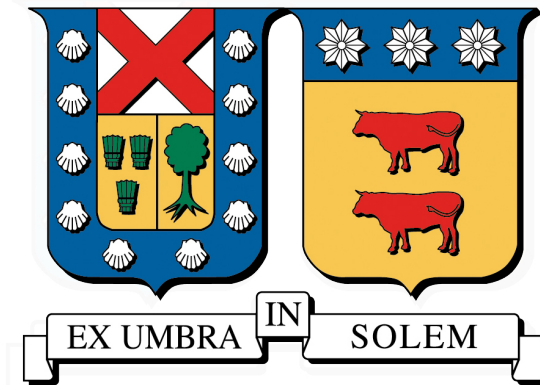


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**CALIBRACIÓN DE UN PROGRAMA BASADO EN EL MÉTODO
DE ELEMENTOS DISCRETOS PARA MODELAR EL DESGASTE
ABRASIVO A PARTIR DE MEDICIONES EXPERIMENTALES.**

PATRICIO ORLANDO MASCARÓ PROVOSTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : DR. ING. FRANCO PERAZZO M.
PROFESOR CORREFERENTE : DR. ING. CHRISTOPHER COOPER V.

MAYO 2017

Agradecimientos

Al café.





*A mi abuelita "Icha" y a mi abuelo "el
tata Perita"*

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio del manejo de materiales sólidos a granel es fundamental en la industria Chilena, en especial en la minería donde el manejo de minerales causa desgaste en equipos. Debido a esto es imprescindible contar con una herramienta que se pueda utilizar en las etapas de diseño, modificación y mantención de equipos.

En el presente trabajo se estudia el desgaste de una placa de acero por la acción de un flujo de material sólido a granel, utilizando un software basado en el método de elementos discretos que tiene incorporado el modelo de desgaste abrasivo de Archard. Con ello se obtiene la información acerca del desprendimiento de material en la probeta simulando el ensayo de la rueda de desgaste. En segundo lugar se proponen mejoras para el código fuente del software apuntando a optimizar el tiempo de ejecución del mismo.

En la etapa de calibración se utiliza una serie de ensayos para caracterizar mineral de cobre con granulometría fina 100 % menor a 6 [mm], mineral de cobre con granulometría gruesa 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm], y arena gruesa con granulometría 100 % igual a 1,6 [mm]. Para las simulaciones con mineral de cobre se utiliza dos formas de representar la partícula en el software, una es utilizando partículas esféricas y la otra es utilizando macropartículas compuestas por tres partículas esféricas, en la simulación de la arena gruesa se utiliza solo la representación con partículas esféricas usando radio de partícula constante.

Además se propuso una metodología de calibración para la constante de dureza específica de la probeta D , requerida por el modelo de desgaste de Archard, permitiendo realizar una comparación directa entre la tasa de desgaste efectiva del ensayo y la simulación.

Los resultados de la tasa de desgaste tanto en el ensayo como en la simulación y el error relativo con respecto al ensayo correspondiente, se muestran en la tabla 1.

Mineral	Tasa ensayo [g/s]	Representación	Tasa simulada [g/s]	Error %
Cobre fino	0.0009636	Esferas	0.0009417	2.27
		Macropartículas	0.0017684	83.5
Cobre grueso	0.0008091	Esferas	0.0008209	1.46
		Macropartículas	0.0007731	4.45
Arena gruesa	0.0018916	Esferas	0.0024188	27.9

Tabla 1: Tasas de desgaste obtenidas en la simulación.

También se trabajó sobre el código fuente del software con el fin de reducir los tiempos globales de cómputo implementando mejoras y optimizaciones, para ello se implementó marcadores de tiempo en las subrutinas del mismo, se analizó el perfil de tiempos demandados por el software en una simulación base y la utilización de memoria, posteriormente se implementaron tres cosas.

La primera es un algoritmo eficiente en cuanto a la búsqueda de partículas libres en la inyección, el cual no depende de la probabilidad de encontrar partículas libres consecutivas en la reserva de partículas, la segunda es la utilización de memoria asignable dependiendo de la cantidad de partículas requeridas por el usuario y por último la optimización del uso de memoria de la subrutina de detección de las zonas de contacto entre partículas y paredes cercanas. Todo esto redujo el tiempo de cómputo de la simulación base desde 337 [s] hasta 221 [s] siendo una mejora del 34,2 % del tiempo total.

En conclusión, respecto a la calibración el software es capaz de obtener resultados numéricos representando el desgaste en la probeta del ensayo simulado y demostrando que el modelo de Archard predice de manera satisfactoria el fenómeno estudiado. En cuanto a la optimización se logró realizar el perfil de tiempos de cómputo del software, el cual se utilizó para analizar y reducir, tanto el uso de memoria como el tiempo de cómputo de las subrutinas más costosas computacionalmente.

Palabras Clave. Calibración, Método de elementos discretos, Optimización.

ABSTRACT

The study of granular materials is fundamental in Chilean industry, because copper minery causes wear in equipment. Due to this is essential to have a tool in the design, modification and maintenance stages of equipment.

In this article wear in a steel plate is studied by the action of a flow granular material, using a software based on discrete element method with Archard's abrasive wear model. This gives the necessary information about material detachment of the steel plate. Secondly, improvements are proposed for the source code in aim to optimize the calculation time of this.

Calibration step, a series of tests are used to characterize three types of granular materials; one is fine grain copper size 100 % less than 6 [mm], second is thick grain copper 100 % between 12 [mm] and 6 [mm], and third is thick sand with size 100 % equal to 1,6 [mm]. For copper simulations the software used two forms of representing the particle, one is using spherical particles and the other is using three particles composed by three spherical particles, in the simulation of thick sand only used spherical single particles with constant radius.

In addition, a calibration method was proposed for the specific hardness constant D of steel plate, required by the Archard wear model, allowing a direct analysis between the effective wear rate of the test and simulation.

The results of wear rate of test, simulation and error between these, are shown in the next table.

Granular material	Exp rate [g/s]	Type of particle	Sim rate [g/s]	Error %
Fine Copper	0.0009636	Esferas	0.0009417	2.27
		Composed	0.0017684	83.5
Thick Copper	0.0008091	Single	0.0008209	1.46
		Composed	0.0007731	4.45
Thick Sand	0.0018916	Single	0.0024188	27.9

In this work on the source code in order to reduce the global computation time, by improvements and optimizations. The method of work was implement time markers in the subroutines, for make the time profile demanded by the software and analysed this, by this reason three things were implemented.

The first is an efficient algorithm for the free particle search injection from the particle reserve, the second is the use of allocatable memory by required number of particles in the simulation, and the last improve is the optimization of the memory usage by the contact detection subroutine (between walls and particles). All this improves reduced the simulation computing time from 337 [s] to 221 [s] this is a 34,2 % of the total time.

Finally, considering the calibration, the software is able to obtain numerical results to show wear in the steel plate simulation and Archard's model predicts correctly the wear on the steel plate test. As for the optimizacion, it was possible to perform the compute time profile, it was used to analyze and reduce the memory usage and the computational cost.

