  = momento de inercia de la partícula i con respecto al centro de masa.

$\vec{\omega}_i$  = velocidad angular de la partícula i.

Determinadas las ecuaciones se obtiene el comportamiento del sistema de partículas.

### 3.4. Modelo de contacto

El modelo de contacto Hertz-Midlin utilizado para el caso de estudio mediante el programa LIGGGHTS es el más utilizado en simulaciones de este tipo. Este es un modelo no lineal, muy adecuado para materiales granulares y no cohesivos. Determina las fuerzas de interacción entre dos partículas o estas con su entorno basada en la teoría de contacto hertziana para la componente normal y en el trabajo de Mindlin-Deresiewicz para la fuerza tangencial. Este modelo denominado Hertz-Mindlin (H-M), consiste en un sistema resorte y amortiguador que representan las características elásticas y viscosas respectivamente, en la Figura 28 se muestra una representación del modelo, el cual consta de un resorte y un amortiguador en dirección normal y otro en dirección tangencial, que determinan las fuerzas de interacción.

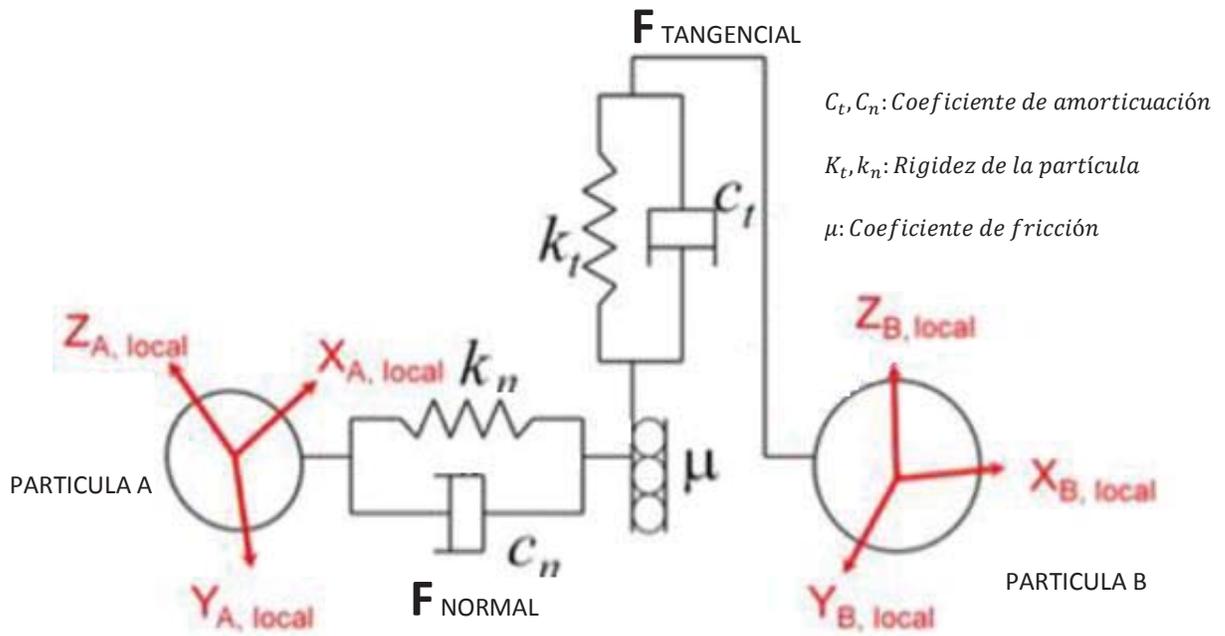


Figura 28: Representación del modelo de contacto no lineal resorte-amortiguador.  
 Fuente: Elaboración propia,

Este método establece a las partículas como sólidos rígidos (no se deforman), si no que estas se traslapan. Sin embargo, en la realidad los cuerpos no son sólidos rígidos, se deforman al aplicar un esfuerzo. En consecuencia, con el fin de modelar la interacción entre partículas, considerando deformación elástica y pérdidas de energía durante el choque, se calculan las fuerzas de interacción en base a la penetración entre ellas y la velocidad de una respecto de otra.

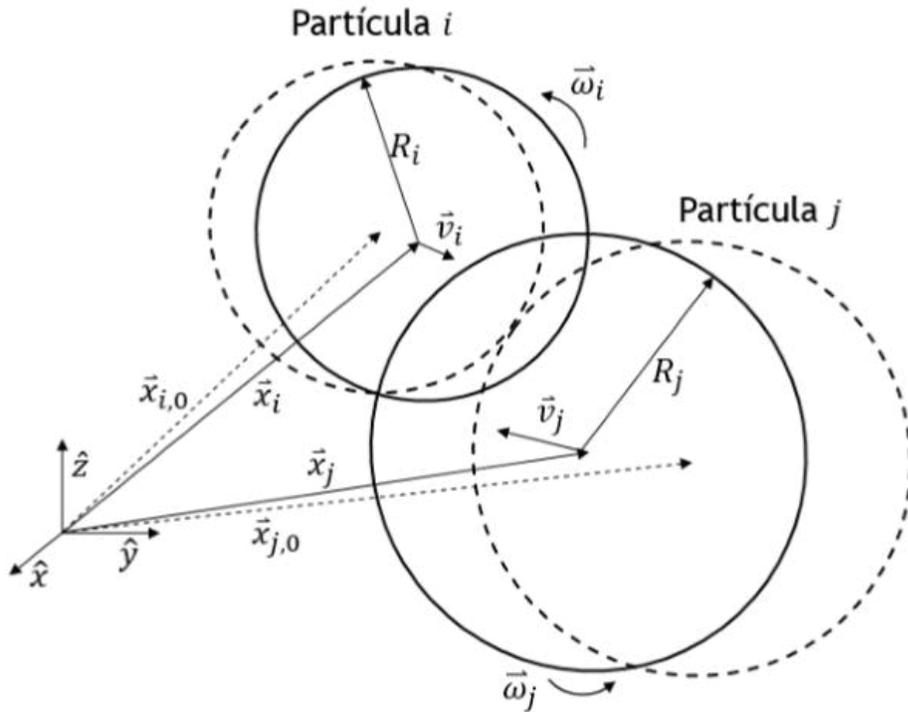


Figura 29: Representación del método de elementos discretos, donde interactúan dos partículas esféricas  
Fuente: Duque, 2016.

El trabajo actual se limita a partículas esféricas. La Figura 29 representa la interacción de dos partículas  $i$  y  $j$  respectivamente, donde la línea segmentada representa la posición inicial. Las líneas sólidas representan las esferas después del contacto, de radios  $R_i$  y  $R_j$ , momento en el cual se encuentran traslapadas. La posición inicial del centro de masa de las partículas corresponde a  $\vec{x}_{j,0}$  y  $\vec{x}_{i,0}$ , las velocidades angulares a  $\vec{\omega}_i$  y  $\vec{\omega}_j$  y las velocidades lineales se denotan  $\vec{v}_i$  y  $\vec{v}_j$ .

Las fuerzas de interacción entre las dos partículas están determinadas a partir de la distancia de penetración de una partícula en la otra, modelando de esta manera las fuerzas implicadas en la resistencia a la deformación en un caso real, por los efectos elásticos de la interacción y los efectos viscosos que se representan a continuación:

$$F = (k_n \delta_{n_{ij}} - c_n v_{n_{ij}}) + (k_t \delta_{t_{ij}} - c_t v_{t_{ij}}) \tag{Ecuación 11}$$

$k_n$  = rigidez del resorte normal.

$k_t$  = rigidez del resorte tangencial.

$c_n$  = coeficiente de amortiguación normal.

$c_t$  = coeficiente de amortiguación tangencial.

$\delta_{n_{ij}}$  = penetración en la dirección normal.

$\delta_{t_{ij}}$  = penetración en la dirección tangencial.

$v_{n_{ij}}$  = velocidad normal relativa.

$v_{t_{ij}}$  = velocidad tangencial relativa.

La fuerza total del contacto  $F$  se puede descomponer en la dirección normal y en la dirección tangencial, que corresponde a la dirección del movimiento relativo de una partícula respecto de otra. Estas ecuaciones se especifican en la investigación de Navarro y de Souza, 2013.

La rigidez y el coeficiente de amortiguación son obtenidos del modelo de contacto de H-M (Kloss, 2010) y se expresan mediante las siguientes ecuaciones.

Los cálculos de la fuerza normal se rigen por la Ecuación 12 y Ecuación 15 basados en el traslape normal:

$$k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R * \delta_{n_{ij}}} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$E$  = módulo de Young.

$E^*$  = módulo de Young equivalente.

$R^*$  = radio equivalente.

$R$  = radio de la partícula  $i$ .

Adicionalmente la fuerza de amortiguación normal se rige por la Ecuación 15:

$$c_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \geq 0 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$\beta$  = Coeficiente de restitución equivalente.

$m^*$  = masa equivalente.

$m$  = masa de la partícula.

$S_n$  = esfuerzo normal.

Los componentes normales de amortiguación vienen dados por:

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_{nij}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\beta = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde

$e$  = coeficiente de restitución.

La fuerza tangencial depende de la Ecuación 19 y Ecuación 21 basados en el traslape tangencial:

$$k_t = 8G^* \sqrt{R * \delta_{tij}} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2 - \nu_1)(1 - \nu_1)}{E_1} + \frac{2(2 - \nu_2)(1 - \nu_2)}{E_2} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$G^*$  = módulo de corte equivalente.

$\nu$  = relación de Poisson.

Adicionalmente la fuerza de amortiguación tangencial está compuesta por:

$$c_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \geq 0 \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

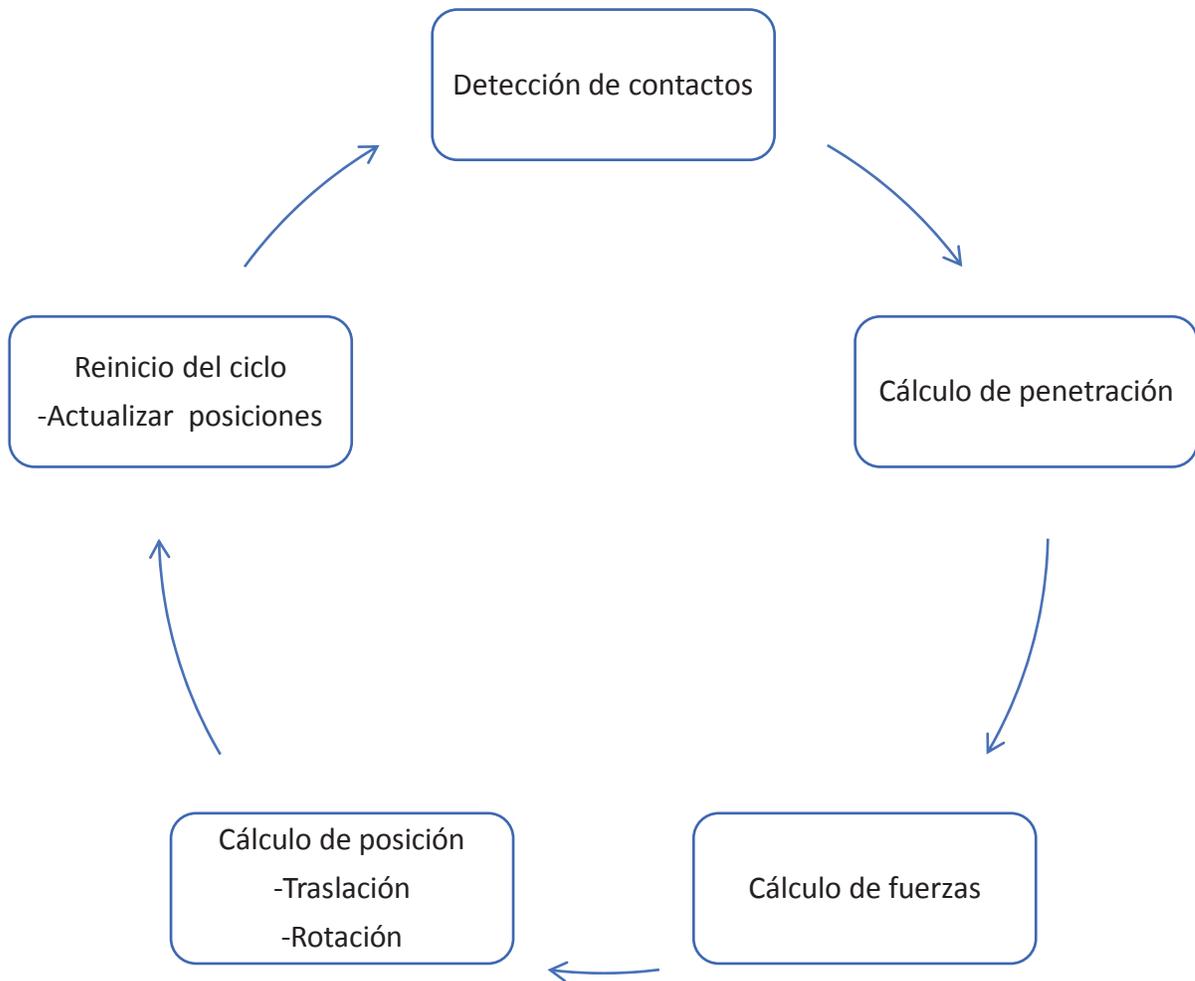
$S_t$  = esfuerzo de corte.

$$S_t = 8G^* \sqrt{R * \delta_{tij}} \quad \text{Ecuación 22}$$

En el modelo de contacto, todos los parámetros derivan de las propiedades de los materiales que son parte del sistema granular.

### 3.5. Ciclos de cálculo

En el proceso de cálculo, la Ley de fuerza-desplazamiento determina las fuerzas de interacción de las partículas y luego el efecto de estas fuerzas se determina a partir de la Segunda Ley de Newton. La posición de las partículas calculada se utiliza para determinar las nuevas fuerzas de interacción, repitiendo el ciclo para cada intervalo de tiempo.



*Figura 30: Ciclo del procesamiento computacional una simulación DEM.  
Fuente: Elaboración propia.*

El método de elementos discretos se lleva a cabo por programas de procesamiento computacional, para manejar la elevada cantidad de iteraciones requeridas en la simulación a través de algoritmos computacionales.

El software determina que dos partículas interactúan cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Las partículas se encuentran en el mismo cuadrante de cálculo.
- Las trayectorias de las partículas no sufren desviaciones por fuerzas externas.
- Cuando la distancia entre los centroides de cada partícula se hace equivalente a la suma de los radios de ambas ( $R_i$  y  $R_j$ ).

El impacto de dos partículas se observa en la Figura 29 con líneas segmentada cuando la distancia entre los centroides es equivalente a la suma de los radios  $R = R_i + R_j$ .

Una vez que las partículas entran en contacto se produce el traslape entre ellas, la distancia traslapada es equivalente a la deformación que sufre un resorte al ser comprimido. Este resorte ejerce una resistencia a la deformación equivalente a las propiedades intrínsecas del material de cada partícula, como se representa en la ecuación 12 y 15 mediante la ley de Hooke.

Las líneas sólidas muestran ambas partículas traslapadas, en esta situación la distancia  $R$  es menor a la suma de los radios de las partículas en contacto, produciendo en cada una de ellas un efecto distinto debido al radio de cada una.

Para todo lo anterior, se debe considerar la acción de otras fuerzas, impacto entre otras partículas o con su entorno, etc. Se debe considerar el efecto del roce, el cual genera una fuerza opuesta a la trayectoria de la partícula, alterando su aceleración y posición futura, se define en la siguiente expresión:

$$F_f = \mu * F_n \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

$F_f$  = fuerza de fricción.

$\mu$  = coeficiente de fricción.

$F_n$  = fuerza normal sobre el plano de impacto.

La energía potencial posterior al impacto es calculada mediante la Ecuación 24, mediante las propiedades del resorte:

$$E_p = \frac{k * \Delta\delta^2}{2}$$

El software antes de determinar las fuerzas de interacción, primero detecta las partículas que estén en contacto. La posición de cada partícula debe ser comprobada para saber si su radio está dentro de otra, por medio de algoritmos que limitan la cantidad de contactos bajo el supuesto de que solo las partículas cercanas a él en intervalo de tiempo anterior serán revisadas para el siguiente cálculo. Este método disminuye el tiempo de computo en la búsqueda de contactos de una partícula ya que solo se consideran los elementos cercanos a ella, sin embargo se estima que las aplicaciones DEM pasan el 90% del tiempo de cálculo en esta etapa (Ijurra Astudillo, 2016).

### 3.6. Ventajas y desventajas

#### 3.6.1. Ventajas

La capacidad de las simulaciones DEM permiten lograr lo siguiente:

- Análisis estático y dinámico de un sistema discreto (partículas o grupos de estas).
- Utilizar diferentes geometrías para cada partícula.
- Facilita la obtención de ciertos parámetros difíciles de obtener de manera experimental.
- Combinar con otros métodos de simulación que incluyan transferencias de calor, fluidos, etc.

#### 3.6.2. Desventajas

Las desventajas del DEM son las siguientes:

- El número máximo de partículas y duración de una simulación estará limitado por la capacidad computacional.
- Se necesitan estudios experimentales de calibración para determinar las propiedades de los materiales a analizar en cada simulación.
- Existen pocos softwares de manera gratuita para estudios académicos y estos requieren de un gran conocimiento en el área.

Su principal limitación, impide muchas veces utilizar parámetros similares a la realidad (por ejemplo, dar forma a las partículas, considerar partículas con tamaños pequeños y gran cantidad de estas), ya que esto implica computadoras con más tecnología. Provocando que la simulación sea inexacta y obligando a tener una calibración más minuciosa, para realizar una combinación adecuada de parámetros que representen la realidad.

#### 4. Software LIGGGHTS

Para desarrollar el estudio presentado, el software utilizado es LIGGGHTS (significado de sus siglas en inglés LAMMPS<sup>2</sup> improved for general granular and granular heat transfer simulations), programa de código libre diseñado para realizar simulaciones de partículas mediante DEM.

Las principales características del software en su versión LIGGGHTS-PUBLIC son:

- Se pueden aplicar modelos de partículas de geometrías irregulares no esféricas.
- Se pueden aplicar partículas compuestas con capacidad de fractura.
- Incorpora modelos de desgaste y roce de rodadura en las partículas esféricas.
- Cuenta con información detallada completa que especifican sus ecuaciones, modelos de contacto y ejemplos prácticos.
- Incorpora el cálculo en paralelo de uno o varios procesadores a través de MPI.
- Posee sintaxis propia para definir variables, fórmulas y funciones de cálculo.
- Se pueden insertar partículas en geometrías o planos definidos por el usuario.
- Se puede utilizar diferente distribución de partículas.

Las etapas de una simulación en LIGGGHTS comienzan con el ingreso de datos mediante un archivo de texto que es elaborado por el usuario, por lo que se debe conocer funciones predefinidas del lenguaje para formar un código de simulación. Estas características brindan al usuario cierta libertad en la simulación para desarrollar mayor precisión y eficiencia computacional exigiendo competencias profesionales específicas en el ámbito computacional.

Para iniciar la simulación, se debe ejecutar este archivo con los parámetros de entrada con el programa LIGGGHTS.

Luego para visualizar y analizar los parámetros de salida se debe utilizar un programa complementario, que puede generar imágenes, videos y análisis matemático de la información. Este estudio es trabajado por un programa de visualización universal que posee variadas

---

<sup>2</sup> LAMMPS es el software antecesor de LIGGGHTS, más información en su sitio web <http://lammps.sandia.go>.

funciones que permiten el análisis de los datos de salida. Continuando la misma línea de la simulación por medio de software libres se utiliza el software ParaView<sup>3</sup>.

LIGGGHTS calcula el movimiento de las partículas en un sistema integrando las ecuaciones de Newton para un instante de tiempo, para determinar la posición de las partículas involucradas. Cada posición se registra temporalmente para ser utilizada como condición inicial para el siguiente paso de tiempo, descrito en los capítulos anteriores.

El software utiliza un algoritmo que permite obtener las fuerzas de interacción, una vez obtenidas se procede a la integración de las ecuaciones de movimiento y se entregan nuevas posiciones en un proceso iterativo realizado en cada paso de tiempo de la simulación representado en la Figura 30. Se recomienda el uso del modelo de contacto de Hertz para sistemas granulares.

En el proceso de cálculo de la posición de las partículas, se aplica la integración de las ecuaciones de movimiento, la cual converge en función de las condiciones iniciales del problema y el tiempo entre iteraciones (time-step). Esto es determinante ya que influye directamente en los resultados generados en el siguiente paso de tiempo.

El tiempo entre iteraciones al ser aumentado en la simulación describe un movimiento de las partículas irregulares, lo que provoca que el método genere resultados incorrectos.

---

<sup>3</sup> ParaView es un software de visualización y análisis de datos de fuente abierta y multiplataforma.

#### 4.1. Parámetros considerados en DEM

Las propiedades del mineral y materiales con los que interactúa, definen el comportamiento del flujo de partículas. En el caso de LIGGGHTS se presentan las propiedades y parámetros que definen el comportamiento a simular para el mineral y su entorno:

- Módulo de Young.
- Coeficiente de Poisson.
- Coeficiente de restitución.
- Coeficiente de fricción
- Coeficiente de resistencia a la rodadura.
- Parámetros de desgaste.

##### 4.1.1. Módulo de Young

Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, lineal e isótropo según la dirección en la que se aplica una fuerza. Para este material el módulo de Young es una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda el límite elástico. En materiales anisótropos no tiene valores constantes definiendo varios módulos de elasticidad y en los materiales elásticos no lineales dicho módulo no es constante y se puede definir algún tipo de módulo de Young aparente.