Keywords. Calibration, Discrete elements method, Optimization

Índice de Contenidos

1. Introducción	25
2. Objetivos	27
3. Estado del arte	28
3.1. Método de elementos discretos (MED).	28
3.1.1. Formulación del modelo MED.	28
3.1.2. Integración temporal.	31
3.1.3. Modelo de contacto.	31
3.1.4. Tipos de partículas.	33
3.2. Desgaste.	36
3.2.1. Desgaste por abrasión a dos cuerpos.	36
3.2.2. Desgaste por abrasión a tres cuerpos.	37
3.2.3. Desgaste acelerado.	38
3.2.4. Modelo de desgaste de Archard.	40
3.3. Software basado en el método de elementos discretos (MED).	42
3.3.1. Algunos Software basados en MED.	42
3.3.2. Como utilizar Software basados en MED	43
3.4. Un código en base al método de elementos discretos que permite modelar desgaste.	47
3.4.1. Descripción del funcionamiento del modelo numérico.	47
3.4.2. Metodología de calibración	50
3.4.3. Análisis de resultados.	66
4. Calibración del sólido a granel.	70
4.1. Granulometría	70
4.2. Inserción de partículas	71
4.3. Parámetros de tiempo.	72
4.4. Coeficientes de rebote.	74
4.4.1. Coeficiente de rebote entre placa-partículas.	74
4.4.2. Coeficiente de rebote entre partículas.	75
4.4.3. Selección de los coeficientes de rebote.	76
4.5. Coeficientes de roce.	77
4.5.1. Chute - partículas.	77
4.5.2. Rueda - partículas.	79

4.5.3. Placa de desgaste - partículas.	80
4.5.4. Entre partículas.	85
4.5.5. Selección de coeficientes de roce.	91
4.6. Módulos elásticos.	92
4.7. Calibración de la dureza específica acero SAE-A37.	93
5. Geometría y representación del ensayo.	95
5.1. Superficies y enmallado superficial.	95
5.1.1. Placa de desgaste.	95
5.1.2. Rueda giratoria.	96
5.1.3. Chute tolva rectangular.	97
6. Resultados de la simulación del ensayo.	101
6.1. Hardware y software.	101
6.2. Resultados	102
6.2.1. Mineral fino de cobre.	102
6.2.2. Mineral grueso de cobre.	105
6.2.3. Arena gruesa.	108
6.3. Discusión y análisis.	110
7. Optimización y mejoras.	111
7.1. Modularización del código.	111
7.1.1. Perfil de tiempos del código.	112
7.2. Mejoras.	114
7.2.1. Memoria asignada sobre partículas.	114
7.2.2. Inyección de partículas.	115
7.3. Optimización.	120
7.3.1. Análisis de la subrutina 2-3 Detección de zonas de contactos.	120
8. Resultados de la optimización y mejoras.	124
9. Conclusiones.	127
10. Futuras líneas de investigación	129
Bibliografía	131
A. Lista de variables que caracterizan un sólido a granel.	134
B. Descripción y funcionamiento de las variables del código.	136
C. Diagramas de flujo del software.	147

**D. Configuración de la geometría
para calibrar coeficiente de roce entre partículas.**

155



Índice de Tablas

1.	Tasas de desgaste obtenidas en la simulación.	4
3.1.	Ensayos de caracterización de materiales para aplicaciones MED	45
3.2.	Condiciones de operación del ensayo de la rueda de desgaste.	67
3.3.	Resumen de las tasas de desgaste obtenidas en el ensayo de la rueda de desgaste (M. Erazo, 2013) y la simulación (Frederik Knop, 2015)	68
3.4.	Variación de la tasa de desgaste del ensayo y las simulaciones.	69
4.1.	Configuración de granulometría utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % bajo 6 [mm].	70
4.2.	Configuración de granulometría utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].	71
4.3.	Configuración de granulometría utilizada para el ensayo del arena gruesa.	71
4.4.	Configuración de inyección utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % bajo 6 [mm].	71
4.5.	Configuración de inyección utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].	72
4.6.	Configuración de inyección utilizada para el ensayo del arena gruesa.	72
4.7.	Configuración de tiempo utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % bajo 6 [mm].	73
4.8.	Configuración de tiempo utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].	73
4.9.	Configuración de tiempo utilizada en el ensayo del arena gruesa.	73
4.10.	Configuración de los coeficientes de rebote utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % menor a 6 [mm].	76
4.11.	Configuración de los coeficientes de rebote utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].	77
4.12.	Configuración de los coeficientes de rebote utilizados en el ensayo del arena gruesa.	77
4.13.	Comparativa entre las pendientes obtenidas en el experimento y en la simulación para la granulometría menor a 6 [mm].	89
4.14.	Comparativa entre las pendientes obtenidas en el experimento y en la simulación para la granulometría entre 12[mm] y 6 [mm].	90
4.15.	Comparativa entre las pendientes obtenidas en el experimento y en la simulación para la granulometría correspondiente a arena.	90

4.16. Configuración de los coeficientes de roce utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % menor a 6 [mm].	91
4.17. Configuración de los coeficientes de roce utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].	91
4.18. Configuración de los coeficientes de roce utilizados en el ensayo del arena gruesa.	92
4.19. Configuración de los módulos elásticos utilizados en las simulaciones.	92
4.20. Datos medidos para el desgaste de la probeta de acero SAE-A37 utilizando mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] para desgastar la probeta.	93
4.21. Datos calculados con la información del desgaste de la probeta de acero SAE-A37 utilizando mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] para desgastar la probeta.	93
4.22. Tasa de desgaste obtenida a diferentes valores de dureza específica para representar la probeta de acero SAE-A37, utilizando mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] para desgastar la probeta.	94
5.1. Configuración de las variables que controlan la posición de “ <i>placader.stl</i> ”.	96
5.2. Configuración de las variables que controlan la posición de “ <i>rueda.stl</i> ”.	97
5.3. Configuración de las variables asociadas a la posición del chute estático colocándolo arriba de del chute de tolva rectangular.	98
5.4. Configuración del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.	99
6.1. Datos experimentales obtenidos por M. Erazo para el mineral fino de cobre.	104
6.2. Comparativa entre las tasas de desgaste simuladas y la experimental para la granulometría fina.	105
6.3. Datos experimentales obtenidos por M. Erazo para el mineral grueso de cobre.	107
6.4. Comparativa entre las tasas de desgaste simuladas y la experimental para la granulometría gruesa.	108
6.5. Datos experimentales obtenidos por M. Erazo para el arena gruesa.	109
6.6. Comparativa entre las tasas de desgaste simuladas y la experimental para la granulometría gruesa.	110
7.1. Mediciones para obtener el perfil del código de las subrutinas de nivel 1	112
7.2. Mediciones para obtener el perfil del código de las subrutinas de nivel 2	113
7.3. Variables que se resetean a cero al inicio de la subrutina 2-3 determinación de las zonas de contacto	121
8.1. Perfil de tiempo de las subrutinas de nivel 1 después de la optimización.	124
8.2. Perfil de tiempo de las subrutinas de nivel 2 después de la optimización.	125
A.1. Tabla de propiedades generales requeridas por programas basados en MED.	135
B.1. Variables asociadas al ensayo y granulometría del sólido a granel.	137
B.2. Variables asociadas a la inserción de partículas en la simulación.	139
B.3. Variables asociadas a los límites del volumen de control en la simulación.	139

B.4. Variables asociadas a los parámetros de tiempo en la simulación.	140
B.5. Variables asociadas a los parámetros de la malla “ <i>placader.stl</i> ”.	140
B.6. Variables asociadas a los parámetros de la malla “ <i>rueda.stl</i> ”.	141
B.7. Variables asociadas a los parámetros de la malla “ <i>chute.stl</i> ”.	141
B.8. Control de la densidad y radio de las partículas de forma independiente .	141
B.9. Variables de control sobre los coeficientes de rebote entre partículas, entre las partículas y los elementos de malla.	142
B.10. Variables de control sobre los coeficientes de roce entre partículas, entre las partículas y los elementos de malla.	142
B.11. Módulos elásticos de los elementos que existen en la simulación.	143
B.12. Variables extra que son específicas para el ensayo de rebote y ángulo de roce.	143
B.13. Variables extra que son específicas para el ensayo de rebote y ángulo de roce.	143
D.1. Configuración de las variables asociadas a la posición del cilindro colocándolo arriba en la esquina donde se juntan las paredes de la base que recibe el material granular.	156
D.2. Configuración de las variables asociadas a la posición de la superficie cuadrada plana colocándola abajo del cilindro como tapa.	157
D.3. Configuración de las variables asociadas a la posición del recipiente que recibe el material granular colocándolo abajo del cilindro.	157
D.4. Configuración del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.	158

Índice de Figuras

1.1. Ejemplos de simulación hechas utilizando software MED.	25
3.1. Esquema de interacción MED. p_i : i -ésima partícula involucrada en la simulación. p_j : j -ésima partícula involucrada en la simulación. c_n : Elemento pistón correspondiente a la viscosidad del medio. μ : Elemento de roce involucrado entre partículas. k_n : Resorte que representa la interacción normal. k_T : Resorte que representa la interacción tangencial.	29
3.2. Esquema de fuerzas actuando sobre las partículas.	30
3.3. Ejemplo de interferencia entre partícula-partícula y partícula-pared.	32
3.4. Modelo lineal para la fuerza normal en función de la interferencia δ	32
3.5. Modelo de contacto no lineal de Hertz en función de la interferencia δ	33
3.6. Detalle de macropartícula compuesta por partículas esféricas utilizada en MED.	34
3.7. Ejemplo de partícula poliédrica utilizada en DEM.	34
3.8. Ejemplo de partícula de superficie curvada cerrada	35
3.9. Simulación de operación de un molino SAG.	36
3.10. Etapas del desgaste por abrasión a dos cuerpos.	37
3.11. Etapas del desgaste por abrasión a tres cuerpos.	37
3.12. Esquema del ensayo de la rueda de desgaste utilizada por la norma ASTM G65-04.	39
3.13. Máquina modificada por (M. Erazo, 2013) para el ensayo de la rueda de desgaste.	39
3.14. Ejemplo de huella de desgaste debido a desgaste por tres cuerpos en el ensayo de la rueda.	40
3.15. Diagrama elemental sobre la utilización de un software basado en MED.	44
3.16. Distribución de velocidades en un flujo granular en una simulación de un chute de traspaso.	46
3.17. Detalle de zona de desgaste por cambio de velocidad en un chute de traspaso.	46
3.18. Comparativa entre el esquema de la máquina real y la simulación del ensayo de desgaste.	47
3.19. Diagrama de flujo general del software.	50
3.20. Determinación de las cotas principales de una muestra de mineral de cobre entre 6 y 12 [mm].	51
3.21. Error de forma en función del factor de interferencia entre partículas, utilizando diferente cantidad de partículas.	51

3.22. Esquemas de las partículas simuladas con MED para representar las partículas reales con la restricción del tamaño del tamiz 53

3.23. Esquema del ensayo para medir el ángulo de reposo propuesto. 54

3.24. Esquema de la simulación y el experimento realizado que permite medir el ángulo de reposo y determinar el coeficiente de roce entre partículas. **a) Cilindro lleno de material hasta la altura h_1 . b) Ángulo de reposo en la simulación. c) Ángulo de reposo en el experimento.** 55

3.25. Visualización de la dispersión en función de los coeficientes de roce interno y resistencia a la rodadura. 56

3.26. Posición de la placa en función del tiempo, mostrando la estabilización del flujo después de 0,2 [s]. 57

3.27. Material pasado en función del tiempo en la simulación de mineral de cobre. 57

3.28. Desgaste acumulado en función del tiempo obtenido en la simulación de mineral de cobre. 58

3.29. Esquema de búsqueda de partículas o elementos vecinos. 59

3.30. Desplazamiento de los nodos que pertenecen al elemento de malla A_i . . . 61

3.31. Interconexión de los nodos para dar continuidad a la superficie. 62

3.32. Detalle de la zona impactada coloreada por la profundidad del desgaste, utilizando la información del desplazamiento de los vecinos. 63

3.33. Detalle de la zona impactada coloreada por el impacto, sin utilizar la información del desplazamiento de los vecinos. 63

3.34. Patrón de las zonas desgastadas de la probeta donde se aprecia cada patrón y el tiempo de simulación necesario para desgastar 0,2 [g] de probeta . . . 64

3.35. Placas de desgaste obtenidas en el ensayo de la rueda de desgaste utilizando diferentes tipos de mineral. 65

3.36. Patrón de las zonas impactadas por mineral de cobre grueso y fino, representado con partículas compuestas y esféricas, para distintos coeficientes de roce entre la probeta y el sólido a granel. (Frederik Knop, 2015) 66

3.37. Comparativa entre la huella de desgaste del ensayo y la simulación. (Frederik Knop, 2015) 67

3.38. Gráfica de la tabla 3.3 68

3.39. Gráfica de la tabla 3.4 69

4.1. Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre placa partícula utilizando partículas esféricas 74

4.2. Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre placa partícula utilizando macropartículas compuestas 75

4.3. Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre partículas utilizando partículas esféricas 75

4.4. Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre partículas utilizando macropartículas compuestas 76

4.5. Esquemas del chute coloreando los distintos aceros utilizados en su construcción. 78

4.6. Deslizamiento de la partícula sobre el enmallado en la simulación. 78

4.7. Módulo de la velocidad en función del ángulo de giro de la placa utilizando distintos coeficientes de roce.	79
4.8. Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.	80
4.9. Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.	81
4.10. Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.	82
4.11. Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.	83
4.12. Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para el arena gruesa.	84
4.13. Representación visual del coeficiente de roce y eficiencia de rebote sobre la malla de la simulación	85
4.14. Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.	86
4.15. Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas compuestas.	86
4.16. Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm], partículas esféricas.	87
4.17. Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm], partículas compuestas.	87
4.18. Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría arena 1,6 [mm], partículas esféricas.	88
4.19. Comparativa entre la foto tomada del experimento y las simulaciones para la granulometría 100 % menor a 6 [mm].	89
4.20. Comparativa entre la foto tomada del experimento y las simulaciones para la granulometría 100 % entre 6 [mm] y 12 [mm].	89
4.21. Comparativa entre la foto tomada del experimento y la simulación del arena.	90
5.1. Enmallado de la placa de desgaste utilizada en la simulación.	96
5.2. Enmallado de la rueda giratoria utilizada en la simulación.	97
5.3. Enmallado del chute estático utilizado en la simulación.	98
5.4. Conjunto de las tres geometrías que representan el ensayo de la rueda de desgaste.	99
5.5. Detalle del contorno del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.	100
6.1. Posición de la placa en función del tiempo, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.	102
6.2. Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando partículas esféricas para representar la granulometría fina.	103
6.3. Posición de la placa en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría fina, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.	103

6.4. Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría fina. 104

6.5. Posición de la placa en función del tiempo, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado. 105

6.6. Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando partículas esféricas para representar la granulometría gruesa. 106

6.7. Posición de la placa en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría gruesa, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado. 106

6.8. Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría gruesa. 107

6.9. Posición de la placa en función del tiempo, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado. 108

6.10. Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando partículas esféricas para representar la arena de granulometría constante. 109