Para un material isótropo elástico lineal el módulo de Young está relacionado con la tensión y la deformación mediante la relación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde

$E$  = módulo de Young.

$\sigma$  = tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento.

$\varepsilon$  = deformación unitaria.

#### 4.1.2. Coeficiente de Poisson

Es una constante elástica que define todo elemento expuesto a carga axial experimenta una deformación no solo en el sentido del eje expuesto, sino también en el eje perpendicular, es decir, cuando se estira longitudinalmente, se adelgaza en las direcciones perpendiculares al estiramiento.

El coeficiente de Poisson mide la relación de la deformación perpendicular a la axial, considerando un cuerpo isótropo se tiene:

$$v = \frac{\varepsilon_{perp}}{\varepsilon_{axial}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde

$v$  = coeficiente de Poisson.

$\varepsilon_{perp}$  = deformación perpendicular.

$\varepsilon_{axial}$  = deformación axial.

#### 4.1.3. Coeficiente de restitución

El coeficiente de restitución es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas. Se define como el módulo del cociente entre las velocidades relativas antes y después del choque.

En una colisión los cuerpos sufren deformaciones liberando energía en forma de calor, la capacidad para que un cuerpo recobre su forma inicial después de un choque, da cuenta de su elasticidad. Dependiendo del material del cuerpo el coeficiente de restitución puede tomar valores entre 0 (perfectamente inelástico) y 1 (perfectamente elástico).

$$e = -\frac{V_{1f} - V_{2f}}{V_{1i} - V_{2i}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

$e$  = coeficiente de restitución.

$V_{1f}$  = velocidad elemento 1 después del choque.

$V_{2f}$  = velocidad elemento 2 después del choque.

$V_{1i}$  = velocidad elemento 1 antes del choque.

$V_{2i}$  = velocidad elemento 2 antes del choque.

#### 4.1.4. Coeficiente de fricción

Es la fuerza resistente que actúa sobre dos cuerpos en contacto, impidiendo el deslizamiento de uno sobre la superficie del otro. Esta fuerza depende de cada par de materiales en contacto y de otros factores como la temperatura, acabado superficial, la velocidad relativa entre las superficies, etc. Cuando las superficies son puestas en contacto el movimiento una respecto de la otra genera fricción que depende del coeficiente de fricción dinámico.

El límite de fricción de Coulomb dice que la fuerza tangencial máxima viene limitada por el producto entre la fuerza normal y el coeficiente de roce.

$$f_t = \mu f_n$$

*Ecuación 28*

Donde:

$f_t$  = fuerza tangencial.

$\mu$  = coeficiente de fricción.

$f_n$  = fuerza normal.

Este coeficiente contribuirá el grado de irregularidad geométrica, presente en los cuerpos que interactúan durante la simulación.

#### 4.1.5. Intervalo de tiempo (Time-step)

A pesar de no ser un parámetro relacionado con las propiedades del material, el time-step es un parámetro importante dentro de la simulación, que es afectado por estas. Mientras más pequeño sea el paso de tiempo, mayor será la precisión en la determinación de los contactos y en el ciclo de cálculo. Sin embargo, una disminución en el intervalo de tiempo implica también un incremento en el tiempo de cálculo computacional.

La determinación del paso de tiempo es evaluada por el tiempo de transmisión de Rayleigh<sup>4</sup> y el tiempo de Hertz. Se recomienda que el time-step no exceda en un 20% el tiempo de Rayleigh para que la simulación presente un buen comportamiento (citado por Ahues & González, 2014).

El tiempo de transmisión Rayleigh deriva de la propagación de ondas de Rayleigh a través de la superficie de las partículas.

El tiempo de transferencia de las ondas de Rayleigh se expresa como:

$$T_r = \pi R \frac{\sqrt{\frac{\rho}{G}}}{(0,1632\nu + 0,8766)} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde

$R$  = radio de la partícula.

$\rho$  = densidad de la partícula.

$G$  = módulo de corte de la partícula.

$\nu$  = coeficiente de Poisson

El tiempo de Hertz se determina mediante la siguiente expresión:

$$T_h = 2,87 \frac{m^{*2}}{(R^*Y^*v_{max})^{0,2}} \quad \text{Ecuación 30}$$

---

<sup>4</sup> Método de Rayleigh Ritz se emplea para determinar las frecuencias naturales de un sistema.

Donde:

$m^*$  = masa efectiva.

$R^*$  = radio efectivo.

$Y^*$  = módulo de Young efectivo.

$v_{max}$  = velocidad máxima relativa entre partículas.

Estas variables permiten evaluar el time-step seleccionado y proporcionar exactitud en los resultados cuantitativos y cualitativos.

#### 4.1.6. Parámetros de desgaste

Para el estudio del desgaste se utiliza el modelo de Finnie, modelo matemático aplicado al desgaste en el revestimiento de un punto de transferencia. El desgaste es analizado visualmente, a través de una representación gráfica de datos. A su vez, se realiza un análisis cuantitativo que aplica la comparación de los parámetros de desgaste registrados en terreno, para la estimación total de desgaste del revestimiento del chute. Esta lógica de consideración Figura 31 determina de qué forma se validan los resultados de desgaste verdadero.

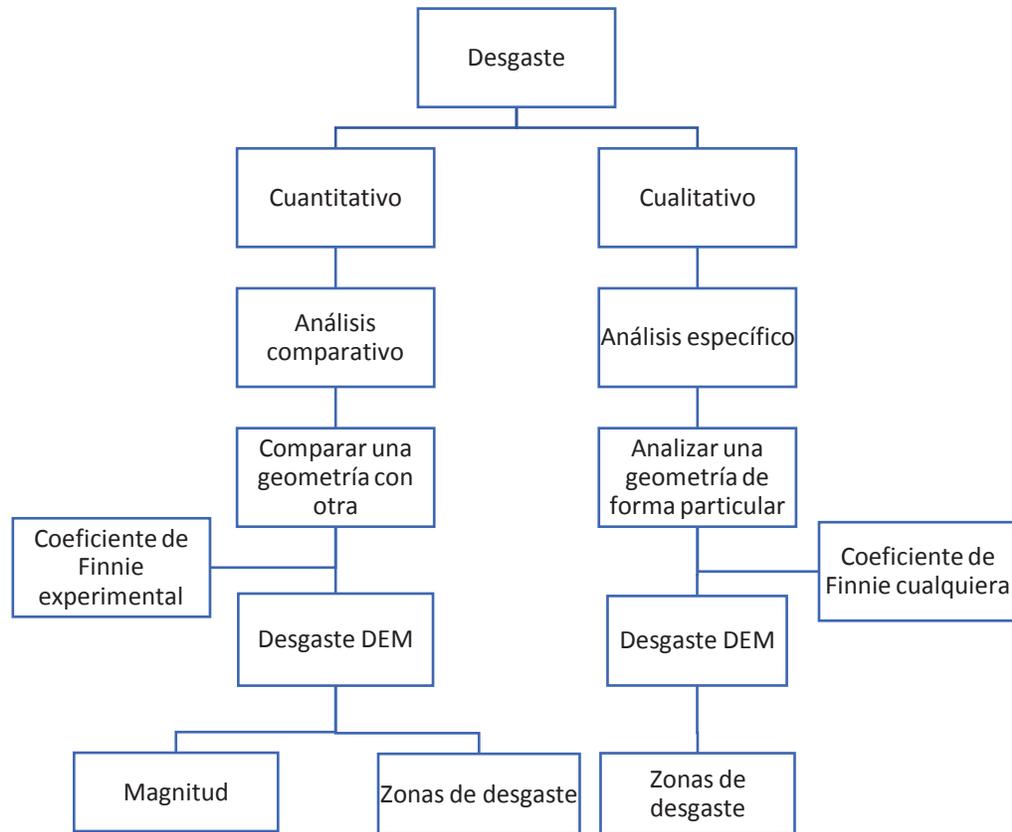


Figura 31: Lógica de consideración.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.6.1. Modelo de Finnie

El modelo de desgaste de Finnie para desgaste erosivo (Finnie, 1960) relaciona el desgaste de una superficie con la energía cinética de la partícula que la impacta. Su formulación es la siguiente:

$$E_A = kv_p^2 f(y) \tag{Ecuación 31}$$

Donde:

$E_A$  = Razón entre la masa desgastada y la masa inicial del cuerpo (adimensional).

$v_p$  = Velocidad de la partícula que impacta la superficie.

$k$  = constante denominada coeficiente de Finnie.

$f(y)$  = función adimensional del ángulo que existe entre la superficie y la trayectoria de la partícula justo antes de impactar.

$$f(y) = \frac{1}{3} \cos^2(y) \quad \text{sitan}(y) > \frac{1}{3}$$

$$f(y) = \sin(2y) - 3 \sin^2(y) \quad \text{sitan}(y) < \frac{1}{3}$$

Esta formulación es válida para esferas de cuerpo rígido (HS = hard sphere). Cuando se aplica en conjunto un seguimiento Lagrangiano de partículas representados por un flujo másico de  $\dot{m}$ , la masa erosionada  $EM$  en kg durante un paso de tiempo  $\Delta t$  resulta:

$$EM_{HS} = E_A \dot{m} \Delta t \quad \text{Ecuación 32}$$

Ahora se adapta el modelo para ser usado en el marco de las esferas blandas (SS: Smooth Sphere). Dado que este modelo resuelve el contacto entre la partícula y la superficie para múltiples pasos de tiempo en lugar de un paso, se propone la siguiente relación para la masa erosionada causada por una partícula durante el contacto entre partícula y superficie se expresa como:

$$EM_{SS} = \int_0^{t_c} e \, dt m_p \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de contacto,  $m_p$  es la masa de la partícula y  $e$  es la derivada temporal de la masa adimensional  $E_A$ , esto es:

$$e = \frac{dE_A}{dt} = \frac{dE_A}{dv_p} \frac{dv_p}{dt} + \frac{dE_A}{dy} \frac{dy}{dt} \quad \text{Ecuación 34}$$

Dado que  $\frac{dv_p}{dt}$  es influyente en la igualdad anterior y el seguimiento  $\frac{dy}{dt}$  sería computacionalmente tedioso, se asume que  $\frac{dy}{dt} \approx 0$ . Por lo tanto, se obtiene la aproximación:

$$e \approx \frac{dE_A}{dv_p} \frac{dv_p}{dt} = \frac{2E_A}{v_p} \frac{f_c}{m_p} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde  $f_c$  es la fuerza de contacto entre partícula y superficie. Suponiendo que el desgaste ocurre durante el contacto y no durante la repulsión. Se postula que  $e = 0$  para  $\vec{v}_p \cdot \vec{c} < 0$ , donde  $\vec{c}$  es el vector dirección que va desde el centro de la partícula hacia el punto de contacto. A continuación, se presenta el modelo para determinar la masa erosionada:

$$EM_{SS} = 2k \int_0^{t_c} hs(\vec{v}_p \cdot \vec{c}) v_p f(y) f_c dt \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde  $EM_{SS}$  es la masa erosionada en kg durante el tiempo de contacto  $t_c$  y  $hs$  es la función de Heaviside. La constante  $k$  denominada coeficiente de Finnie se obtiene a través de pruebas experimentales y depende de las características de los materiales involucrados para cada caso. Utilizando este método con un indicador cuantitativo de los efectos del desgaste en la superficie del chute, se determina un valor de  $k$  con los datos obtenidos en terreno, con el propósito de comparar los valores registrados en terreno con las nuevas geometrías y permitir a los valores obtenidos de desgaste ser ajustados de manera posterior y con los cuales se pondera el valor de masa erosionada.

## 5. Modelación mediante DEM

### 5.1. Configuración de los archivos de entrada

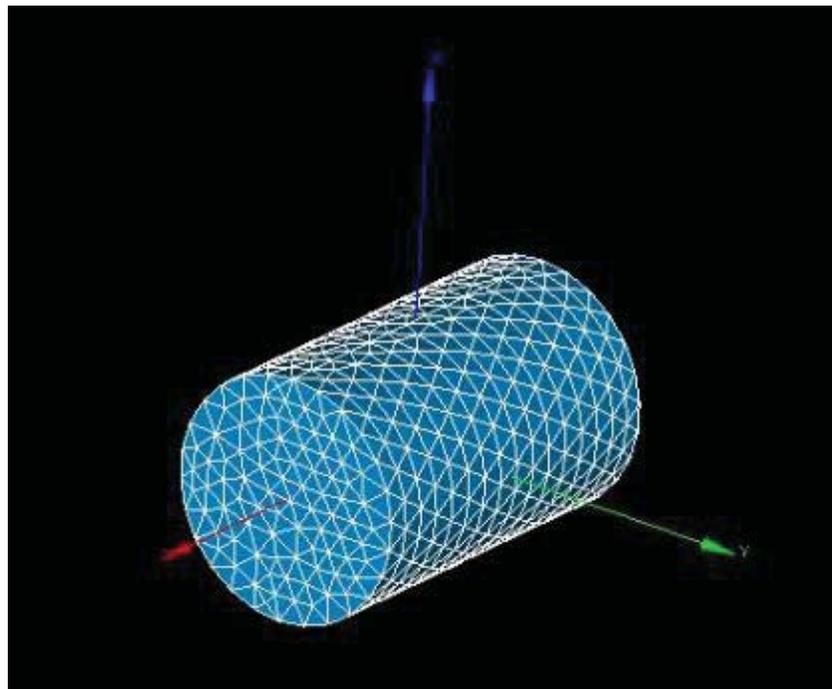
El software LIGGGHTS no posee una interfaz gráfica para el usuario y su funcionamiento es mediante un archivo con los datos de entrada o script que contiene los datos necesarios para la simulación. Se presenta la estructura general de este archivo:

- Inicialización de parámetros: se determina el tipo de modelo de partícula, se define como se identifican los átomos para modificar sus propiedades, los límites espaciales de la simulación, el sistema de unidades, la geometría física de la simulación, se debe especificar la cantidad de materiales utilizados, se definen las listas de átomos vecinos que pueden entrar en contacto, el uso de los procesadores y se determina el paso de tiempo.
- Propiedades de los materiales: se determinan las propiedades del material que se aplican a los cuerpos especificados y se especifican las ecuaciones utilizadas en la interacción entre elementos.
- Definición de cuerpos: se determinan las mallas importadas a partir de los archivos CAD y se les asignan sus propiedades definidas anteriormente, se definen los cuerpos con movimiento y se determinan los cuerpos para la medición de parámetros.
- Distribución de las partículas: se definen las características de las partículas y su distribución. Además, se configura la inserción de un flujo de partículas, su intervalo de tiempo, el flujo másico y la velocidad con que son insertadas.
- Cálculos y parámetros de salida: Se integran las ecuaciones de movimiento, se calcula la energía cinética, se seleccionan los parámetros que se desean ver impresos en consola. Se ejecuta la simulación con la inserción de partículas ya definida y se guarda la información de la simulación en archivos de texto. Estos

posteriormente deben convertirse en archivos de extensión “VTK” para ser analizados visualmente en el programa ParaView.

### 5.2. Implementación de geometrías en LIGGGHTS

Para la implementación de geometrías el software permite la importación de archivos de extensión STL (STereo Lithography por sus siglas en inglés), que utiliza una malla de triángulos para definir la forma del elemento. Por medio del software Salomé se modela la geometría CAD generando este archivo STL como se muestra en la Figura 32.



*Figura 32: Mallado del tambor en software Salomé.  
Fuente: Elaboración propia.*

### 5.3. Parámetros de simulación y análisis de sensibilidad

Para esta simulación se determinan los parámetros que considera el programa LIGGGHTS. Los parámetros estudiados principalmente son la distribución granulométrica del material y las

propiedades físicas de los materiales que interactúan en la simulación, definidos en el capítulo 2.3.

### 5.3.1. Granulometría y distribución de partículas

Se definen las partículas de mineral de cobre en etapa de chancado primario por medio de la distribución granulométrica en el Gráfico 1. El tamaño máximo de partícula es de 6 pulgadas de diámetro, sin embargo, un valor más representativo de la muestra es 2.25 pulgadas. El 80% del mineral está bajo 2,25 pulgadas y es notorio que las partículas grandes existen, pero son pocas.

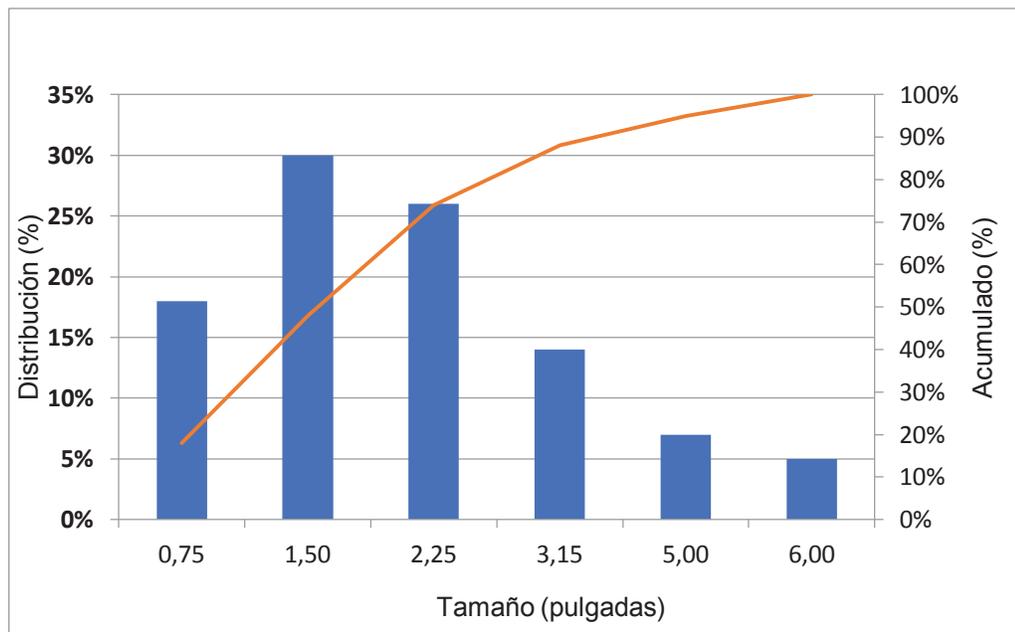


Gráfico 1: Distribución granulométrica del mineral.  
Fuente: Cinética Ingeniería.

### 5.3.2. Condiciones operacionales

El análisis considera equipos, para los cuales se definen sus condiciones de operación en la Tabla 1.

Velocidad de la correa $V_{in}$	1,6 $\left[\frac{m}{s}\right]$
Velocidad de giro del tambor $w_{tam}$	50,3 [rpm]
Altura de cama de material en correa $h_{mat}$	165 [mm]
Flujo de material $Q$	600 [TPH]

Tabla 1: Condiciones de operación de la correa de alimentación CV-1.  
Fuente: Elaboración propia.

Se debe considerar movimiento lineal con una velocidad constante para la correa alimentadora y un movimiento de rotación con una velocidad angular constante para el tambor de la misma.

### 5.3.3. Propiedades físicas del material y revestimientos

Se definen los materiales implicados en el estudio del punto de transferencia actual y sus propiedades:

- Correa transportadora: goma.
- Mineral transportado: cobre.
- Estructura del chute: acero.
- Revestimiento en placa de impacto: goma.

Materiales	Propiedades		
	Módulo de Young [Pa]	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Coefficiente de Poisson [-]
Cobre	$5 \cdot 10^6$	2900	0,25
Acero	$2,2 \cdot 10^7$	7800	0,27
Goma (correa)	$2,2 \cdot 10^8$	950	0,45
Goma (revestimiento)	$2,2 \cdot 10^8$	1600	0,3

Tabla 2: Propiedades de los materiales..  
Fuente: elaboración propia.

Contacto	Coefficiente de restitución	Coefficiente de fricción
Mineral-Mineral	0,19	2
Acero-Mineral	0,2	0,1
Goma (correa)-Mineral	0,18	0,1
Goma-Mineral	0,19	0,1

Tabla 3: Parámetros de los materiales..  
Fuente: Elaboración propia.

Los valores presentados fueron antecedentes entregados por Cinética Ingeniería. Estos valores además fueron sensibilizados por un proceso iterativo donde se realizaron distintas pruebas hasta obtener los valores adecuados cualitativos que reflejarán un comportamiento realista de la interacción entre las partículas y estas con su entorno. Se considera que estos valores fueron determinados utilizando el radio medio de las partículas y velocidades medias en simulaciones experimentales por la empresa.

Se observa que la modificación del coeficiente de restitución altera de manera despreciable los resultados del estudio, de acuerdo a la comparación realizada entre simulaciones.

Las propiedades y parámetros de la Tabla 2 y Tabla 3 permanecen constantes para todas las simulaciones del caso actual y su rediseño.

Para este estudio no se consideran los efectos de la humedad sobre los cuerpos, debido a que no afecta al mineral estudiado para este caso.

#### 5.3.4. Variables del pre-proceso

El paso de tiempo es uno de los parámetros que permite saber si se ha efectuado de manera adecuada la simulación, definido en el capítulo 2.3.5. Para comprobar el programa LIGGGHTS utiliza el tiempo de Rayleigh con la Ecuación 29 y de Hertz con la Ecuación 30.