7.1. Perfil del código en las subrutinas de nivel 1 113

7.2. Perfil del código en las subrutinas de nivel 2 114

7.3. Diagrama de la subrutina **1-1 seteo de variables** antes de la modificación. 115

7.4. Diagrama de la subrutina **1-1 seteo de variables** después de la modificación propuesta en este trabajo. 115

7.5. Diagrama de la subrutina **2-2 inserción de partículas** antes de la modificación. Se puede ver más grande en la figura C.5 116

7.6. Modelo de inyección de partículas 117

7.7. Diagrama de la subrutina **2-2 inserción de partículas** después de la modificación en este trabajo. 119

7.8. Diagrama de la subrutina **2-3 determinación de las zonas de contacto**. Se puede ver de mejor forma el diagrama en la figura C.7 120

8.1. Perfil del código en las subrutinas de nivel 1 después de la optimización. . 124

8.2. Comparativa de los perfiles del código en las subrutinas de nivel 1 antes y después de la optimización. 125

8.3. Perfil del código en las subrutinas de nivel 2 después de la optimización. . 126

8.4. Comparativa de los perfiles del código en las subrutinas de nivel 2 antes y después de la optimización. 126

C.1. Diagrama de la subrutina **1-1 seteo de variables** antes de la modificación. 147

C.2. Diagrama de la subrutina **1-1 seteo de variables** después de la modificación propuesta en este trabajo. 147

C.3. Diagrama de la subrutina **1-2 lectura de malla** preparada para leer formato *.stl*. 147

C.4. Diagrama de la subrutina **2-1 desplazamientos de malla**. 148

C.5. Diagrama de la subrutina **2-2 inserción de partículas** antes de la modificación. 149

C.6. Diagrama de la subrutina **2-2 inserción de partículas** después de la modificación en este trabajo. 150

C.7. Diagrama de la subrutina 2-3 determinación de las zonas de contacto.	151
C.8. Diagrama de la subrutina 2-4 búsqueda de vecinos.	152
C.9. Diagrama de la subrutina 2-5 Cálculos sobre partículas.	153
C.10. Diagrama de la subrutina 2-7 integración de la posición	153
C.11. Diagrama de la subrutina 2-8 eliminación de partículas	153
C.12. Diagrama de la subrutina 2-9 Cálculo de desgaste acumulado	154
D.1. Enmallado del cilindro utilizado en la calibración.	155
D.2. Enmallado del cuadrado que evita la caída del material durante el ensayo de ángulo de reposo	156
D.3. Enmallado de la base que recibe el material en el ensayo de ángulo de reposo.	157
D.4. Conjunto de las tres geometrías que representan el ensayo de la rueda de desgaste.	158
D.5. Detalle del contorno del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.	159

1 | Introducción

En Chile, según estadísticas del 2011-2012, solo en minería se mueven alrededor de 2 millones de toneladas diarias de mineral, todo este material en contacto con equipos de transporte, manejo, distribución, chancado y molienda entre otros, provoca de forma natural desgaste en sus partes y piezas, lo que afecta la disponibilidad, productividad y costos de operación por esta razón es imprescindible contar con una herramienta numérica capaz de predecir el desgaste para poder estimar la pérdida de material asociado, utilizando la información generada para las etapas de diseño, modificación y mantención de equipos.

Una herramienta muy utilizada para ello es el método de elementos discretos DEM por sus siglas en inglés (ver capítulo 3.1), el cual consiste en modelar la interacción de partículas distintas, sin malla e independientes entre sí, aplicando las leyes de Newton a cada una para predecir la posición relativa de las mismas luego de la interacción permitiendo asignarle propiedades características de comportamiento a las partículas como por ejemplo: sólido rígido, semi-rígido, elástico, viscoso o sólido a granel, siendo este último el que contempla todas las propiedades anteriormente mencionadas ya que permite modelar rodadura, interacción de fuerzas normal-tangencial y movimientos relativos, tal cual lo hace un sólido a granel.

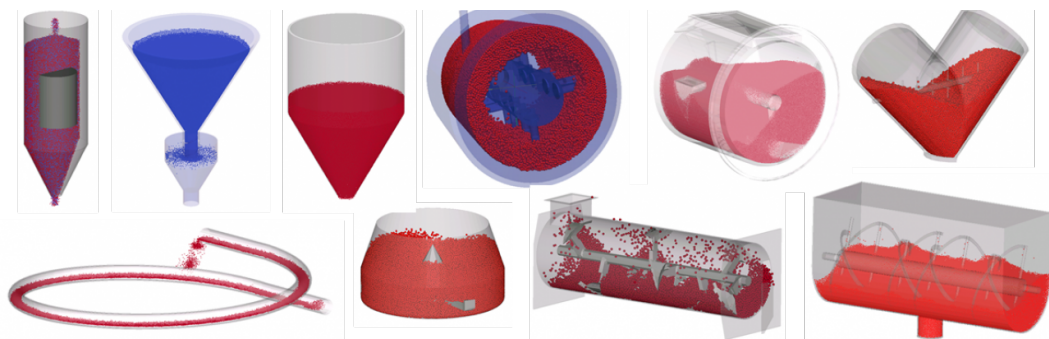


Figura 1.1: Ejemplos de simulación hechas utilizando software MED.

En la actualidad existen herramientas computacionales que utilizan este método para modelar el comportamiento de materiales granulares y que pueden predecir zonas de desgaste que se producen por el transporte de materiales sólidos a granel, algunos ejemplos de

software son: *LIGGGHTS*, *EDEM*, *ESyS Particle*, *Rocky*, *NEWTON DS*, *YADE*, entre otros, donde cada uno de ellos requiere parámetros de entrada que se deben calibrar con el fin de hacer suficientemente representativo el sólido a granel para obtener una simulación adecuada.

En DIMEC de la UTFSM se han realizado esfuerzos tanto para medir experimentalmente el desgaste como también para desarrollar un software numérico que permita modelar este fenómeno, durante el desarrollo de la tesis de Frederik Knop ([Frederik Knop, 2015](#)) se presenta un software que simula el comportamiento de sólidos a granel mediante el método de elementos discretos y además de representar el desgaste mediante *la variación de la tasa de desgaste* que se genera al contrastar los resultados del ensayo de la rueda de desgaste ([Norma ASTM g65 04, 2006](#)) y la simulación numérica obtenida por el software.

En este trabajo se utiliza dicho software y la metodología de calibración presentadas en la tesis mencionada, recalibrando el sólido a granel para representar el ensayo de la rueda de desgaste con la diferencia que se propone un método de análisis del desgaste utilizando directamente *la tasa de desgaste efectiva* para contrastar los resultados entre el ensayo y la simulación, esto evita la necesidad de retroalimentar el ensayo de la rueda de desgaste para poder hacer el análisis de *la variación de las tasas de desgaste*.

Luego con el fin de reducir el tiempo de cómputo se analizan las rutinas del software expuesto anteriormente para de obtener un diagrama del consumo de tiempo computacional del mismo, destacando de forma eficiente las subrutinas que son más costosas para intentar aplicar nuevos algoritmos numéricos y/o utilización eficiente de memoria.

2 | Objetivos

En el contexto del manejo de materiales sólidos a granel, en Chile, es necesario contribuir a la ingeniería, investigación e industria nacional mediante el desarrollo de una herramienta numérica eficiente capaz de unir el método de elementos discretos y el modelo de desgaste abrasivo adhesivo de Archard. El software en desarrollo en DIMEC de la UTFSM es capaz de determinar zonas y tasa de desgaste de los elementos de máquinas que estén sometidos a la interacción con materiales sólidos a granel simulando condiciones de operación, para ello es necesario:

Calibración de un software basado en el método de elementos discretos para modelar desgaste abrasivo a partir de mediciones experimentales.