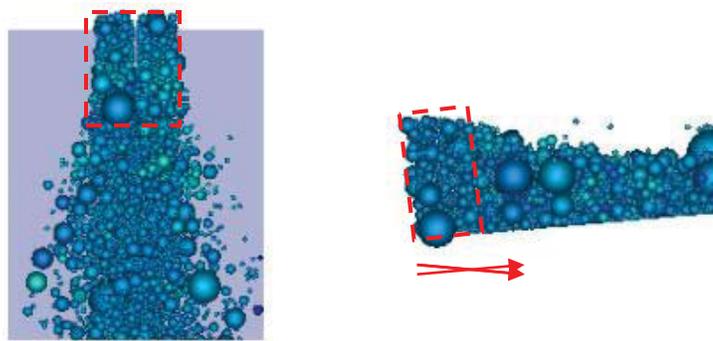
Tiempo de Rayleigh[s]	0,0028
Tiempo de Hertz[s]	0,0039
Paso de tiempo[s]	0,00001

*Figura 33: Parámetros de la simulación.  
Fuente: Elaboración propia.*

Estos dos parámetros permitieron corroborar que el paso de tiempo definido es correcto y no genera resultados erróneos ya que para el tiempo de Rayleigh es del 3,37%, mientras que el tiempo de Hertz es menor al 5%.

#### 5.4. Proceso de Simulación y Post-proceso

Las simulaciones efectuadas en este estudio serán con las mismas condiciones de operación y computacionales en las distintas geometrías. La carga de material será insertada en forma rectangular sobre la correa de alimentación desde su parte posterior, como se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



*Figura 34: Inserción de partículas.  
Fuente: Elaboración propia.*

La correa de alimentación tiene un largo adecuado para que el flujo de material se estabilice luego de su inserción y posteriormente comience a caer al interior del chute. El flujo de material irá ingresando hasta que se estabilice la masa de ingreso al interior del chute con la masa de salida.

Los parámetros obtenidos en cada estudio son entregados a través de archivos de texto, los cuales a través de un post- proceso deben ser visualizados y analizados por ParaView. Los parámetros de salida en cada simulación son los que se describen a continuación:

- Flujo másico a la entrada y salida del punto de transferencia.
- Posición de las partículas.
- Cuento de partículas.
- Velocidad de las partículas.
- Fuerzas de interacción de las partículas.
- Desgaste del revestimiento y paredes del punto de transferencia.

## 6. Simulación en LIGGGHTS

Las simulaciones de este trabajo consideran, una comprobación del software por medio de una investigación desarrollada en laboratorio, con motivo de validar el correcto funcionamiento del programa LIGGGHTS se comparan las fuerzas y velocidades obtenidas por un software comercial denominado EDEM con respecto a un punto de transferencia, su desarrollo se encuentra en el anexo.

En base a los procedimientos implementados en esta investigación se realizan las simulaciones del caso de estudio actual.

### 6.1. Diseño de un punto de transferencia para situación actual

Con el objetivo de analizar la influencia del desgaste en la geometría actual y el comportamiento del mineral, se simuló en esta primera etapa el punto de transferencia PT-1 con sus parámetros actuales de funcionamiento.

Esta simulación describe cuantitativa y cualitativamente los parámetros de estudio, por medio de la lógica de consideración presentada en el capítulo 2.3.6.

#### 6.1.1. Descripción del problema

Este trabajo se centra en un punto de transferencia que transporta mineral de cobre en etapa de chancado primario, desde la correa principal CV-1 al stacker ST-1 que transportan el mineral hacia zonas de apilamiento experimentando alto desgaste al interior del chute.

Se presenta un registro por parte de la operación minera al personal de Cinética Ingeniería para generar un análisis comparativo del punto de transferencia actual y obtener resultados cuantitativos reales del desgaste que afecte a una nueva geometría.

<b>Datos</b>	<b>Chancado Primario</b>	<b>Unidades</b>
Espesor de placas de desgaste	13	mm
Recambio de placas de desgaste	3a 4	meses
Diámetro máximo de material	6	in
Tasa desgaste 3 meses	52	mm/año
Tasa desgaste 4 meses	37	mm/año

*Tabla 4: Datos de referencia punto de transferencia actual, para análisis DEM.  
Fuente: Elaboración propia.*

En este punto se desarrollan diferentes variables que afectan el sistema productivo, provocando desgaste acelerado en los revestimientos del chute. Las variables involucradas son la geometría del chute, el material, tipo y forma del revestimiento, variaciones de velocidad de la correa transportadora, etc.

Este problema puede provocar fallas en la placa de desgaste y hasta la rotura del chute, generando paradas no planificadas, si el sistema de mantenimiento no es predictivo. Con el motivo de aportar a esta estrategia de mantenimiento, se entrega información cuantitativa con el fin de programar los trabajos de esta área, antes que ocurran fallas o eventos críticos, evitando paradas no deseadas.

#### 6.1.2. Implementación computacional

Se presenta un levantamiento de información entregada por la operación minera, para establecer la geometría actual.

##### 6.1.2.1. Modelo geométrico actual

Para realizar las simulaciones se simplifica el modelo geométrico real y se establecen un modelo computacional CAD con los distintos elementos mecánicos y partes del punto de transferencia que interactúan con el material. Los componentes estudiados del punto de transferencia actual se identifican en la Figura 35 y Figura 36:

1. Correa transportadora de alimentación del mineral.
2. Tambor donde la correa transportadora se mueve.
3. Placa de impacto al interior del chute.

4. Estructura metálica del chute que conduce el material hacia la correa transportadora de carga.

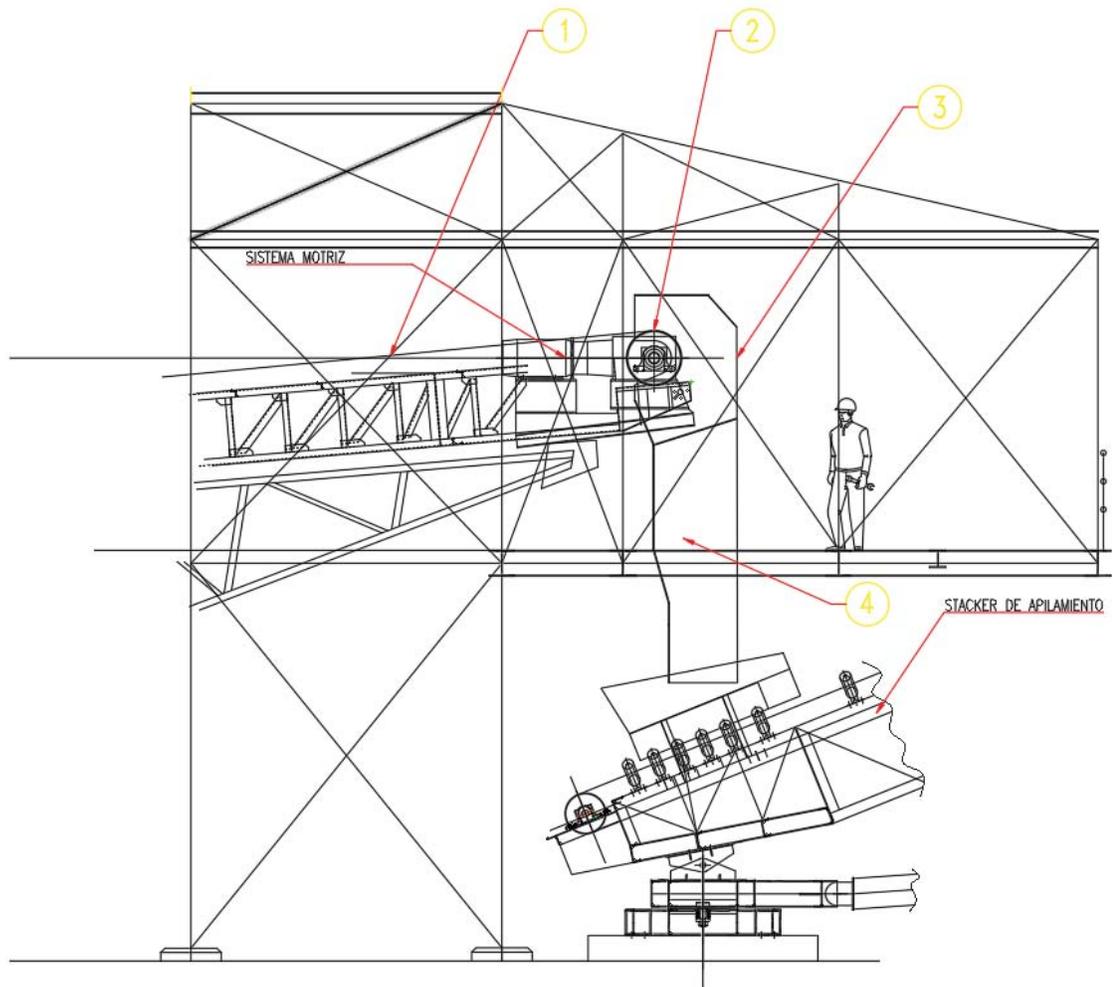
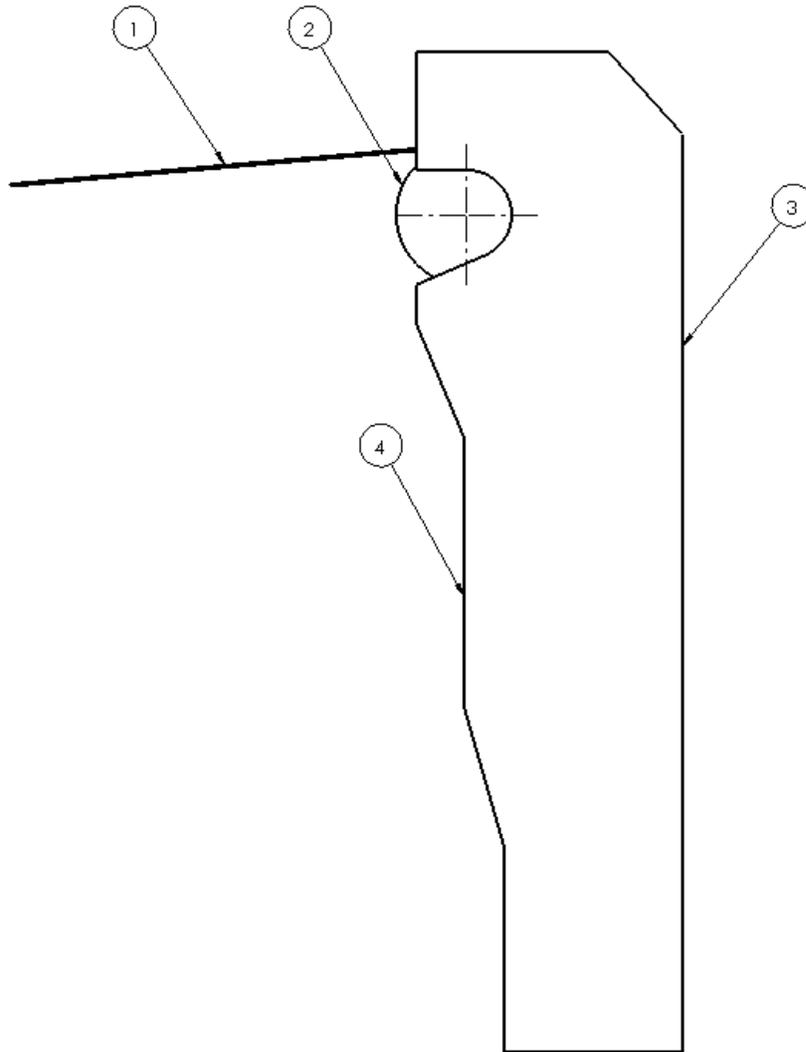


Figura 35: Esquema del punto de transferencia actual.  
Fuente: Cinética Ingeniería.



*Figura 36: Modelo geométrico computacional del punto de transferencia actual y sus componentes.  
Fuente: Elaboración propia.*

A continuación se presenta las dimensiones del punto de transferencia actual en las Figura 37 y Figura 38, las cuales determinan el modelo geométrico de la Figura 39 para la simulación del caso.

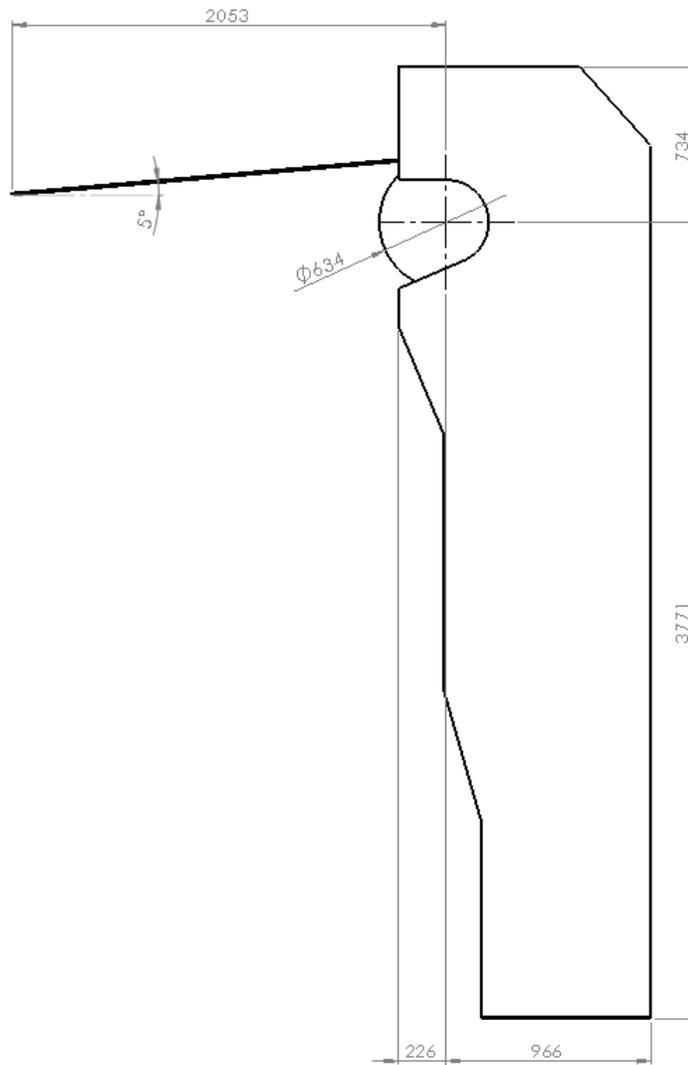


Figura 37: Dimensiones del modelo geométrico actual, vista lateral (milímetros).  
Fuente: Elaboración propia.

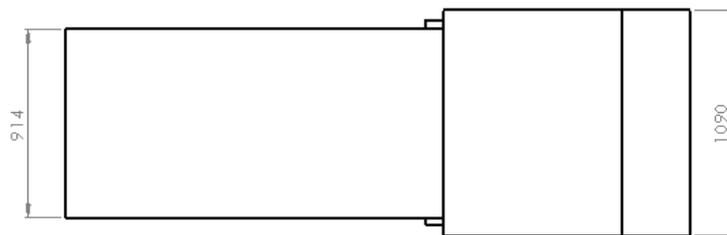


Figura 38: Dimensiones del modelo geométrico actual, vista superior (milímetros).  
Fuente: Elaboración propia.

Las geometrías CAD fueron desarrolladas en el software Salome. Estas geometrías se modelaron por partes (correa, tambor, chute, placa, etc.) para posteriormente ser malladas cada una de ellas en el mismo programa. Mediante el formato “.stl” las mallas son ingresadas al programa LIGGGHTS en donde se le asignan las propiedades y características a cada material.

#### 6.1.2.2. Desarrollo

Se captura un periodo de transporte de mineral, iniciándose con la alimentación del mineral desde la correa transportadora CV-1 hasta la estabilización del flujo de mineral en la salida del chute. Al interior del punto de transferencia, se encuentra la placa de impacto, la cual interactúa con el mineral, descargándolo hacia la salida. Se analizan los efectos del impacto de mineral en las paredes internas del chute y se visualiza el comportamiento del mineral.

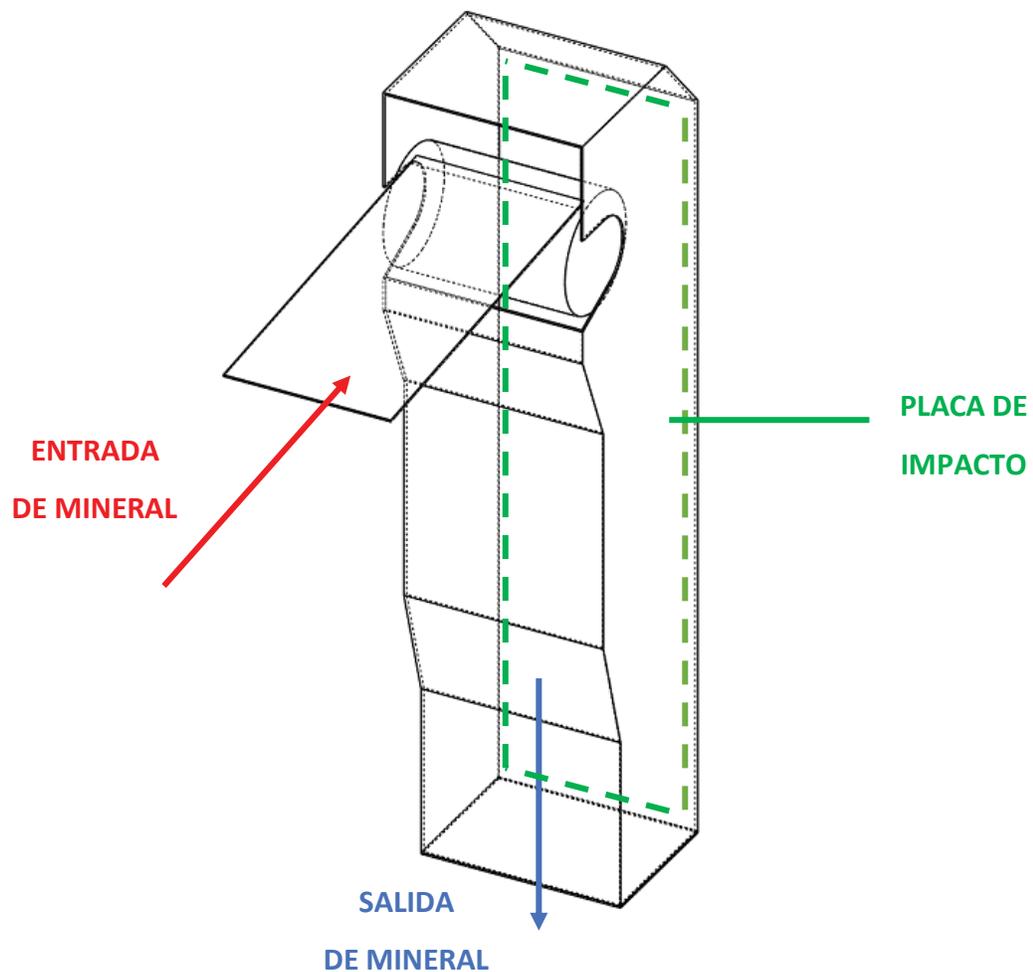


Figura 39: Modelo geométrico y condiciones de operación para análisis DEM del chute.  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.3. Presentación y análisis de resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales para el periodo analizado.

#### 6.1.3.1. Monitoreo de flujo másico

Inicialmente se monitorea la cantidad de mineral que pasa a través del área de control en la salida. Con el flujo másico registrado, se analiza el flujo teórico transportado y se verifica la continuidad del flujo de partículas en la transferencia y que no existan derrames o pérdidas de material al ingresar el material al chute. El Gráfico 2 entrega los valores registrados por el monitor a la salida del chute durante los 60 segundos que dura la simulación.

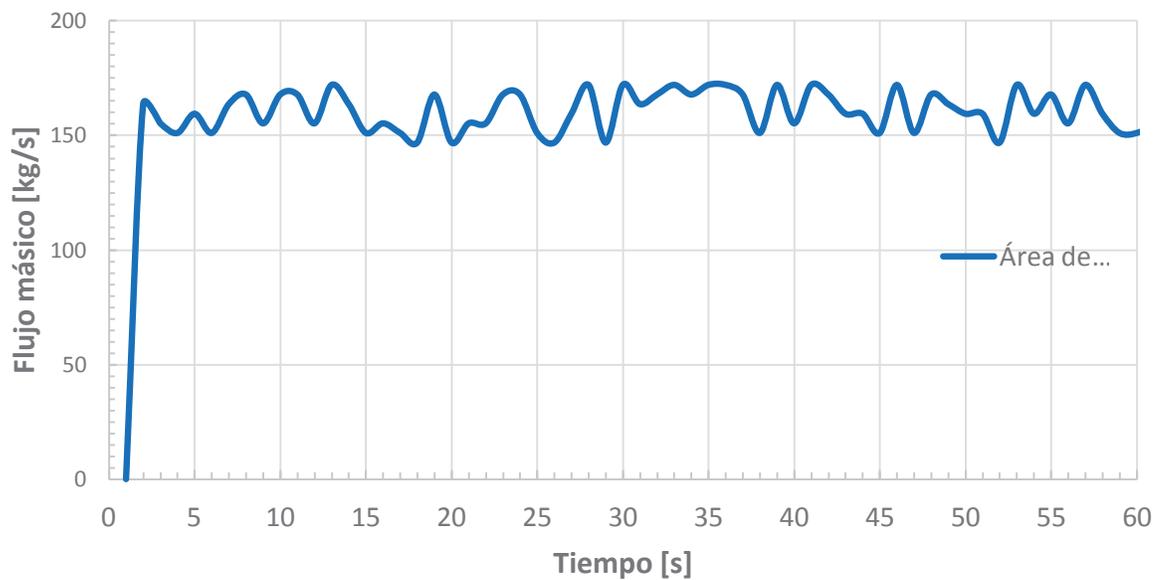


Gráfico 2: Área de control flujo másico en la salida del chute actual.  
Fuente: Elaboración propia.