- Graduar las propiedades de los materiales granulares en el software.
- Estudiar teóricamente del modelo de desgaste abrasivo de Archard.
- Comparar los resultados de volumen, patrón y tasa de desgaste numéricos versus volumen, patrón, y tasa de desgaste experimentales.

Reducción del tiempo de cómputo del software.

- Medir y realizar un perfil de tiempo de cómputo requerido por el software y sus subrutinas.
- Optimizar algoritmos específicos del código desarrollado.

3 | Estado del arte

3.1. Método de elementos discretos (MED).

El método de elementos discretos fue introducido por Cundall (Cundall, 1971) para el análisis de mecánica de rocas y ciencias de la minería, quien en primera instancia desarrolló el modelo en dos dimensiones simulando el material granular como discos de radio constante con solo un modelo de contacto en dirección normal, luego en (Cundall PA., Strack ODL, 1979) se aplica a la mecánica de suelos, demostrando ser una herramienta versátil así el método ha sido utilizado por una gran variedad de aplicaciones reportadas en la literatura en un amplio rango de industrias que se ha aplicado (M. Marigo, E.H. Stitt, 2015), tales son: química, farmacéuticas, cerámicas, metal, alimentos, agricultura e ingeniería civil. Muchas simulaciones MED han sido publicadas para modelar diversos procesos granulares como lo es la cominución, geomateriales (CHunt, S. P., Meyers, A. G. and Louchnikov, V., 2006), cerámicas (CFrederic, S. H., Donze, V. and Daudeville, L., 2004) y concretos (Tan Yuanqiang, Yang Dongmin, Sheng Yong, 2008).

El método de elementos discretos es capaz de entregar información necesaria para observar mecanismos gobernados por flujos de partículas, donde la naturaleza discreta de las simulaciones numéricas sirve para la comprensión fundamental del movimiento granular y pueden ayudar a mejorar el diseño y operación de sistemas que involucran material granular.

Las claves en la aplicación del método de elementos discretos son: el aumento de la capacidad computacional y la posibilidad de modelar equipos de geometría y cinemática compleja, así con el surgimiento de nuevas tecnologías de cómputo se han ido ampliando más aún las posibilidades del método.

3.1.1. Formulación del modelo MED.

En este método se suponen las siguientes propiedades básicas que lo definen de forma global y a grandes rasgos:

1. Las partículas como elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema

complejo de partículas.

2. Estos elementos se desplazan independientes unos de otros.
3. En este método a nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido donde cada elemento discreto se considera un cuerpo rígido en sí.

El modelo constitutivo MED define el comportamiento global de las partículas se establece en las zonas de contacto entre partículas y se puede representar como elementos dos resortes k_n y k_T representando la interacción normal-tangencial entre las partículas, (ver figura 3.1).

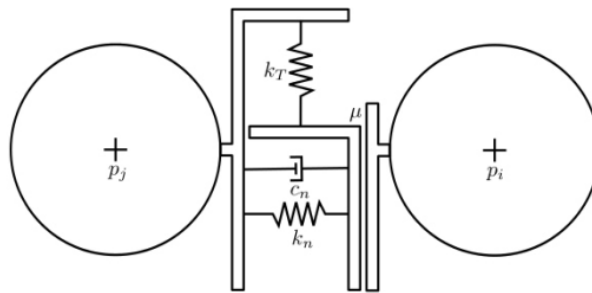


Figura 3.1: Esquema de interacción MED.

p_i : i -ésima partícula involucrada en la simulación. p_j : j -ésima partícula involucrada en la simulación. c_n : Elemento pistón correspondiente a la viscosidad del medio. μ : Elemento de roce involucrado entre partículas. k_n : Resorte que representa la interacción normal. k_T : Resorte que representa la interacción tangencial.

1. Resortes (k_n y k_T): Los resortes describen el comportamiento elástico durante el contacto entre cada partícula, uno en la dirección normal y otro en la dirección tangencial al contacto y corresponden a la descomposición de fuerzas durante el contacto.
2. Pistones (c_n): Estos elementos simulan la viscosidad intrínseca del medio por el que se mueven las partículas, siendo este el elemento que proporciona gran versatilidad pudiendo aplicar el método a un gran número de problemas mecánicos, tanto elásticos como viscoelásticos.
3. Elemento de Fricción (μ): Estos elementos describen la cohesión y el fallo de material en la zona de contacto entre las partículas, pudiendo simular rotura desprendiendo partículas del medio.

En MED, cada partícula puede tener dos tipos de movimiento: traslación y rotación, este movimiento resulta al interactuar entre las partículas vecinas, paredes y/o con un fluido

circundante, donde intercambian momento y energía, por lo tanto las fuerzas resultantes sobre una partícula se pueden determinar a partir de la interacción con las partículas en contacto y con el fluido adyacente.

Basando estas consideraciones, se puede utilizar la segunda ley de Newton para describir el movimiento de las partículas individuales, suponiendo que el sistema está formado por n elementos discretos tal que cada partícula i tiene una masa m_i que se mueve con una aceleración a_i , se somete a una fuerza f_i y siendo I_i el momento de inercia de cada partícula.

$$m_i \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sum_j F_{i,j}^c + \sum_k F_{i,k}^{nc} + F_i^f + F_i^g \quad (3.1)$$

$$I_i \frac{\partial \omega_i}{\partial t} = \sum_j M_{i,j} \quad (3.2)$$

Donde $F_{i,j}^c$ y $M_{i,j}$ son las fuerzas de contacto y torque actuando entre la i -ésima y la j -ésima partícula o pared, $F_{i,k}^{nc}$ son las fuerzas de no-contacto actuando sobre la partícula i -ésima por algún otra k -ésima o incluso el medio, F_i^f es la fuerza de interacción entre el fluido y la i -ésima partícula, finalmente F_i^g es la fuerza gravitacional sobre la i -ésima partícula,

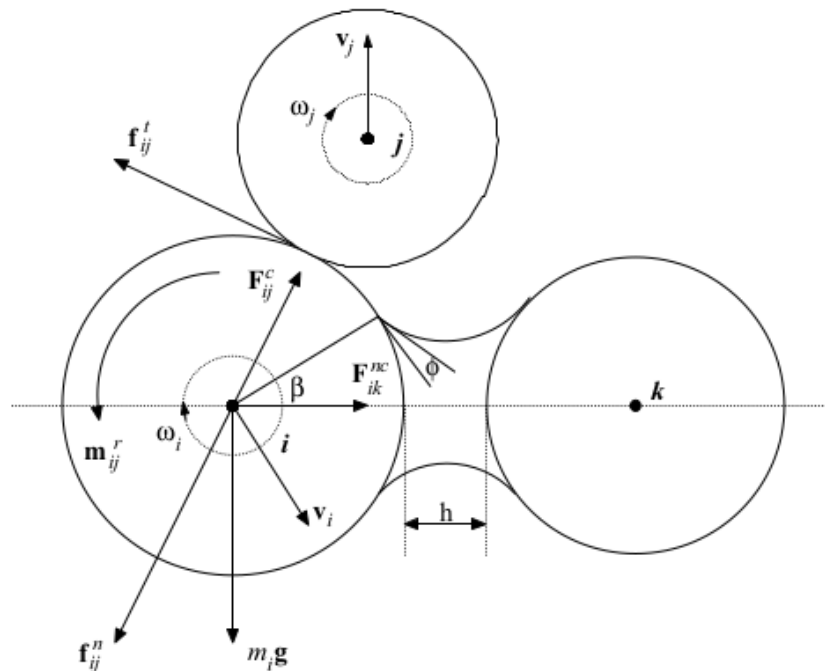


Figura 3.2: Esquema de fuerzas actuando sobre las partículas.