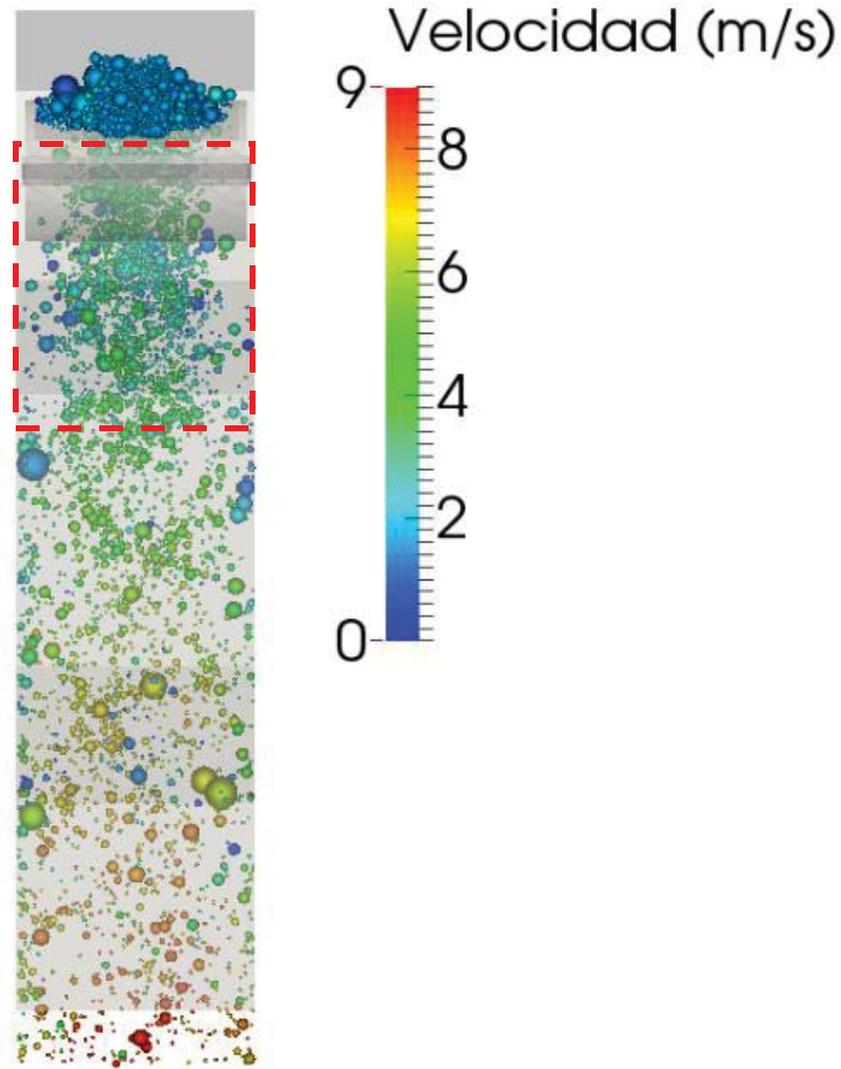
En el Gráfico 2 se puede observar que la curva presenta un valor de  $0 \left[ \frac{kg}{s} \right]$  hasta los  $2,4[s]$ , debido que el material debe recorrer la correa transportadora y caer hasta la salida del chute. Entre los  $2,4$  y los  $60[s]$ , el flujo se estabiliza con un promedio correspondiente a  $165,97 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ , determinando de esta manera el flujo másico real que transporta el sistema.

Según los antecedentes se debe obtener un flujo másico de  $166,7 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ . La diferencia de flujo másico entre el DEM y los antecedentes presentados en el capítulo 3.3.2 es menor a 1%, la que puede atribuirse a la propia metodología numérica, la incertidumbre de las propiedades, granulometría y forma del material.

#### 6.1.3.2. Resultados comportamiento del material

Se analizaron los efectos de proyección de material producido por el impacto del mineral sobre la placa de desgaste, identificando el área de impacto y proyección de partículas hacia diferentes paredes interiores, debido al flujo en caída libre del material. Los resultados son presentados en distribución de policromáticas, donde el color rojo representa el mayor valor alcanzado y el color azul el menor, para magnitud de velocidad de flujo.

En la Figura 40 se presenta una vista frontal del chute. En la imagen es posible observar que la totalidad del mineral impacta sobre un área reducida de la placa de impacto a una velocidad cercana a los  $4 \left( \frac{m}{s} \right)$ , posteriormente descargado hacia la salida del chute, aumentando considerablemente su velocidad a  $9 \left( \frac{m}{s} \right)$  aproximadamente. También ilustra la proyección de mineral hacia las paredes laterales al interior del chute sin revestimientos, implicando nuevas superficies de desgaste.



*Figura 40: Caída libre de material al interior del chute actual. Vista frontal.  
Fuente: Elaboración propia.*

La Figura 41 muestra la descarga de mineral desde la correa hacia el chute en vista lateral. Se observa que el mineral impacta un área determinada de la placa de impacto. Es adecuado que el revestimiento seleccionado cubra esta área, ya que en funcionamiento la totalidad del material descargado impacta esta zona.

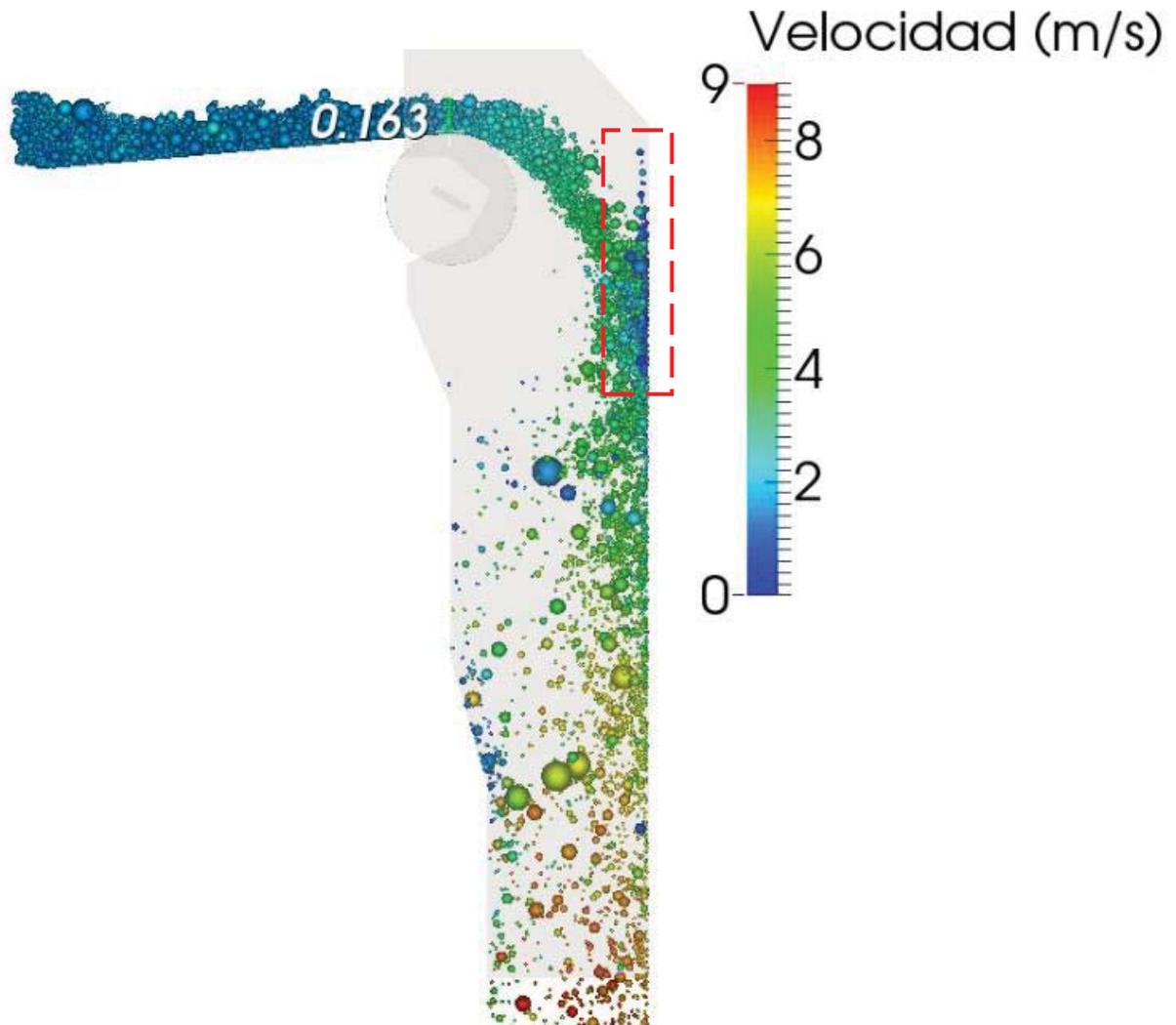


Figura 41: Caída libre de material al interior del chute actual. Vista lateral.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 41 se muestra la distribución de la cama de material sobre la correa transportadora, visualmente es posible notar que la altura de la cama es mayor en el inicio, luego la altura se estabiliza en los instantes posteriores debido a que las partículas se acomodan en toda el área disponible de la correa. Esta altura de 163 (mm) se corrobora con la registrada en terreno, ver Tabla 1.

El índice de desgaste (variable porcentual de desgaste) sobre el revestimiento del chute depende del ángulo de impacto del material sobre la placa de desgaste, y del tipo de

revestimiento utilizado. En la Figura 42 se muestra la dependencia anteriormente señalada y su comparación con el caucho.

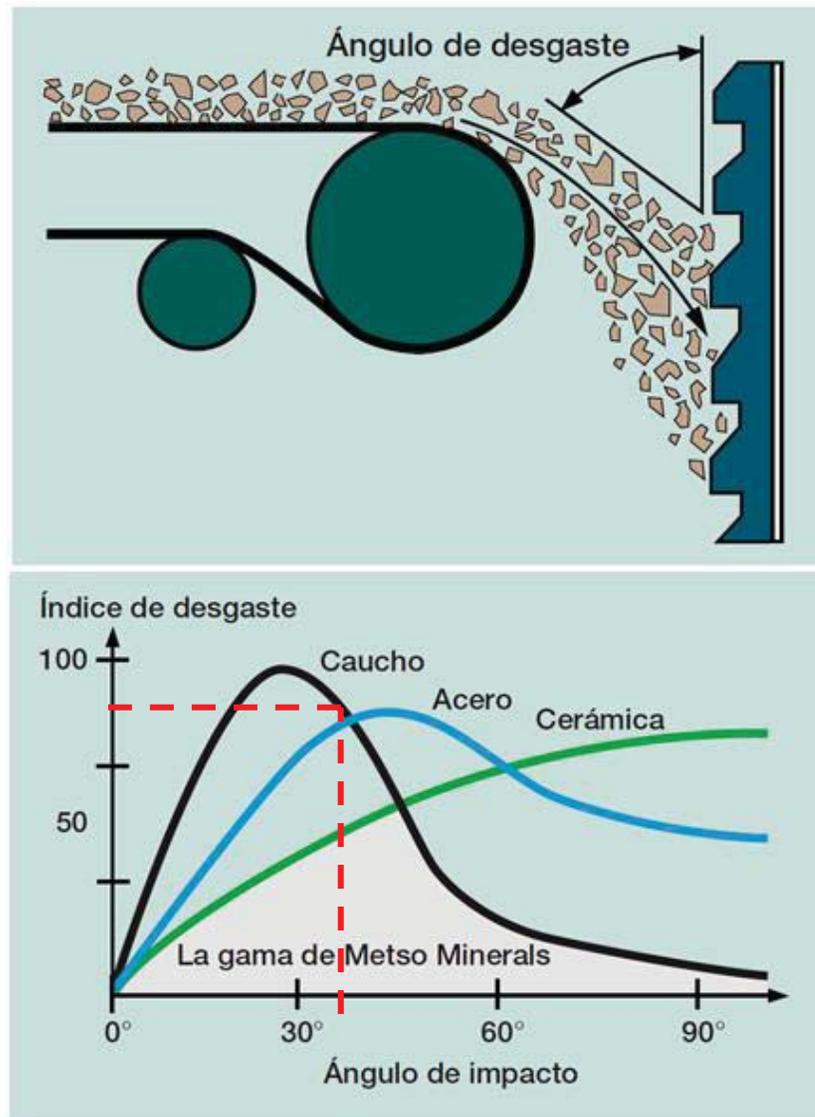


Figura 42: Índice de desgaste en función del material de la placa de impacto.  
Fuente: Protección contra el desgaste Metso Minerals.

En el caso actual el ángulo de impacto del material sobre la placa de desgaste mostrado en la Figura 43 indica que el índice de desgaste es alto, sobre el 50% considerando que la placa de desgaste utilizada contiene un alto porcentaje de caucho. La trayectoria del mineral muestra

que el ángulo de desgaste no es el adecuado, promoviendo a que el polímero no resista de buena forma las fuerzas de impacto y el desgaste cuando sea alcanzado por el material.

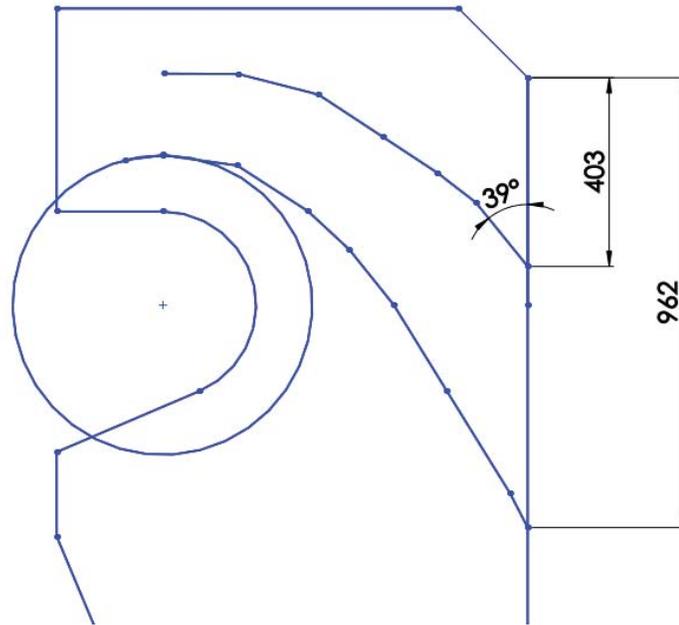


Figura 43: Esquema de la trayectoria del material en el chute actual.  
Fuente: Elaboración propia.

### 6.1.3.3. Resultados para velocidad de partículas

A continuación, se analizan los resultados de las velocidades de las partículas, los videos que registran estos parámetros se encuentran en anexos. Se registró la velocidad del material al momento de impactar en la placa de desgaste del chute. Los valores indican una velocidad máxima alcanzada por el material de  $4,5 \left(\frac{m}{s}\right)$ . La Figura 44 ilustra las zonas en donde impacta la totalidad del material descargado desde la correa y posteriormente descarga hacia la salida. Esta configuración del punto de transferencia provoca importantes desgastes en las paredes del chute por material proyectado, alcanzando  $6 \left(\frac{m}{s}\right)$  en una de sus caras.

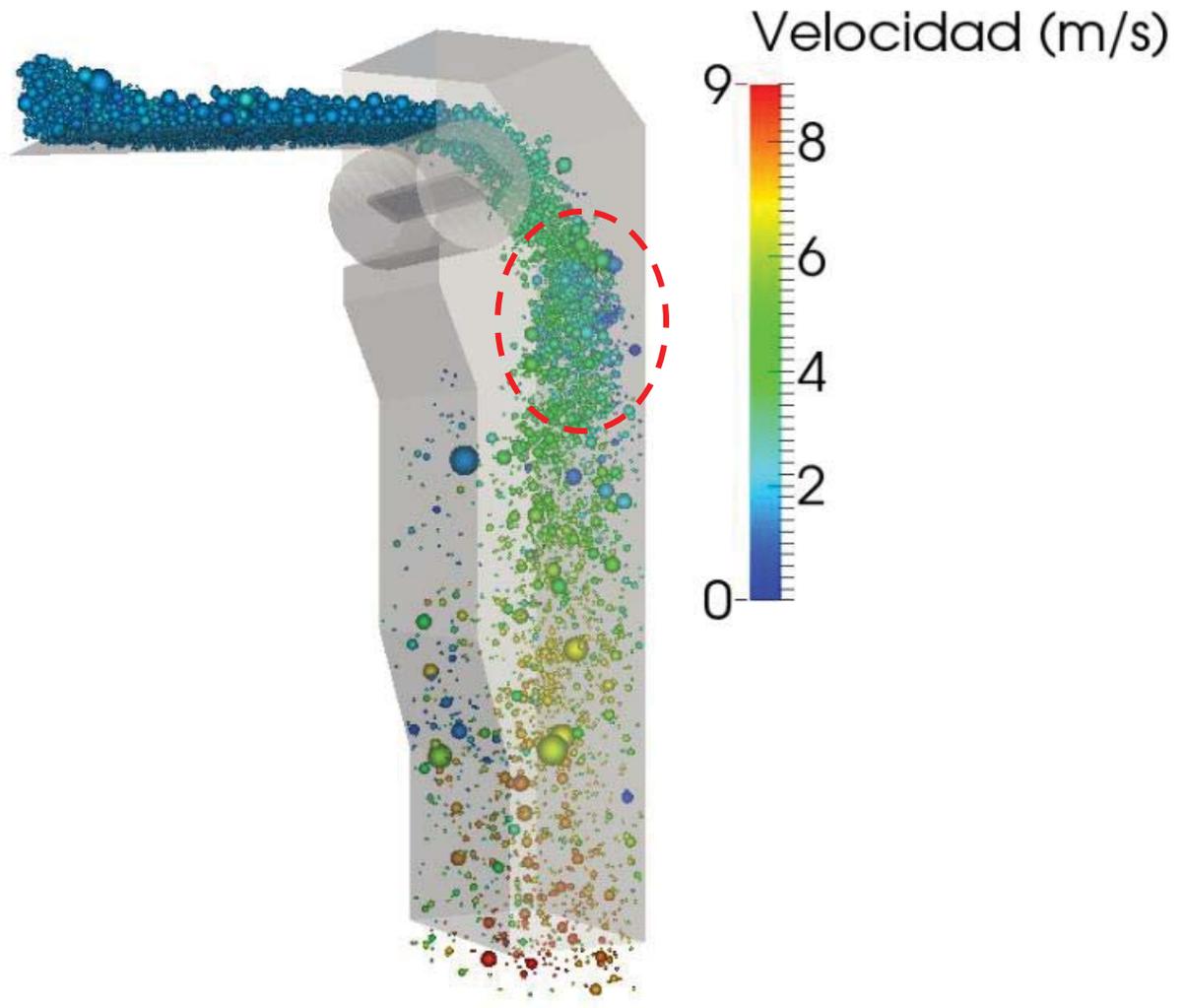


Figura 44: Zona de impacto de material a velocidades mayores a 4m/s.  
Fuente : Elaboración propia.

Se debe considerar los altos valores de velocidad a la salida del chute, que alcanzan los  $9 \left(\frac{m}{s}\right)$ , lo cual pone en riesgo la correa de carga y sus elementos mecánicos.

#### 6.1.3.4. Resultados para desgaste

A continuación, se analizan los resultados del desgaste en las paredes interiores del chute, los videos que registran estos parámetros se encuentran en anexos.

La simulación DEM del punto de transferencia actual permitió cuantificar el desgaste en las diferentes zonas del chute, siendo de particular interés el registro del desgaste en la placa de

impacto de este. Se ha determinado la tasa de desgaste  $\left(\frac{mm}{año}\right)$  para las superficies del chute en la cual ocurren principalmente los impactos debido a la caída libre de material.

Según el modelo de desgaste de Finnie estipulado en este análisis se ha utilizado un valor de Coeficiente de Finnie típico  $(2,5 \cdot 10^{-9})$  para el caso actual considerando revestimientos de material caucho de 13 mm de espesor.

En la Figura 45, se observa que en general las paredes del chute presentan un desgaste bajo. La placa de impacto corresponde a la zona de mayor desgaste, principalmente porque recibe el impacto directo de mineral constantemente.