Se muestran en la figura 3.2, donde v_i y v_j son las velocidades tangenciales de las i -ésima y j -ésima partículas respectivamente, ω_i y ω_j son las velocidades angulares de

las i -ésima y j -ésima partículas respectivamente, h es referencial para determinar que la i -ésima partícula está sin contacto de la j -ésima partícula o medio pero aún así hay fuerza entre si (H.P. Zhu, Z.Y. Zhou, R.Y. Yang, A.B. Yu, 2007).

3.1.2. Integración temporal.

Debido a la condición de contacto frecuente en periodos cortos de tiempo y corto periodo de simulación es posible utilizar un método de bajo orden considerando que las escalas de tiempo de simulación son pequeñas como para percibir errores de conservación de energía y momento. Teniendo esto en cuenta se utiliza un esquema de integración temporal de Euler explícito.

Se muestran las ecuaciones resultantes de la integración del movimiento traslacional de la partícula. La nueva aceleración a_i^{t+1} se obtiene de la fuerza normal resultante F_i y la masa m_i . Con esto se calcula la velocidad v_i^{t+1} y la nueva posición x_i^{t+1} con un paso de tiempo h .

$$a_i^{t+1} = \frac{F_i}{m_i} \quad (3.3)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + a_i^{t+1}h \quad (3.4)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}h \quad (3.5)$$

Análogamente se despejan las ecuaciones del movimiento rotacional que dependen del momento de inercia I_i , del momento M_i , donde $\dot{\omega}_i^{t+1}$ es la nueva aceleración angular, ω_i^{t+1} es la nueva velocidad angular y θ_i^{t+1} es la nueva posición angular para la i -ésima partícula.

$$\dot{\omega}_i^{t+1} = \frac{M_i}{I_i} \quad (3.6)$$

$$\omega_i^{t+1} = \omega_i^t + \dot{\omega}_i^{t+1}h \quad (3.7)$$

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i^t + \omega_i^{t+1}h \quad (3.8)$$

3.1.3. Modelo de contacto.

Según la formulación MED 3.1.1 es necesario utilizar un modelo de contacto que utilice la información de la interferencia δ que se genera en el contacto y la velocidad relativa para calcular la fuerza de contacto normal F_n , entre partículas y contacto entre partículas y pared. Ver figura 3.3.

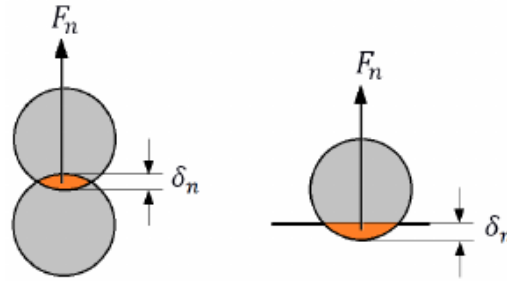


Figura 3.3: Ejemplo de interferencia entre partícula-partícula y partícula-pared.

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestra el comportamiento de la fuerza normal de una partícula al rebotar sobre una superficie horizontal, estos comportamientos corresponden al modelo lineal y al modelo no lineal de Hertz respectivamente, donde el distanciamiento de las curvas se debe al efecto de la fuerza viscosa que se opone al movimiento relativo durante el contacto.

3.1.3.1. Modelo lineal.

El modelo de contacto lineal solo considera el efecto de la interferencia δ en el contacto pero no considera los efectos del aumento del área, esto se observa en la figura 3.4.

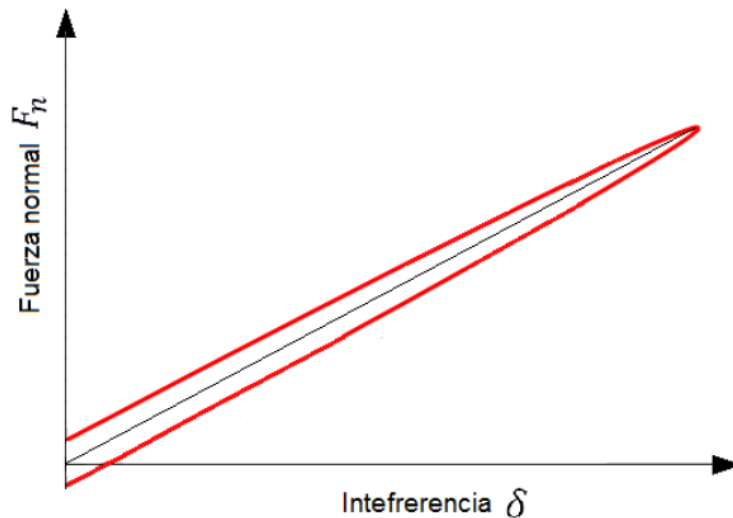


Figura 3.4: Modelo lineal para la fuerza normal en función de la interferencia δ .

3.1.3.2. Modelo de Hertz.

El modelo de contacto no lineal de Hertz (G. Hu, Z. Hu, B. Jian, L. Liu, H. Wan, 2011), considera el efecto del aumento del área de contacto de las partículas en función de la

interferencia δ , en el cálculo de las fuerzas viscosas y elásticas, como se observa en la figura 3.5.

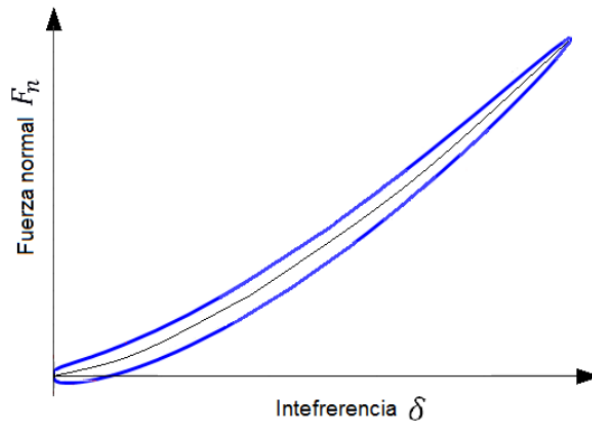


Figura 3.5: Modelo de contacto no lineal de Hertz en función de la interferencia δ .

3.1.4. Tipos de partículas.

Existen distintos tipos de partículas utilizadas en MED para tener distintas formas de representar la geometría de la partícula real del sólido a granel, esto permite simular un comportamiento acercado a la realidad debido a la física implementada en la partícula.

3.1.4.1. Partículas esféricas.

Esta es la representación más sencilla de partícula, junto con eso es simple en la programación de detección, cálculo de contactos (Cundall, 1971) y permite tener un bajo costo computacional. Pero es necesario inducir un coeficiente de resistencia a la rodadura para simular la irregularidad del material real (S. Luding, 2008).

3.1.4.2. Partículas compuestas de partículas esféricas o macropartículas.

Esta partícula consta de un conjunto de partículas representando la forma irregular del material simulado en comparación con las partículas esféricas simples. La técnica consta en transferir las fuerzas y momentos de las partículas que la componen al centro de masa del conjunto, donde se mueven los elementos en función de las rotaciones y desplazamientos del centro de masa de la partícula compuesta.

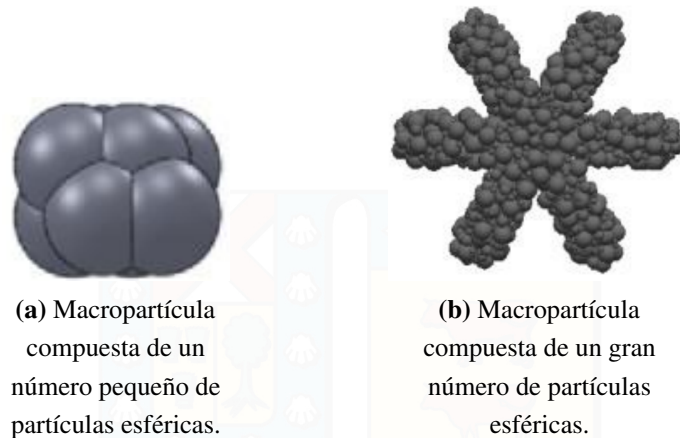


Figura 3.6: Detalle de macropartícula compuesta por partículas esféricas utilizada en MED.

Esta técnica permite utilizar el mismo algoritmo de búsqueda de contactos que para las partículas esféricas y permite la posibilidad de simular el efecto de cominución del material sólido a granel desprendiendo las partículas de la macropartícula.

3.1.4.3. Partícula poliédrica.

La partícula poliédrica se utiliza para representar geometrías de sólidos irregulares como rocas y minerales, obteniendo una mejor aproximación del comportamiento de estos materiales. Su problema es que requiere un elevado costo computacional en la detección y generación de contactos limitando el uso en simulaciones extensas (D. Zhao, 2006).



Figura 3.7: Ejemplo de partícula poliédrica utilizada en DEM.

3.1.4.4. Partícula de superficie curvada cerrada.

La partícula de superficie curvada cerrada se utiliza para representar geometrías no esféricas. Un método muy utilizado es implementar funciones de superficie cerrada a partir de elipsoides, pudiendo generar elipsoides asimétricos donde la condición principal es tener continuidad al momento de unir las superficies en los planos principales. Pero en teoría

cualquier función que pueda generar una superficie curva cerrada sirve para generar una partícula de este tipo (R.W. J. Peters, M. Hopkins, R. Kala, 2009).



Figura 3.8: Ejemplo de partícula de superficie curvada cerrada

El problema, al igual que la partícula poliédrica, es que requiere un elevado costo computacional en la detección de contactos, limitando la capacidad de modelar elevado número de partículas.

3.2. Desgaste.

El desgaste es un fenómeno que ocurre al tener al menos dos cuerpos en contacto y consta en el arranque de material de un cuerpo debido a la acción de otro cuerpo, generando debilitamientos, pérdida de tolerancias y hasta la integridad del elemento de máquina desgastado.

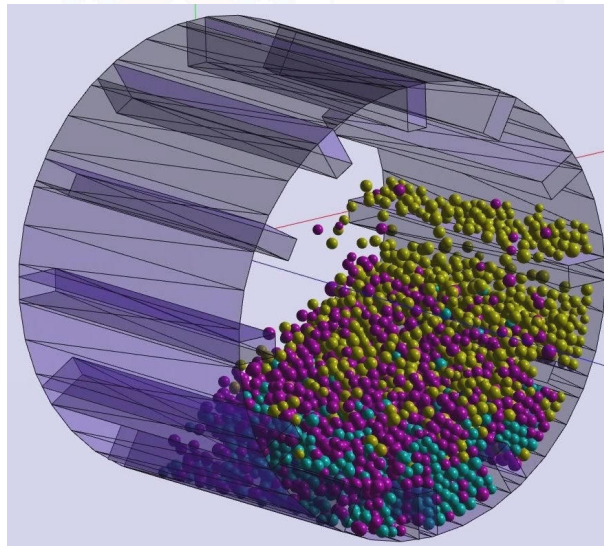


Figura 3.9: Simulación de operación de un molino SAG.

Actualmente existen ensayos que permiten estudiar el desgaste abrasivo (C. Spero, D.J. Hargreaves, R.K. Kirkcaldie, H.J. Flitt, 1991) pero es el ensayo de la rueda de desgaste es el que muestra potencial por el control y manejo de las variables que afectan el desgaste abrasivo incluyendo un amplio rango de fuerzas aplicadas (P. Radziszewski, 2009).

3.2.1. Desgaste por abrasión a dos cuerpos.

El desgaste por abrasión a dos cuerpos es un modelo de desgaste en el cual existe interacción entre dos cuerpos de los cuales uno pierde y otro recibe material (J. Denape, 2014), este modelo de desgaste se puede resumir en tres etapas a nivel microscópico, las cuales son:

1. Formación de contacto: Choques e interpenetración de asperezas donde se conforma el área real de contacto para producir la huella, aplastamiento y giros, estabilizando las deformaciones plásticas y elásticas.
2. Junta adhesiva: Contacto íntimo entre átomos para la formación de la junta adhesiva entre las asperezas.

3. Separación del contacto: donde la junta adhesiva se separa arrancando asperezas.

Estas se pueden observar en la figura 3.10.

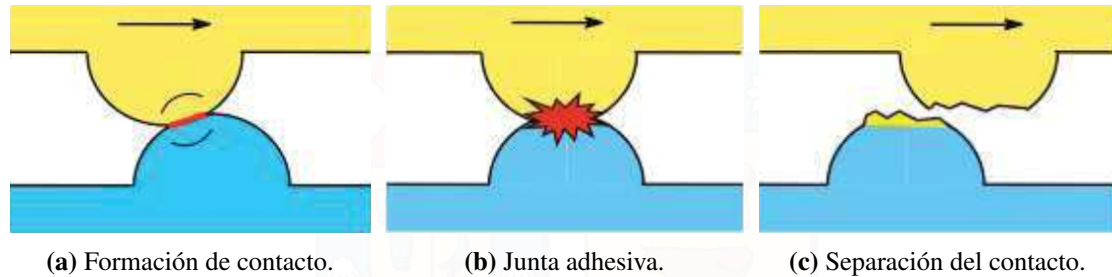


Figura 3.10: Etapas del desgaste por abrasión a dos cuerpos.

De esta forma un cuerpo pierde y el otro gana material, pero ambos pierden las características iniciales en cuanto a las propiedades superficiales que poseen. Es posible que debido a este proceso ambos materiales queden fuera de tolerancia.

3.2.2. Desgaste por abrasión a tres cuerpos.

El concepto de desgaste de tres cuerpos, es la adición entre los concepto de lubricación y la fricción seca, el tercer cuerpo juega el papel de contactar ambas superficies siendo este una zona de velocidad discontinua, debido a este fenómeno el contacto entre las dos superficies prácticamente no existe (J. Denape, 2014), luego entre alguna de las dos superficies iniciales y el tercer cuerpo puede ocurrir desgaste a dos cuerpos mencionado anteriormente.

El desgaste debido a tres cuerpos, puede ser descrito en tres etapas explicadas en la figura 3.11.