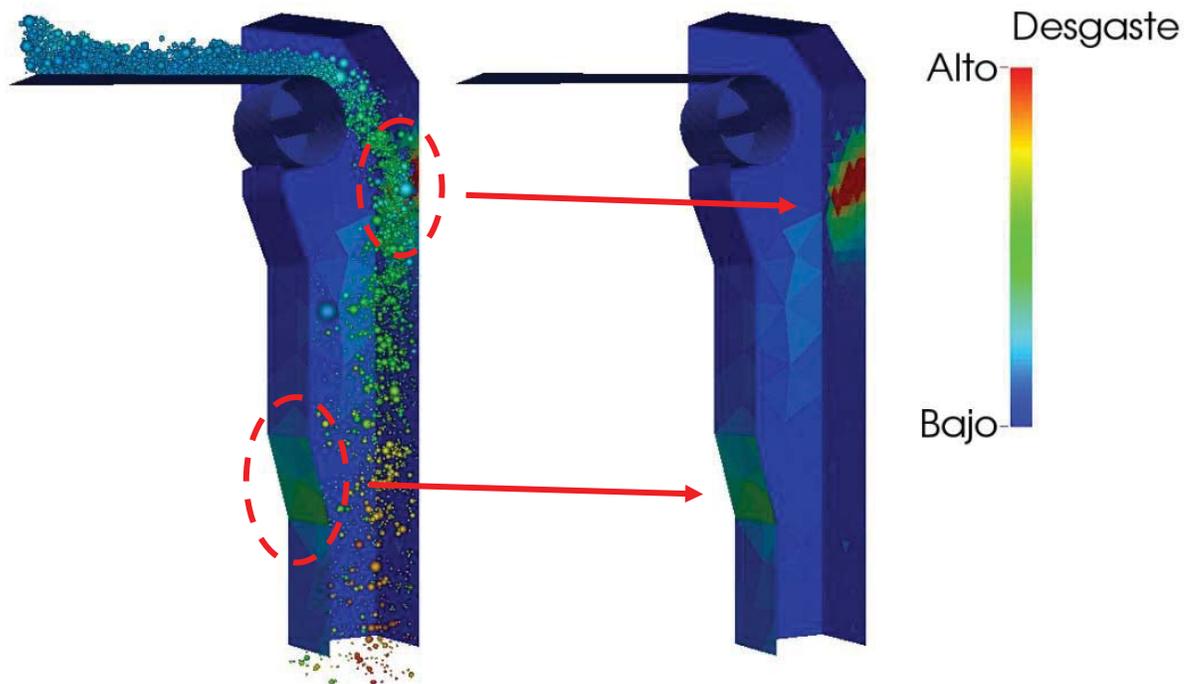
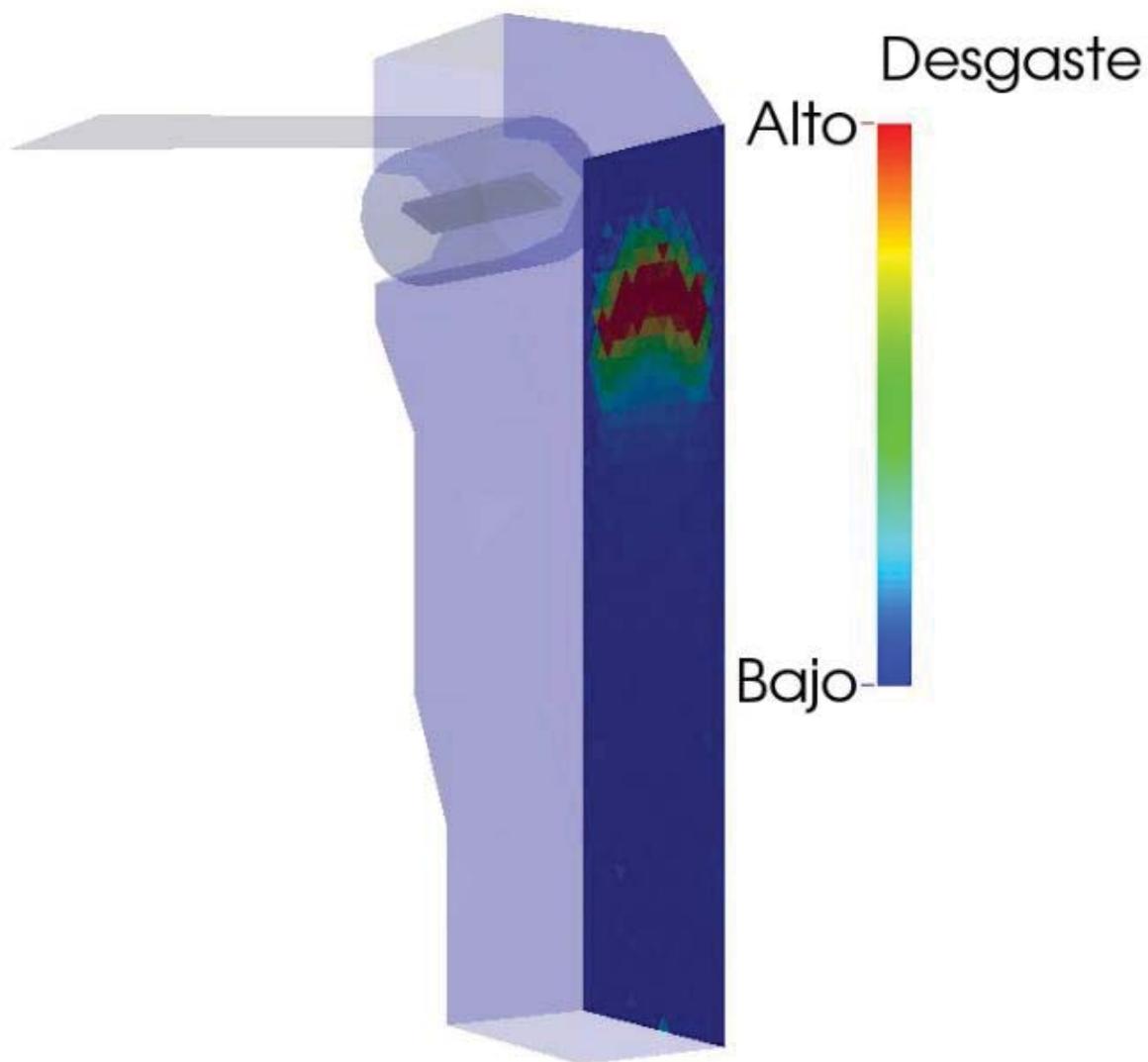


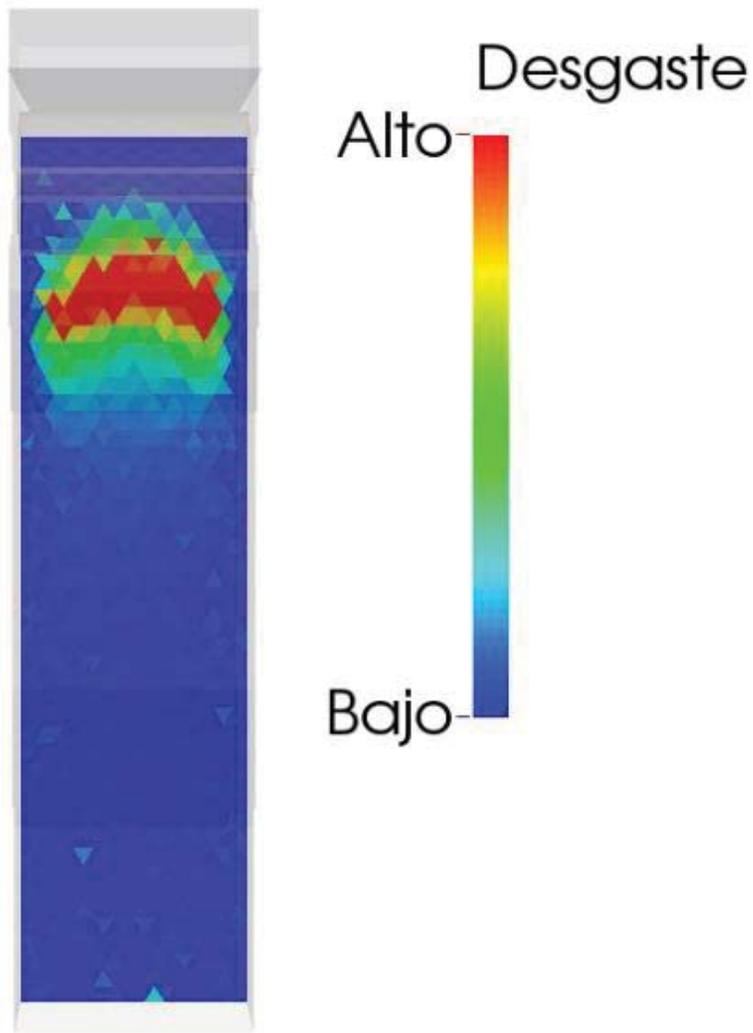
Figura 45: Esquema de zonas de estudio de desgaste para caso actual.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 46 y Figura 47 se observa en detalle el área de desgaste de la placa de impacto del chute actual. Se evidencia que la placa de impacto corresponde a una pieza de sacrificio

debido a la naturaleza del sistema de transporte y a la magnitud granulométrica del material, de esta manera se hace notar que esta pieza es intercambiable.

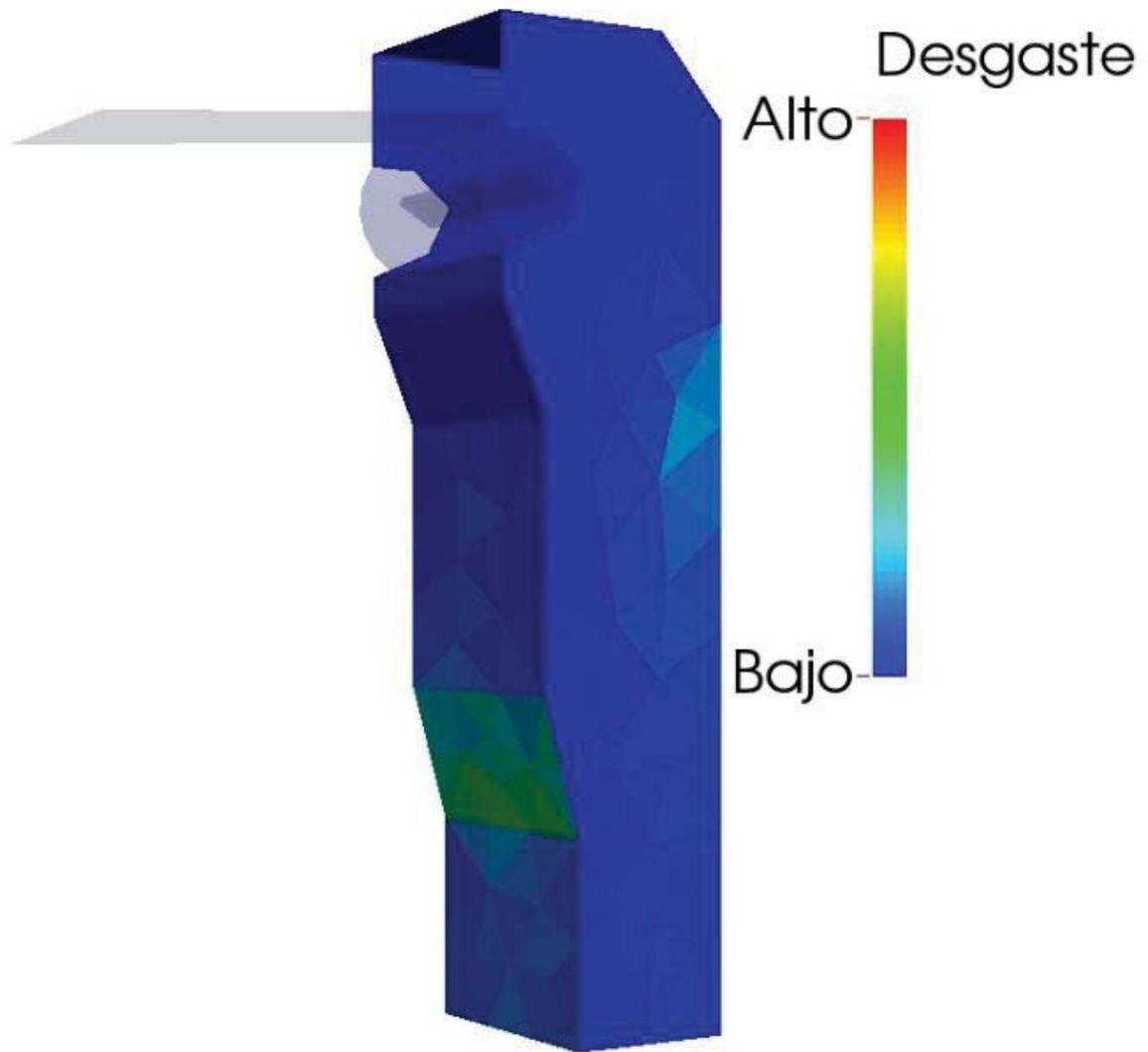


*Figura 46: Representación gráfica de las zonas de desgaste de la placa de impacto.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 47: Representación gráfica de las zonas de desgaste de la placa de impacto. Vista frontal.  
Fuente: Elaboración propia.*

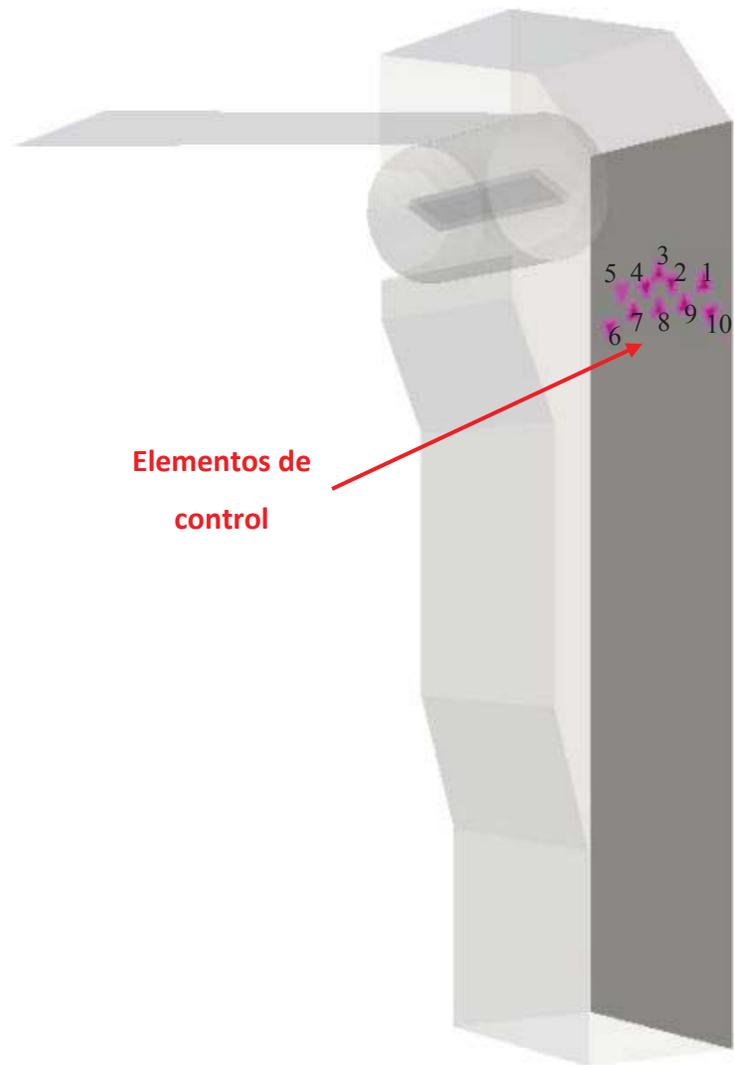
La Figura 48 detalla el desgaste en las paredes del chute las cuales reciben el impacto del material proyectado luego de impactar en la placa de impacto.



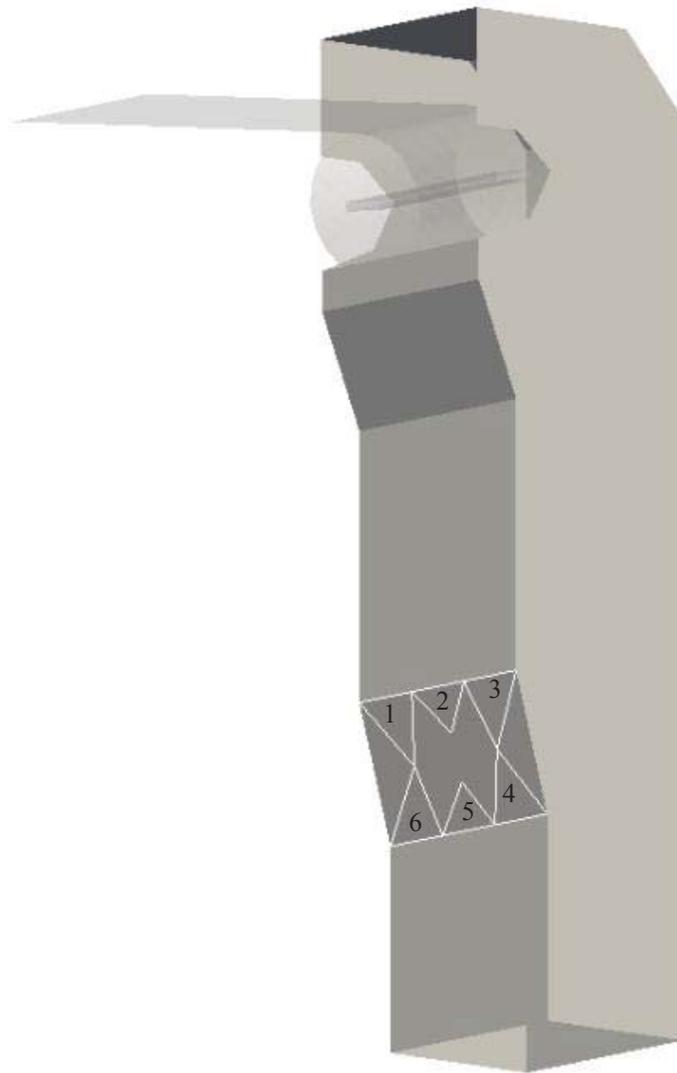
*Figura 48: Representación gráfica de las zonas de desgaste de las paredes sin revestimiento.  
Fuente: Elaboración propia.*

Las paredes del chute se encuentran definidas mediante mallas de elementos triangulares en las cuales se detecta y registran las variables estudiadas, las cuales deben ser post procesadas para estimar los valores de desgaste. Los resultados son evaluados mediante elementos de control, los cuales se han seleccionado, ya que ellos presentan los mayores valores en las zonas de interés.

En la Figura 49 se ilustran los elementos de control para el registro de desgaste en la placa de impacto, mientras que en la Figura 50 se identifican los elementos de control en las paredes del chute actual.



*Figura 49: Elementos de control de desgaste en placa de impacto..  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 50: Elementos de control de desgaste en paredes del chute.  
Fuente: Elaboración propia.*

Considerando la zona de control en la placa de impacto del chute, se presentan en la Tabla 5 las áreas de los elementos estudiados.

Número del elemento	Área del elemento ( $m^2$ )
1	0,00368834
2	0,00391497
3	0,00397329
4	0,00398123
5	0,00398128
6	0,00398134
7	0,00398098
8	0,00397304
9	0,00394906
10	0,00370354
<b>Promedio:</b>	0,0039100

*Tabla 5: Tamaña de elementos de control, zona placa de impacto del chute actual.  
Fuente: Elaboración propia.*

Esto indica que aproximadamente los resultados son evaluados en un elemento rectangular de 63x63 mm.

Los resultados de tasa de desgaste considerando la fuerza de impacto del flujo de material, ángulo de desgaste y propiedades del material, se indican en la Tabla 6.

Número del elemento	Tasa de desgaste $\left(\frac{mm}{año}\right)$
1	48,32
2	39,07
3	39,24
4	41,58
5	32,13
6	31,81
7	46,77
8	40,69
9	23,96
10	62,99
<b>Promedio:</b>	40,66

Tabla 6: Tasa de desgaste, zona de la placa de impacto del chute actual.  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que las tasas de desgaste para la zona de la placa de impacto corresponden a un valor promedio de  $40,6\left(\frac{mm}{año}\right)$  y un máximo de  $62,9\left(\frac{mm}{año}\right)$ . De esta manera se corroboró el tiempo de recambio de revestimiento de la placa de impacto obtenido por la operación minera, considerando un error del 1%. La Tabla 7 indica los valores que determinan estos parámetros.

	Tasa de desgaste mensual $\left(\frac{mm}{mes}\right)$	Tiempo de recambio placas (mes)
<b>Promedio</b>	3,4	3,8
<b>Máximo</b>	5,2	2,5

Tabla 7: Tiempo de recambio de la placa de desgaste.  
Fuente: Elaboración propia.

Considerando la zona de control de las paredes del chute se presenta en la Tabla 8 las áreas de los elementos estudiados.

Número del elemento	Área del elemento (m <sup>2</sup> )
1	0,00576479
2	0,00379586
3	0,00956064
4	0,00576807
5	0,00378907
6	0,00576807
<b>Promedio:</b>	0,00574100

Tabla 8: Tamaño de elementos de control de pared inferior frontal.  
Fuente: Elaboración propia.

Esto indica que aproximadamente los resultados son evaluados en un elemento rectangular de 240x240 mm.

Los resultados de tasa de desgaste considerando la fuerza de impacto del flujo de material, ángulo de desgaste y propiedades del material para la zona de las paredes internas del chute, se indican en la Tabla 9.

Número del elemento	Tasa de desgaste (mm/año)
1	7,79
2	10,10
3	6,68
4	14,62
5	18,31
6	15,16
<b>Promedio:</b>	12,11

Tabla 9: Tasa de desgaste de pared inferior frontal.  
Fuente Elaboración propia.

Se observa que las tasas de desgaste para la zona frontal del chute corresponden a un valor promedio de  $12 \left(\frac{mm}{año}\right)$  y un máximo de  $18 \left(\frac{mm}{año}\right)$ . De esta manera se determinan los tiempos de recambio de los revestimientos en la Tabla 10.

	Tasa de desgaste mensual $\left(\frac{mm}{mes}\right)$	Tiempo de recambio placas $(mes)$
<b>Promedio</b>	1,0	12,9
<b>Máximo</b>	1,5	8,5

Tabla 10: Tiempo de recambio de revestimientos.  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados gráficos de la simulación y numéricos de los parámetros estudiados, permitieron establecer que durante la operación existe un desgaste acelerado en la placa de impacto del punto de transferencia actual. El modelo DEM determina que el tiempo de recambio de esta placa está en el intervalo de referencia. Al estudiar el comportamiento de la placa, se demuestra que el desgaste incrementa en el tiempo debido a la operación. El análisis permitió estimar que el impacto del mineral produciría un desgaste acelerado del material de recubrimiento, por lo que se recomienda una cama de piedras en el chute, para reducir el desgaste en las paredes.

También se identifica una moderada proyección de material hacia una de las paredes frontales del chute, pesar de aquello, el desgaste máximo en la zona señalada es de  $18 \left(\frac{mm}{año}\right)$ , se determina que la zona afectada debe ser tomada en consideración en una posterior optimización del chute recomendándose placas o revestimiento que proteja la superficie afectada del chute.

Se registra una alta velocidad de caída en la salida sobre los  $9 \left(\frac{m}{s}\right)$ , el impacto del mineral puede provocar alto desgaste sobre la cinta receptora, por lo que se recomienda algún elemento que limite este efecto y asegure una descarga adecuada en la correa del stacker.

## 7. Optimización de un punto de transferencia específico

En este capítulo se presenta una geometría optimizada con el fin de disminuir el desgaste en las paredes interiores del chute, del análisis anterior se obtiene que el mecanismo de desgaste es netamente por el impacto entre el material y las paredes, por lo que se incorpora una pared horizontal, destinada a la formación de una cama de piedras evitando el impacto del mineral con las zonas que presentan alto desgaste e interviene en la trayectoria para descargar el material a menor velocidad.

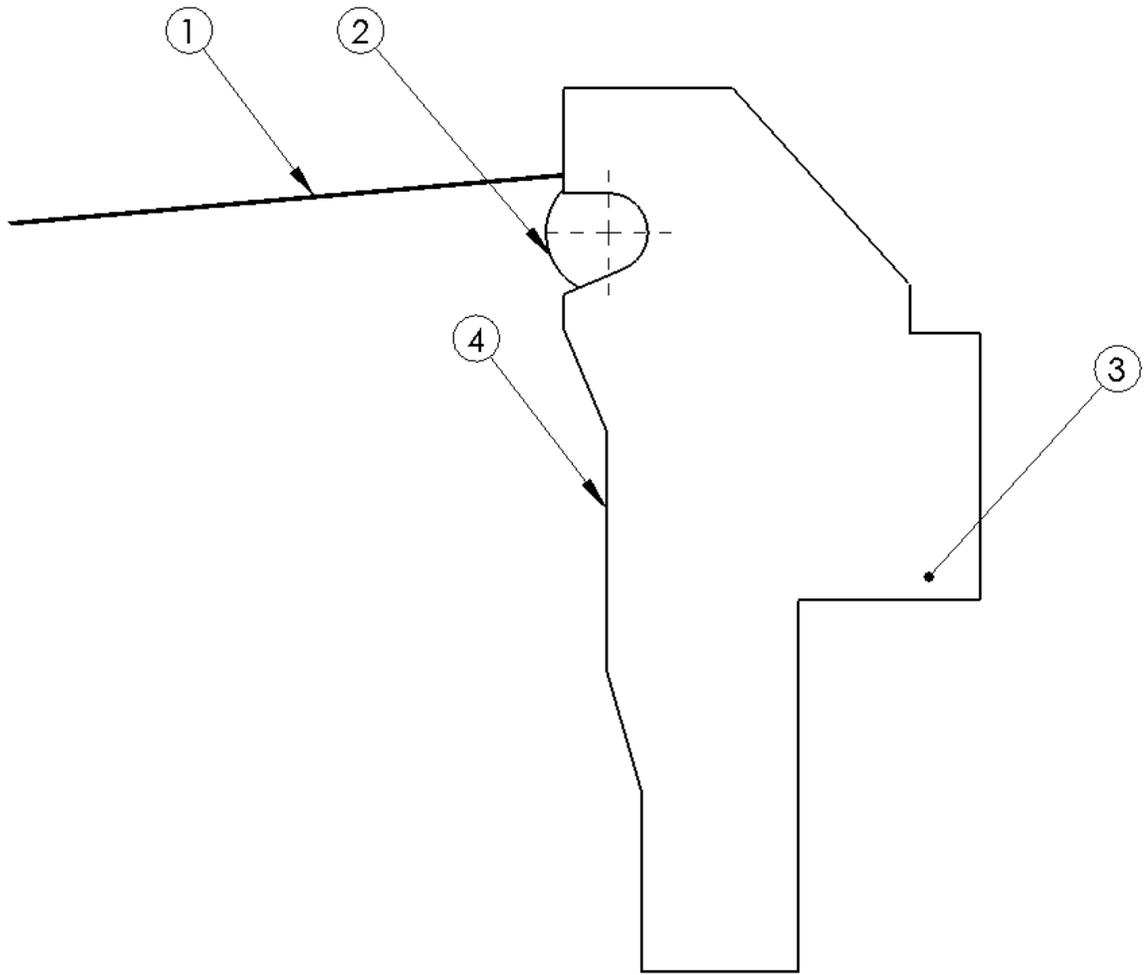
### 7.1. Implementación computacional

Se evalúa la trayectoria del mineral para estimar donde impactará el flujo, mostrado en la Figura 43 y se diseña un nuevo modelo geométrico considerando el esquema del punto de transferencia actual de la Figura 35.

#### 7.1.1. Modelo geométrico optimizado

La optimización del modelo geométrico se especifica a continuación en la Figura 51, un nuevo diseño implementado en el punto de transferencia PT-1, para las mismas condiciones y parámetros de funcionamiento actuales. Los componentes estudiados del punto de transferencia optimizado se identifican en la Figura 51:

1. Correa transportadora de alimentación del mineral.
2. Tambor donde la correa transportadora se mueve.
3. Cama de piedras.
4. Estructura metálica del chute que conduce el material hacia la correa transportadora de carga.



*Figura 51: Modelo geométrico computacional del punto de transferencia optimizado y sus componentes.  
Fuente: Elaboración propia*

Las dimensiones del punto de transferencia optimizado se definen en la Figura 52 y la Figura 53.

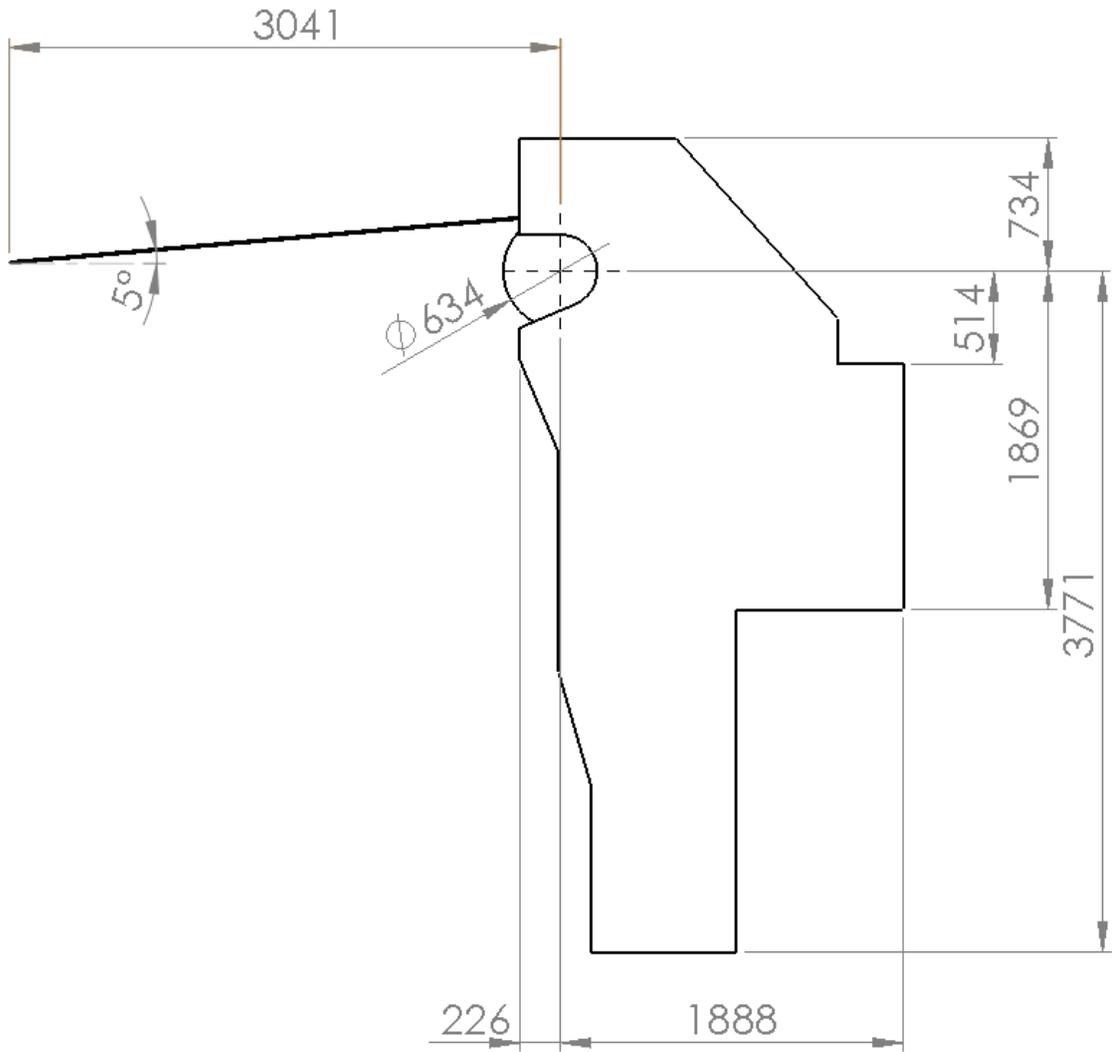


Figura 52: Dimensiones del modelo geométrico optimizado, vista lateral (milímetros).  
Fuente: Elaboración propia.

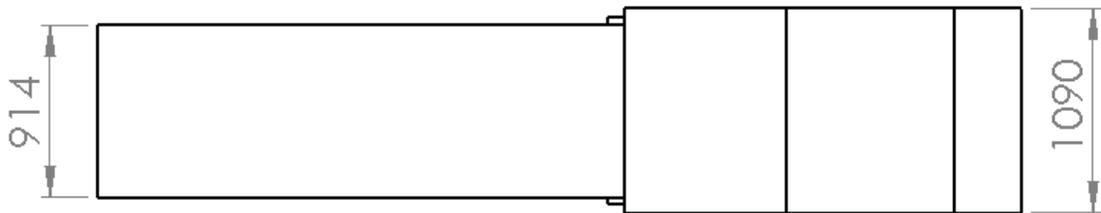


Figura 53: Dimensiones del modelo geométrico actual, vista superior (milímetros).  
Fuente: Elaboración propia.

#### 7.1.1.1. Desarrollo

Se captura el mismo periodo de la simulación anterior, sin embargo, al interior del chute, se encuentra una “cama de piedras”, la cual se debe llenar de material para que este luego impacte sobre el mismo y sea descargado hacia la salida. Para esta simulación se analizan los efectos de impacto de mineral en las paredes internas del chute y se visualiza la formación y estabilización de la cama de piedras.

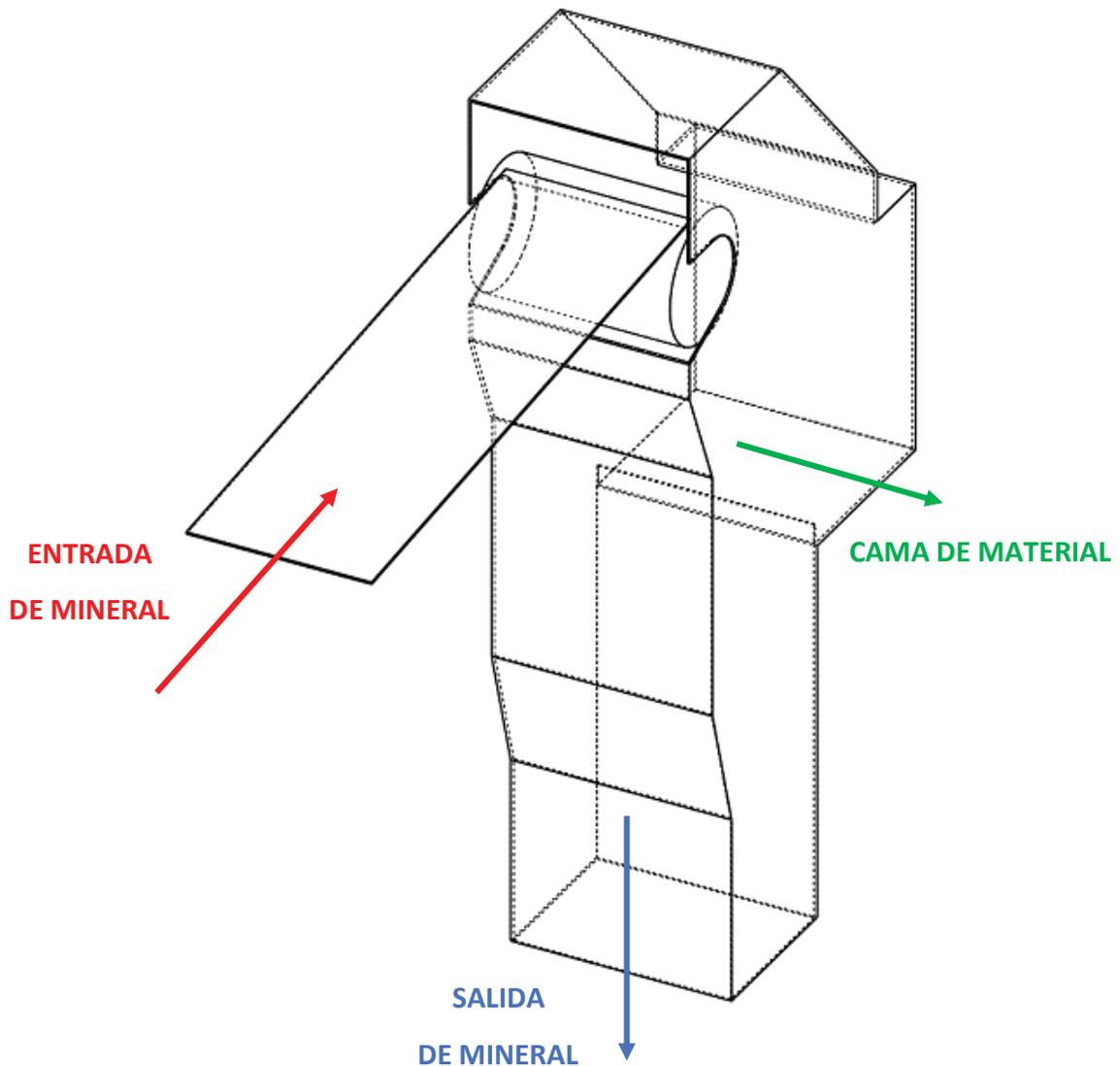


Figura 54: Modelo geométrico y condiciones de operación para análisis DEM del chute optimizado.  
Fuente: Elaboración propia.

### 7.1.2. Presentación y análisis de resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales para el periodo analizado.

#### 7.1.2.1. Monitoreo de flujo másico

El Gráfico 3 muestra el flujo másico registrado en la salida del chute, monitoreada para un periodo de 60 segundos.

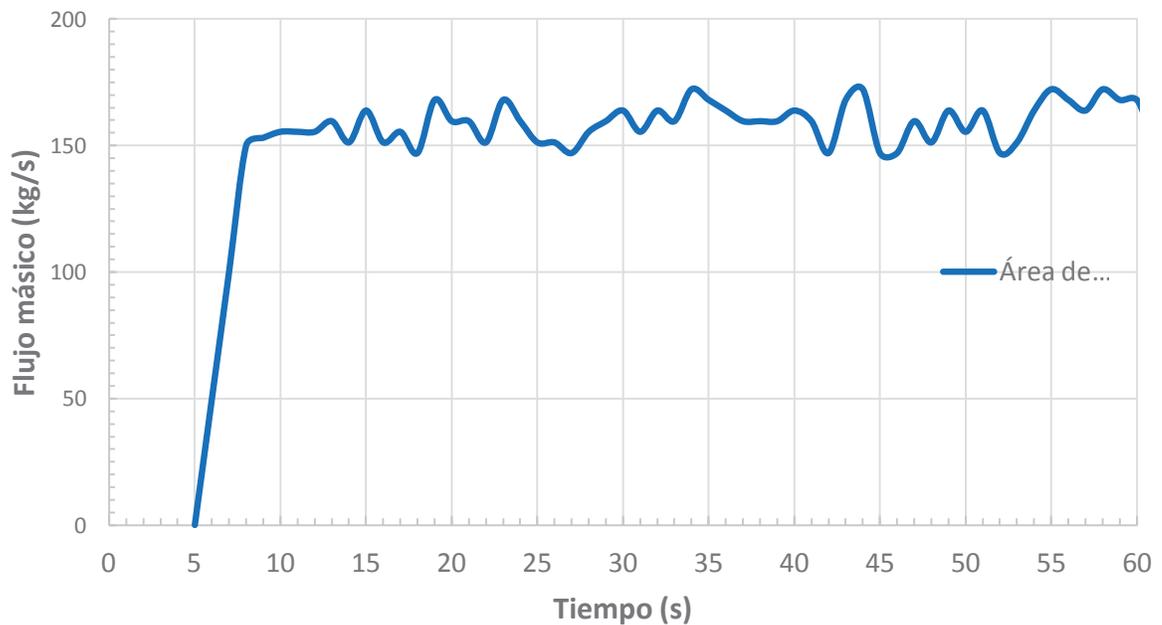


Gráfico 3: Área de control flujo másico en la salida del chute optimizado.  
Fuente: Elaboración propia

En este gráfico se puede observar que la curva presenta un valor  $0 \left[ \frac{kg}{s} \right]$  hasta los 8[s], vale decir, aún no existe flujo en la salida. Entre los 8[s] y los 60 [s] se registra la salida de material desde el chute, representado por el aumento de los valores del registro de datos. El flujo se estabiliza con un promedio de  $162,6 \left[ \frac{kg}{s} \right]$  manteniendo una diferencia menor al 1% del

flujo teórico la que puede atribuirse a los mismos factores mencionados en la simulación anterior capítulo 4.2.3.1.

#### 7.1.2.2. Resultados comportamiento del material

En la Figura 55 que ilustra las zonas de impacto, se observa la formación de la cama de piedra. En la cama impacta la totalidad del material descargado desde la correa y posteriormente el material descarga hacia la salida. Esta configuración con cama de piedra minimiza el desgaste de las paredes del chute.

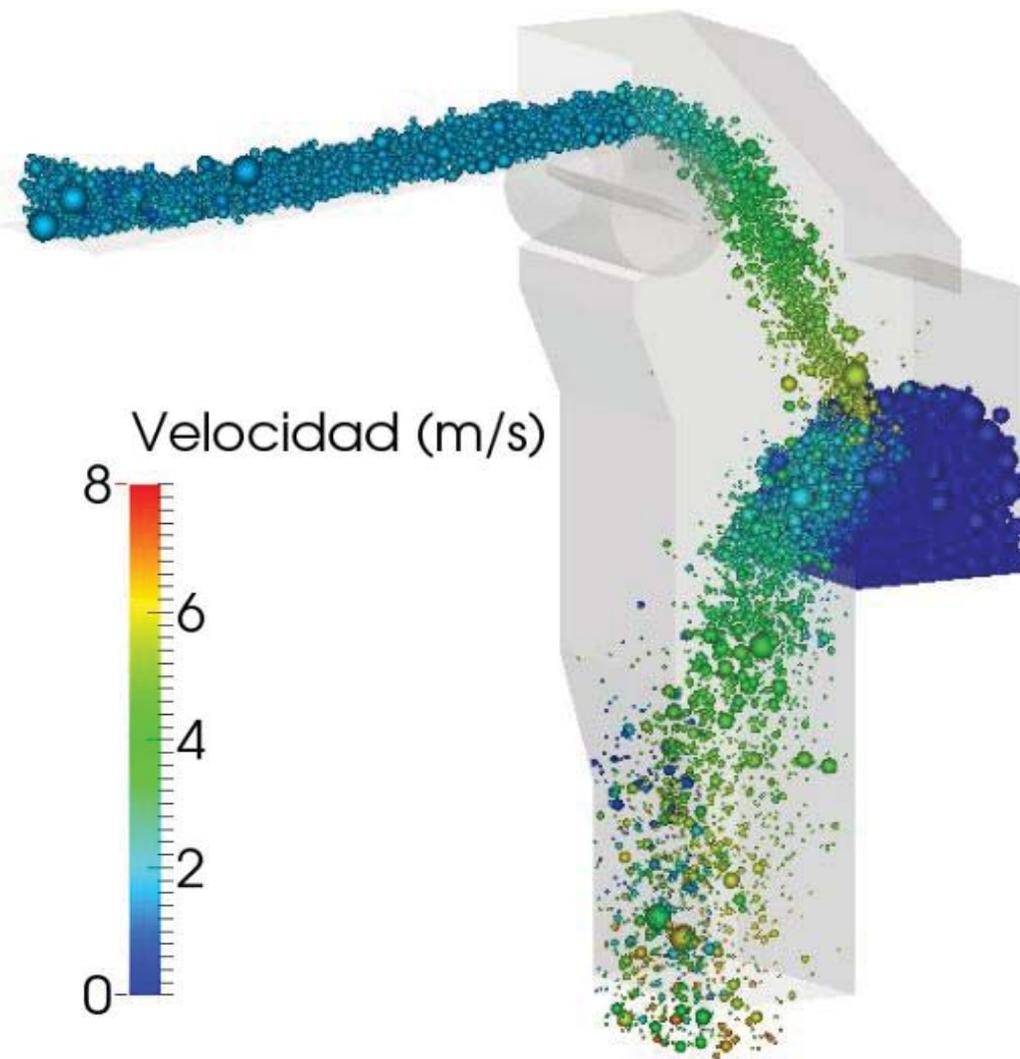


Figura 55: Zona de impacto de material y detalle cama de piedras

Fuente: Elaboración propia.

La ubicación de la cama es adecuada, ya que en su totalidad el flujo impacta sobre el material acumulado, se ilustra un esquema de la trayectoria en la Figura 56.

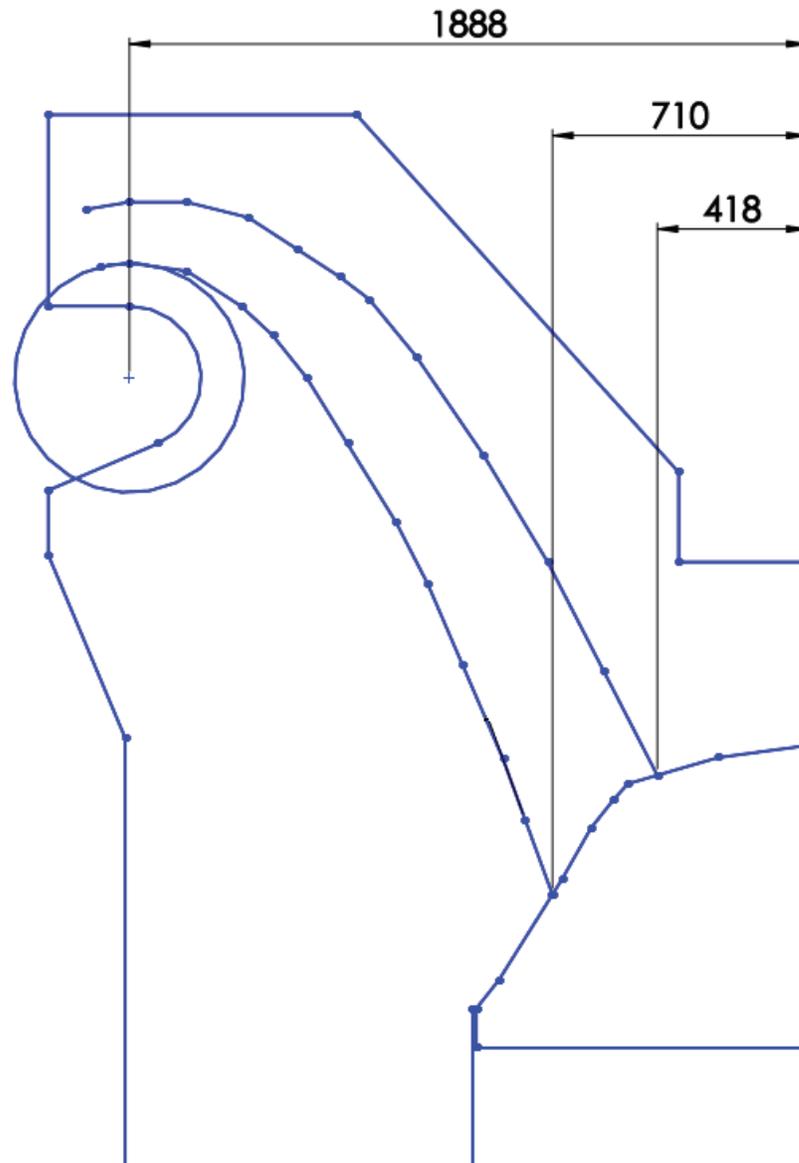


Figura 56: Esquema de la trayectoria del material en el chute optimizado.  
Fuente: Elaboración propia.

### 7.1.2.3. Resultados para velocidad de partículas

A continuación, se analizan los resultados de las velocidades de las partículas, los videos que registran estos parámetros se encuentran en anexos.

En la Figura 57 se presenta una vista frontal del chute optimizado. En la imagen es posible observar que la totalidad del mineral impacta sobre la cama de piedras a una velocidad cercana a los  $3,8 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , posteriormente es descargado hacia la correa receptora reduciendo considerablemente la velocidad a  $4 \left[ \frac{m}{s} \right]$  aproximadamente.

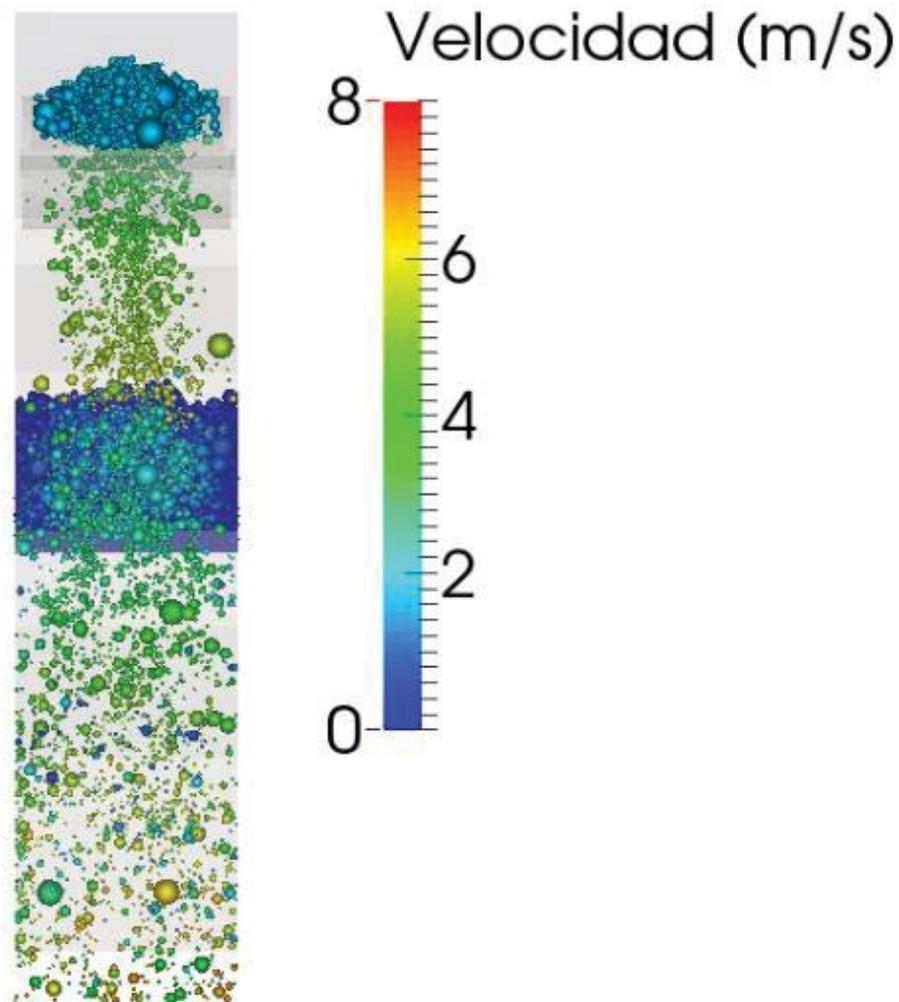


Figura 57: Caída libre del material al interior del chute optimizado. Vista frontal.  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 58 muestra la descarga del mineral desde la correa hacia el chute en vista lateral. Se observa que el mineral se dispersa produciendo un flujo más amplio en la zona de impacto, sobre la cama de piedra. También ilustra los efectos de proyección de mineral hacia las paredes frontales de la salida del chute. Parte del flujo de material impacta sobre una de las paredes internas, la cual es analizada posteriormente.

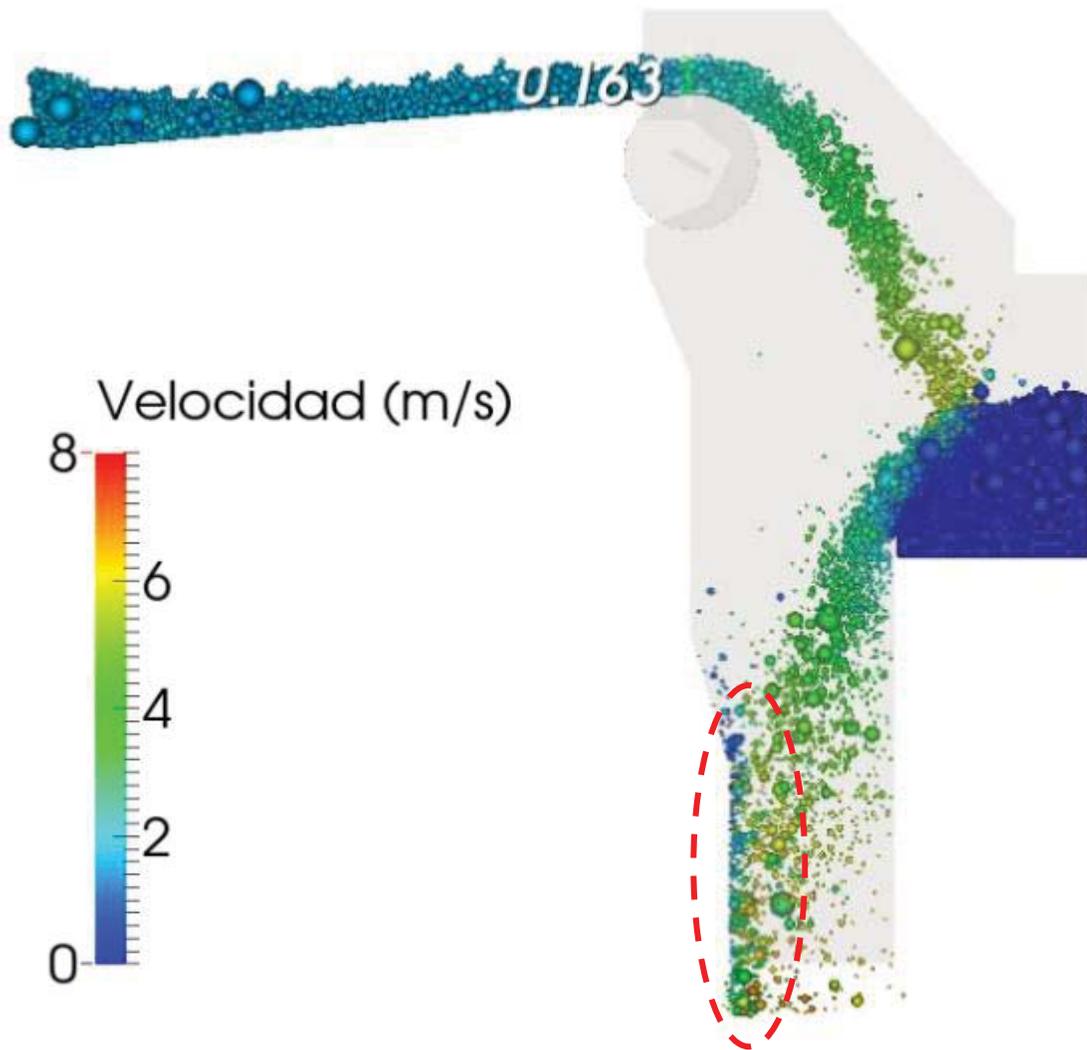


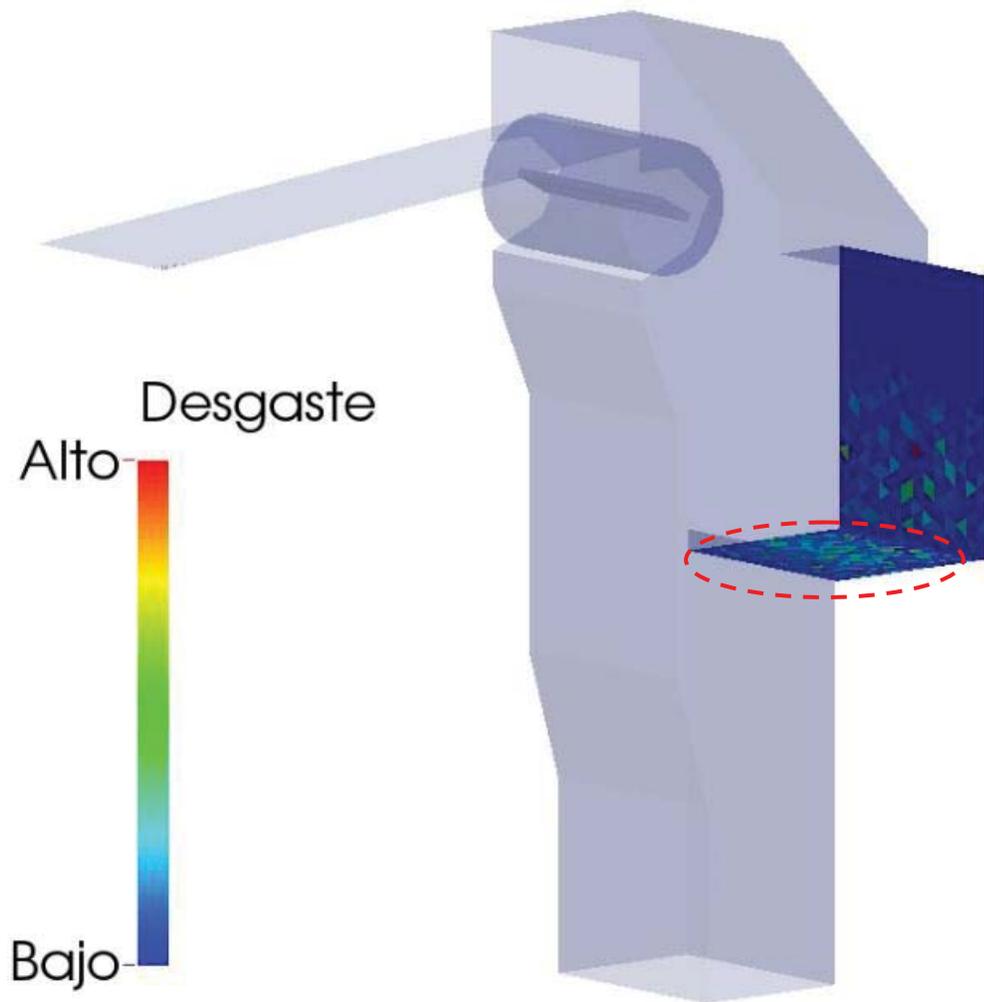
Figura 58: Caída libre del material al interior del chute optimizado. Vista lateral.  
Fuente: Elaboración propia

#### 7.1.2.4. Resultados para desgaste

A continuación, se analizan los resultados de los desgastes en las paredes interiores del chute, los videos que registran estos parámetros se encuentran en anexos.

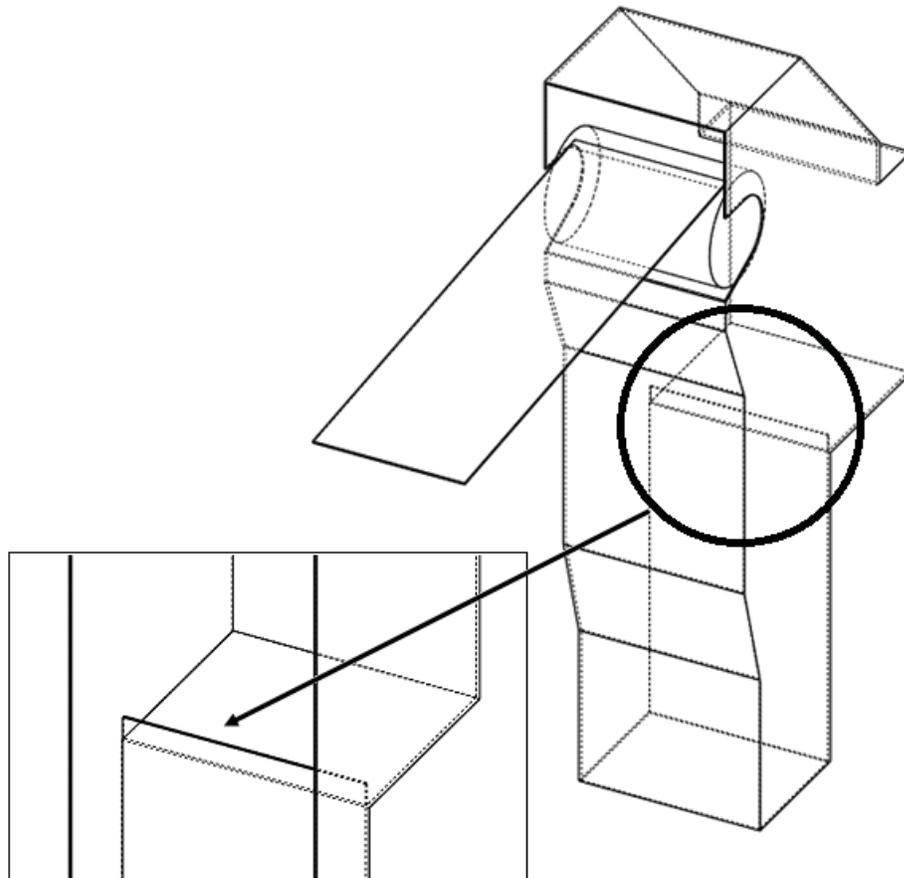
Esta simulación DEM permitió cuantificar el desgaste en todas las superficies del chute. El punto de transferencia fue optimizado con una cama de piedras, modificación que redujo el desgaste en las paredes del chute. El análisis de desgaste incluye la placa de la cama de piedras.

Se mantiene el coeficiente de Finnie y los parámetros de funcionamiento de la simulación anterior.



*Figura 59: Representación gráfica de las zona de desgaste en la cama de piedra del chute.  
Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 59, se observa que las zonas que presentan moderado desgaste corresponden a la pared horizontal del chute, destinada a la formación de la cama de piedras. Esta pared recibe el impacto inicial del mineral descargado desde la correa de alimentación. Una vez formada la cama de piedra, el mecanismo de desgaste es netamente abrasivo, debido al movimiento relativo entre el material, por lo que se incorpora una barrera mecánica que limita el movimiento del mineral de la zona inferior de la cama de piedras, solución esquematizada en la Figura 60.



*Figura 60: Implementación barrera limitadora de movimiento.  
Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 61 se observa que en general, las paredes del chute presentan un desgaste medianamente bajo, particularmente debido a la proyección de material desde la cama de piedras a la parte inferior del chute. Las zonas donde se produce mayor desgaste corresponde a la parte inferior de la pared frontal donde impacta el mineral. Se recomienda incorporar un revestimiento que limite el desgaste acelerado dando cumplimiento a lo considerado por los tiempos de mantenimiento de la operación minera.

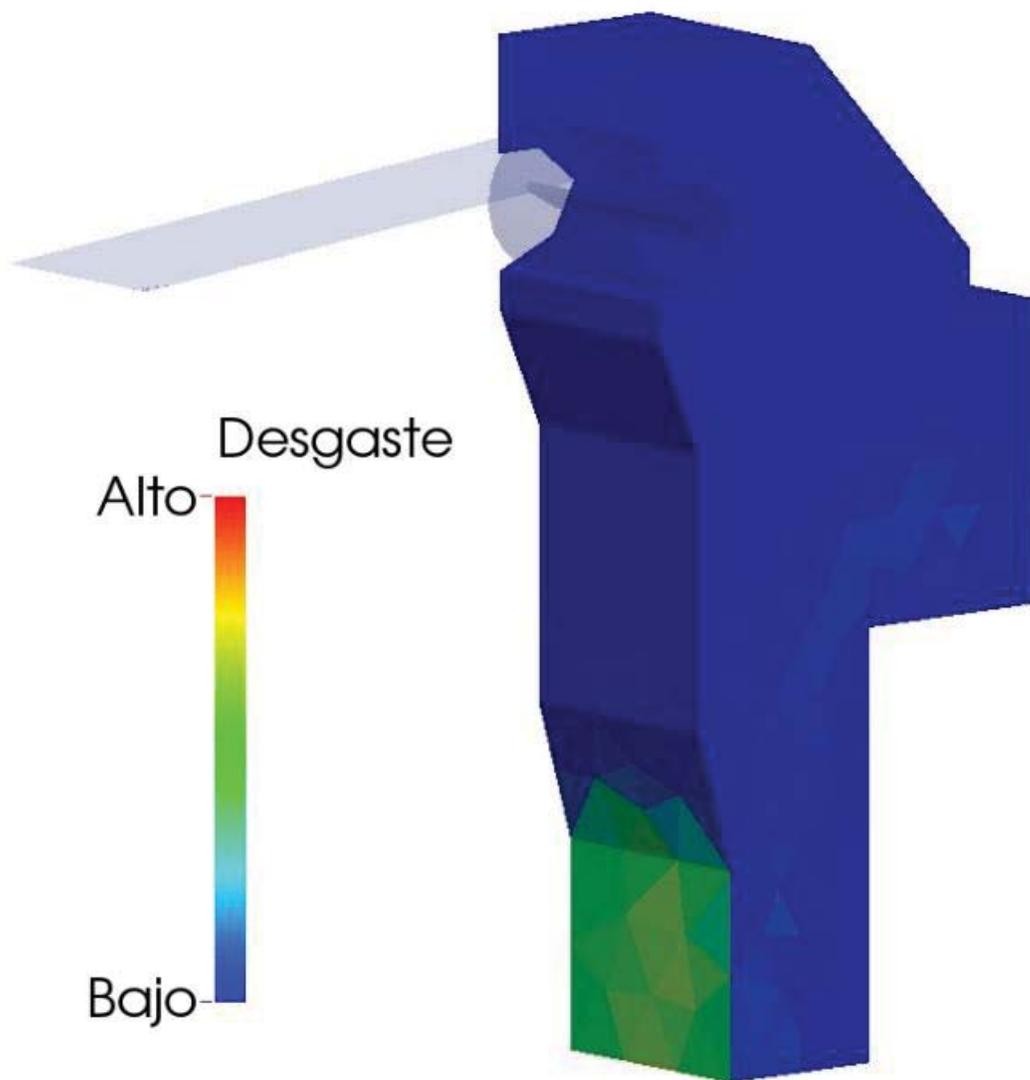
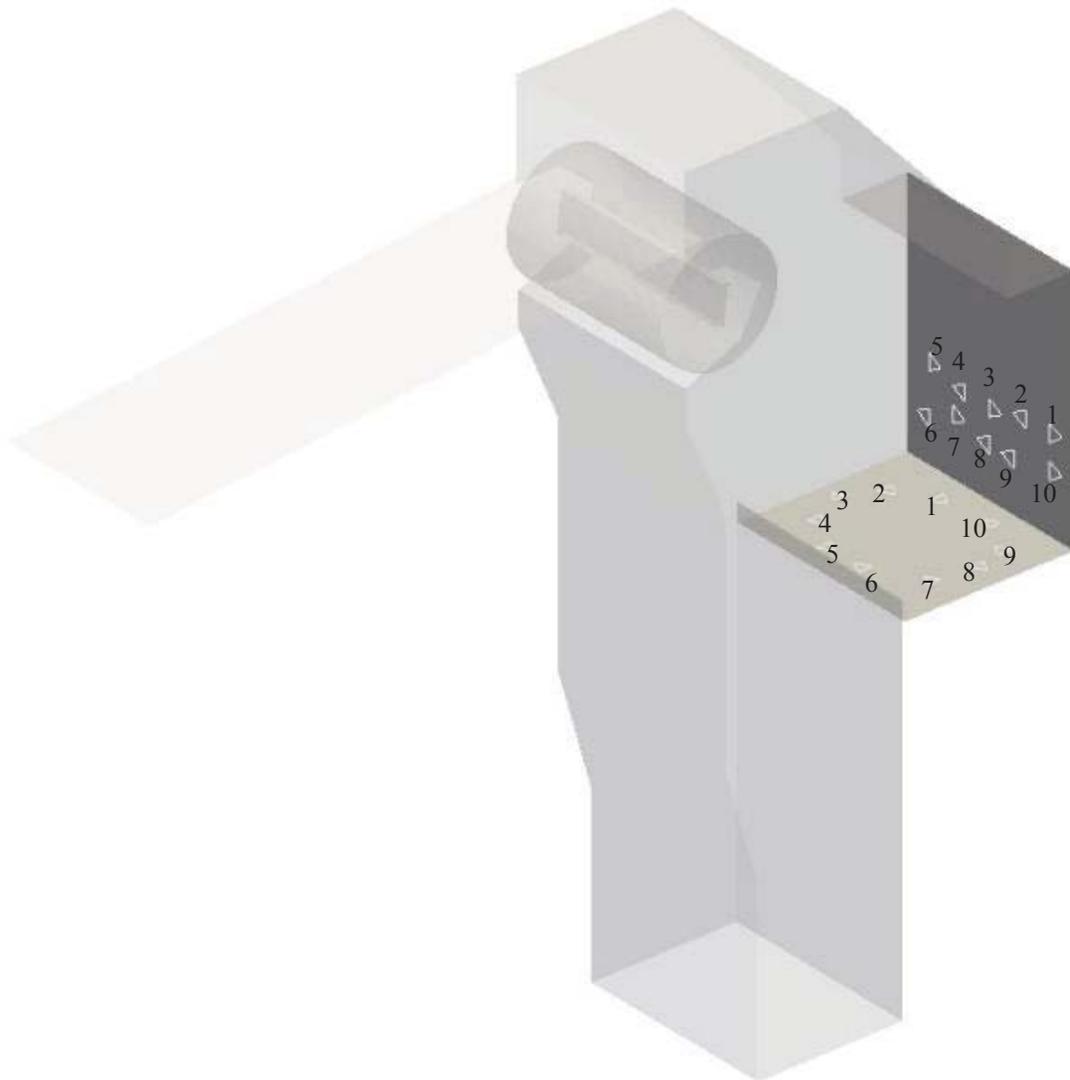


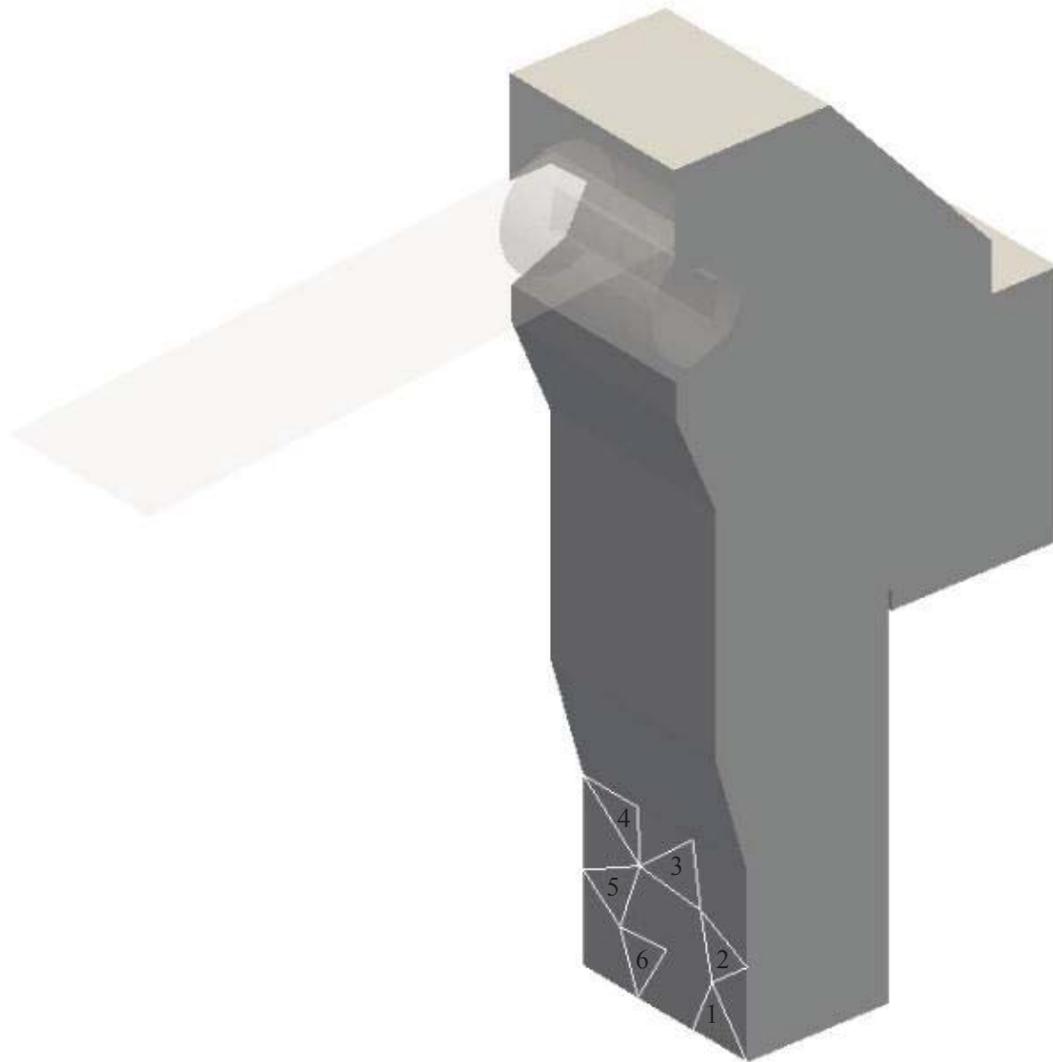
Figura 61: Representación gráfica de las zonas de desgaste de las paredes del chute optimizado.  
Fuente: Elaboración propia.

Se procede con la selección de elementos de control que presentan los mayores desgastes, las zonas de interés para esta simulación se identifican a continuación.

En la Figura 62 se ilustran los elementos de control para el registro de desgaste en los revestimientos de la cama de piedras, mientras que en la Figura 63 se ilustran los correspondientes en las paredes con desgaste moderado del chute.



*Figura 62: Elementos de control de desgaste en chute optimizado, específicamente cama de piedras.  
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 63: Elementos de control de desgaste en chute optimizado, específicamente paredes con desgaste moderado.  
Fuente: Elaboración propia.*

En referencia a la zona de control en la pared vertical de la cama de material del chute, se presentan las áreas de los elementos seleccionados en la Tabla 11.

Número del elemento	Área del elemento ( $m^2$ )
1	0,00349613
2	0,00349340
3	0,00349320
4	0,00349058
5	0,00339648
6	0,00351134
7	0,00348298
8	0,00348277
9	0,00348554
10	0,00331629
<b>Promedio:</b>	0,00346000

*Tabla 11: Tamaño de elementos de control, zona pared vertical de la cama de materia..  
Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados de tasa de desgaste de esta zona se indican en la Tabla 12, considerando las condiciones del análisis anterior.

Número del elemento	Tasa de desgaste ( $\frac{mm}{año}$ )
1	0,52
2	1,92
3	8,03
4	8,88
5	0,01
6	1,39
7	2,11
8	2,91
9	0,77
10	0,31
<b>Promedio:</b>	2,69

*Tabla 12: Tasa de desgaste, zona pared vertical de la cama de material..  
Fuente: Elaboración propia.*

Se observa que las tasas de desgaste para la zona de cama de piedras corresponden a un valor promedio de  $3 \left[ \frac{mm}{año} \right]$  y un máximo de  $9 \left[ \frac{mm}{año} \right]$ . De esta manera es posible determinar los tiempos de recambio para el revestimiento. La Tabla 13 indica que estos deben ser reemplazados cada 15.5 meses, considerando el valor recomendado (valor máximo por coeficiente del 20%).

	Tasa de desgaste mensual $\left( \frac{mm}{mes} \right)$	Tiempo de recambio placas $(mes)$
Promedio	0,2	58,1
Máximo	0,7	19,4
<b>Recomendado</b>	-	15,5

Tabla 13: Tiempo de recambio pared vertical cama de piedra.  
Fuente: Elaboración propia.

Considerando la zona de control de la pared horizontal en el chute, se presenta en la Tabla 14 las áreas de los elementos estudiados.

Número del elemento	Área del elemento $(m^2)$
1	0,00180420
2	0,00250431
3	0,00252300
4	0,00239392
5	0,00246681
6	0,00241014
7	0,00246760
8	0,00228399
9	0,00252142
10	0,00250457
<b>Promedio:</b>	0,00239000

Tabla 14: Tamaño de elementos de control, zona pared horizontal de la cama de material..  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de tasa de desgaste considerando la fuerza de impacto del flujo de material, ángulo de desgaste y propiedades del material para la zona de pared inclinada del chute, se indican en la Tabla 15.

Número del elemento	Tasa de desgaste ( $\frac{mm}{año}$ )
1	2,23
2	1,06
3	2,27
4	0,44
5	4,52
6	5,63
7	0,37
8	3,93
9	2,34
10	0,07
<b>Promedio:</b>	2,28

Tabla 15: Tasa de desgaste, zona pared horizontal de la cama de material..  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que las tasas de desgaste para la zona de pared horizontal corresponden a un valor promedio de  $2 \left[ \frac{mm}{año} \right]$  y un máximo de  $6 \left[ \frac{mm}{año} \right]$ . De esta manera es posible determinar tiempos de recambio de revestimiento, la Tabla 16 indica que estos deben ser reemplazados cada 19,4 meses, considerando el valor recomendado (tiempo máximo por coeficiente 20%).

	Tasa de desgaste mensual ( $\frac{mm}{mes}$ )	Tiempo de recambio placas (mes)
Promedio	0,2	68,3
Máximo	0,5	27,7
<b>Recomendado</b>	-	22,1

Tabla 16: Tiempo de recambio pared horizontal cama de piedra.  
Fuente: Elaboración propia.

En referencia a la zona de control en la zona frontal del chute, se presentan las áreas de los elementos seleccionados en la Tabla 17.

Número del elemento	Área del elemento ( $m^2$ )
1	0,0624790
2	0,0430566
3	0,0511232
4	0,0456832
5	0,0530407
6	0,0499792
<b>Promedio:</b>	0,0508900

Tabla 17: Tamaña de elementos de control, zona frontal del chute optimizado.  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de tasa de desgaste considerando la fuerza de impacto del flujo de material, ángulo de desgaste y propiedades del material para la zona frontal del chute, se indican en la Tabla 18.

Número del elemento	Tasa de desgaste ( $\frac{mm}{año}$ )
1	22,07
2	19,94
3	15,92
4	21,09
5	18,43
6	13,34
<b>Promedio:</b>	18,46

Tabla 18: Tasa de desgaste, zona frontal del chute optimizado.  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que las tasas de desgaste para la zona frontal afectada corresponden a un valor promedio de  $18 \left[ \frac{mm}{año} \right]$  y un máximo de  $22 \left[ \frac{mm}{año} \right]$ . De esta manera es posible determinar tiempos

de recambio de revestimiento, cabe considerar que este revestimiento es de 25 mm de espesor. En la Tabla 19 se indica que estos deben ser reemplazados cada 10,8 meses, considerando el valor recomendado (tiempo máximo por coeficiente 20%).

	<b>Tasa de desgaste mensual</b> $\left(\frac{mm}{mes}\right)$	<b>Tiempo de recambio placas</b> $(mes)$
Promedio	1,5	16,2
Máximo	1,8	13,6
<b>Recomendado</b>	-	10,8

Tabla 19: Tiempo de recambio zona frontal del chute optimizado  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 20 se comparan los resultados promedios de la tasa de desgaste entre LIGGGHTS y los datos de referencia. Se observa que el chute optimizado obtuvo menores valores de desgaste en las paredes interiores del chute. Principalmente en las zonas que ocurre un desgaste acelerado del chute actual, estas corresponden a las zonas donde se incorpora la cama de piedras, las que se evalúan en pared vertical y pared horizontal. El desgaste en la pared frontal se incrementa levemente en la geometría optimizada debido a que mayor flujo impacta sobre esta.

<b>Tasa de desgaste promedio <math>\left(\frac{mm}{año}\right)</math></b>						
<b>Datos de Referencia</b>		<b>Resultados de LIGGGHTS</b>				
<b>Chute Actual</b>		<b>Chute Actual DEM</b>		<b>Chute Optimizado DEM</b>		
Placa de impacto	Pared frontal	Placa de impacto	Pared frontal	Pared Vertical	Pared Horizontal	Pared frontal
44,3	-	40,6	12,1	2,7	2,3	18,5

Tabla 20: Comparación de los resultados de tasas de desgaste entre chute actual, chute optimizado y datos de referencia.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 21 se comparan los resultados promedios del tiempo de recambio de placas entre LIGGGHTS y datos de referencia. La incorporación de la cama de piedras aumenta de sobremanera el tiempo de recambio de su revestimiento, el cual podría evaluarse con revestimiento de menor espesor para disminuir estos tiempos. La pared frontal fue evaluada con un espesor de 25 mm en su revestimiento dando como resultado un tiempo de recambio promedio que supera el año de funcionamiento.

Tiempo de recambio de placas ( <i>meses</i> )						
Datos de Referencia		Resultados de LIGGGHTS				
Chute Actual		Chute Actual DEM		Chute Optimizado DEM		
Placa de impacto	Pared frontal	Placa de impacto	Pared frontal	Pared Vertical	Pared Horizontal	Pared frontal
3,5	-	3,8	12,9	58,1	68,3	16,2

Tabla 21: Comparación de los resultados del tiempo de recambio de placas entre chute actual, chute optimizado y datos de referencia. Fuente: Elaboración propia.

## 8. Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se realizó la optimización de un punto de transferencia, estructura donde ocurre el intercambio de material entre correas de alimentación de minerales, mediante el método de elementos discretos (DEM). Utilizando de manera adecuada los recursos computacionales, el DEM permitió analizar un flujo de mineral de cobre en etapa de chancado primario con partículas desde 0,25 a 6 pulgadas de diámetro, al interior de un punto de transferencia específico, donde se pudo compararen base al desgaste y al comportamiento del mineral, una nuevageometría que permitiese optimizar el diseño del punto de transferencia, disminuyendola tasa de desgaste en las paredes interiores del punto de transferencia.

La simulación del punto de transferencia comienza con la etapa de validación del modelo, en la cual se definen los parámetros y propiedades del material, para poder simular el comportamiento del punto de transferencia mediante el programa LIGGGHTS y poder comparar con la información adquirida en terreno.

Una vez validado el modelo, se evaluó mediante simulación DEM el diseño actual del punto de transferencia, cuyo elemento principal de desgaste es una placa sobre la cual impacta el material proveniente de la correa de entrada, con una diferencia de altura de 4,3 metros respecto de la correa de salida. Los resultados obtenidos son consistentes al intervalo de referencia entregado por la operación minera, en condiciones de operación nominal. Los parámetros evaluados fueron las zonas de desgaste, la velocidad y el comportamiento del mineral.

Utilizando los criterios y recomendaciones de diseño de los puntos de transferencia, como la prevención de la acumulación del material, área de la sección transversal adecuada, control de flujo y minimización del desgaste, se realizaron propuestas de optimización en el punto de transferencia actual. La más importante es la incorporación de una zona para la formación de una cama de piedras, la cual forma una saliente dentro del conducto, para que el material subsiguiente se desplace sobre el material acumulado y no directamente sobre la palca de desgaste, reduciendo el desgaste en la zona de carga y la correa receptora.

Se evaluó el desarrollo de la nueva geometría mediante simulación DEM, que consideró iguales condiciones de operación y propiedades de los materiales. Se obtuvo un flujo de material de acuerdo a lo planeado, sobre la cama de piedras, disminuyendo los efectos del ángulo de impacto en las superficies del chute y por lo tanto disminuyendo el desgaste en un 93%. En la zona más afectada, la velocidad de salida del material se redujo un 56%. Debido a la optimización propuesta, la frecuencia de cambio de las placas de desgaste mencionada, disminuye en 15 veces respecto del tiempo actual.

Según Edison Collinao (Ingeniero Civil Mecánico) en la Revista Minería Chilena, el estudio DEM produce un incremento en la producción diaria y una reducción en el tiempo destinado al cambio de revestimientos y puede alcanzar la eliminación completa de los tiempos de detención debido a mantenciones no planificadas, originadas por el desgaste de los revestimientos.

Los siguientes pasos de este estudio abarcan el análisis de la estructura y elementos de sujeción que les dan soporte a las superficies internas del punto de transferencia debido a la modificación de sus dimensiones en la geometría e incorporación de la cama de piedras. Además, la información proporcionada por la simulación DEM puede ser usada en los análisis FEM para determinar los esfuerzos mecánicos a los cuales está sometido el punto de transferencia.

## 9. Bibliografía

- Ahues, D., & González, F. (2014). Análisis del movimiento de carga en molinos sag mediante método de elementos discretos. Tesis Ingeniería Civil Mecánica. Universidad de Santiago.
- Cáceres Soto, J., & Gamboa Gaioli, A. (2014). Estudio del movimiento de carga de un chancador primario de la gran minería. Tesis Ingeniería Civil Mecánica. Universidad de Santiago de Chile.
- Chilena, M. (6 de Octubre de 2015). <http://www.mch.cl>. Obtenido de <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/chancado-y-molienda-la-simulacion-al-servicio-de-un-mejor-proceso-2/>
- Colin, B. (2013). New Developments in Transfer Chute Design. *GULF Conveyor System*, 1-6.
- Consejo Minero. (2007). Mercado mundial de minerales y participación de Chile. *Minería en cifras*, 72.
- Consejo Minero. (2016). Minería en números.
- Duque, A. (2016). Rediseño de punto de transferencia en sistema de correas transportadoras de mineral de cobre. Tesis Ingeniería Civil Mecánica. Universidad de Chile.
- Engineering, Martin. (2002). *FOUNDATIONS 3, The Practical Resource for Total Dust & Material Control*. Neponset, Illinois, USA.
- Finnie, I. (1960). Erosion of surfaces by solid particles. *Wear* 3(2), 87-103.
- Gamboa, A., & Cáceres, J. (2014). Estudio del movimiento de carga en un chancador primario de la gran minería. Título Ingeniería Civil Mecánica. Universidad de Santiago. Santiago, Chile.
- Grima, A., & Wypych, P. (2011). Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle–structure interactions under impact conditions. *Powder Technology*, 1-12.
- Grima, A., Fraser, T., Hastie, D., & Wypych, P. (2011). Discrete element modelling: trouble-shooting and optimisation tool for chute design. *Beltcon 16 Proceedings*. 1-26.

- Hastie, D. &. (2009). Evaluation of Belt Conveyor Trajectories. *6th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids.*, 299-305.
- Hastie, D. B. (2010). Belt Conveyer Transfers: Quantifying and Modelling Mechanisms of Particle Flow. Doctor Philosophy. University of Wollongong. 378. Australia.
- Huque, S. T. (2004). Analytical and numerical investigations into belt conveyor transfers. *Tesis Doctoral. University of Wollongong, Faculty of Engineering, School of Mechanical, Materials & Mechatronic Engineering.*
- Ijurra Astudillo, K. (2016). *Análisis del efecto en la variación de velocidad, ángulo de levantador y porcentaje de carga a molino sag 36x17 pies mediante simulación DEM. Tesis Ingeniería de Ejecución en Minas.* Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Minas.
- Kloss, C. (2010). *LIGGGHTS(R)-PUBLIC Documentation, Version 3.X.*
- Kruse, D. (2009). Chute designs and trajectories using the discrete element method. Estados Unidos.
- Metso Minerals. (2002). Productos de protección contra el desgaste. *Productos Trellex*, 1-12.
- Navarro, H., & de Souza Braun, M. (2013). Linear and Nonlinear Hertzian Contact Models for Materials in Multibody Dynamics. En: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013): November 3-7, Ribeirão Preto, SP, Brazil: Department of Mechanical Engineering, São Carlos School of Engineering.
- Roberts, A. W. (2003). Chute performance and design for rapid flow conditions. *Chemical Engineering and Technology, Vol. 26, No. 2*, 163 - 70.
- Stuart-Dick, D., & Royal, T.A. (1992). Design Principles for Chutes to Handle Bulk Solids. *Bulk Solids Handling Vol. 12, No. 3*, 447-450.