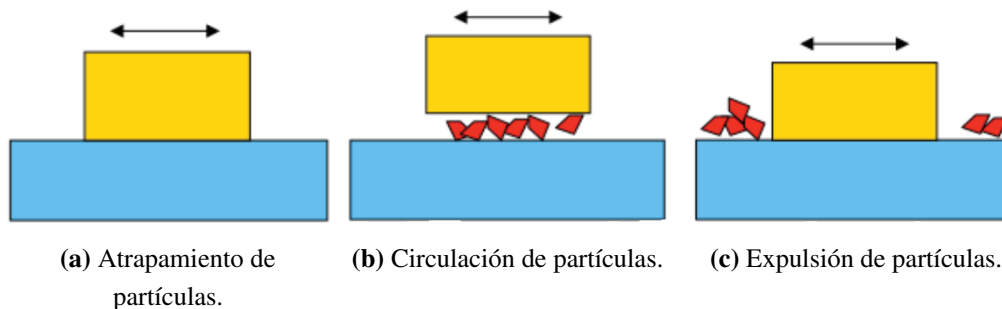


Figura 3.11: Etapas del desgaste por abrasión a tres cuerpos.

1. Atrapamiento de partículas: Esto es el atrapamiento de las partículas entre la primera

y segunda superficie. Estas pueden ser las asperezas removidas en el contacto entre dos superficies o pueden ser partículas adicionadas.

2. Circulación de las partículas: En la zona de contacto, se produce una separación entre las superficies debido a las partículas atrapadas, donde la interacción entre las superficies es prácticamente nula. Siendo las partículas las que producen el efecto de desgaste.
3. Expulsión de partículas: Las partículas de desgaste son expulsadas de la zona de desgaste.

Es el desgaste debido a la abrasión de tres cuerpos, es un problema común en la industria, esencialmente en la minería donde el mineral en extracción desgasta los elementos de máquina con los cuales está en contacto. Esta es una de las razones por las cuales el ensayo de la rueda de desgaste es una de las mejores alternativas para estudiar el desgaste abrasivo.

3.2.3. Desgaste acelerado.

El desgaste es un fenómeno de naturaleza lenta en términos de operación, en donde los ensayos y simulaciones de carácter real deben ser por largos períodos de tiempo pudiendo ser del orden de meses hasta años en términos de cálculo. Debido a esto es impetuoso utilizar ensayos de desgaste acelerado en el cual se reducen considerablemente los tiempos de experimentación y simulación a escalas de minutos e incluso segundos.

3.2.3.1. Ensayo de la rueda de desgaste.

Dentro de los ensayos de desgaste, como se dijo anteriormente, el ensayo de la rueda de desgaste es uno de los ensayos de desgaste a tres cuerpos en el que se tiene control de la mayor cantidad de variables que afectan el desgaste pero además corresponde a un ensayo de desgaste acelerado en el cual se reduce el tiempo de operación al orden de los minutos, siendo conveniente para el estudio de desgaste en condiciones de operación de un elemento de máquina sometido a desgaste.

El ensayo consiste en una rueda de goma que debe girar a una velocidad constante durante el ensayo, tangencialmente se encuentra un porta probetas el cual posiciona la placa a ensayar de forma que tiene una inclinación de 90° con respecto a la horizontal agregándole una masa para generar momento sobre la probeta dejándola pegada a la rueda de caucho, luego el sólido a granel es alimentado por un chute, donde el flujo de material se ve forzado por la rueda a pasar entre la rueda y la probeta, produciendo así el mecanismo de desgaste a tres cuerpos. Ver imagen [3.12](#).

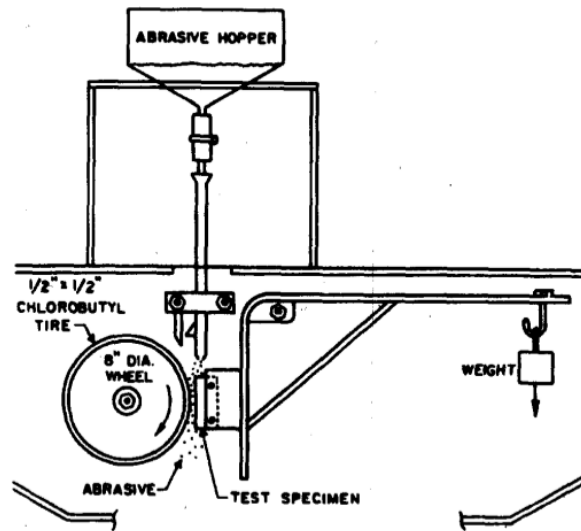


Figura 3.12: Esquema del ensayo de la rueda de desgaste utilizada por la norma ASTM G65-04.

La máquina desarrollada por Alexis Calvo está ubicada en el Centro de Investigación para el transporte de Materiales (CITRAM)(A. Calvo, 2011), utiliza como base el ensayo de la rueda de goma (Norma ASTM g65 04, 2006).

Esta máquina fue modificada para poder trabajar con tamaño máximo de partículas de hasta $6,3[mm]$ por lo que se construyó con elementos más robustos y además mejorar la alimentación cambiando la posición del chute, luego este diseño fue mejorado por Martín Erazo para poder trabajar materiales de hasta $10[mm]$ (M. Erazo, 2013), el resultado de la mejora se ve en la imagen 3.13.

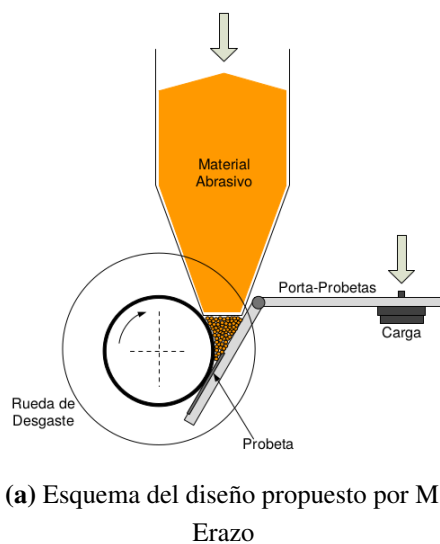


Figura 3.13: Máquina modificada por (M. Erazo, 2013) para el ensayo de la rueda de desgaste.

El fin de la experiencia de la rueda de desgaste es dar una respuesta empírica del comportamiento de la resistencia de un material sometido al paso de un sólido a granel bajo las condiciones de operación de un chute de traspaso, para esto se llegó a la conclusión de utilizar las siguientes variables (M. Erazo, 2013): Desgaste w , Velocidad v , Presión p y Tiempo t . Así como resultado se obtiene la ecuación 3.9 que relaciona estas variables. Siendo K la constante de proporcionalidad.

$$w \cong Kp^a v^b t^c \quad (3.9)$$

Siendo a , b , c y K determinados por el ensayo realizado.

En la imagen 3.14 se puede apreciar un ejemplo de huella de desgaste del experimento.

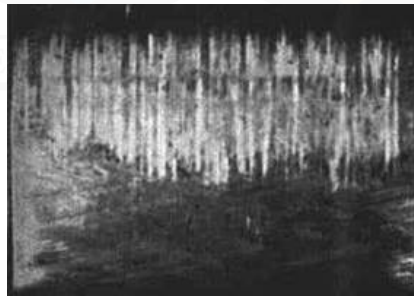


Figura 3.14: Ejemplo de huella de desgaste debido a desgaste por tres cuerpos en el ensayo de la rueda.

3.2.4. Modelo de desgaste de Archard.

Según el modelo de desgaste de Archard (J. F. Archard, 1953) se concluyó que durante el deslizamiento de una unidad de longitud .

- La tasa de desgaste lineal W es proporcional a la carga P .
- La tasa de desgaste es independiente del área de contacto.
- Con k constante, la tasa de desgaste lineal es independiente a la velocidad de deslizamiento.
- El valor teórico del desgaste lineal es independiente del modelo usado para representar la superficie.

Dicho lo anterior se puede deducir que la tasa de desgaste es directamente proporcional a la fuerza P y a la severidad del desgaste k .

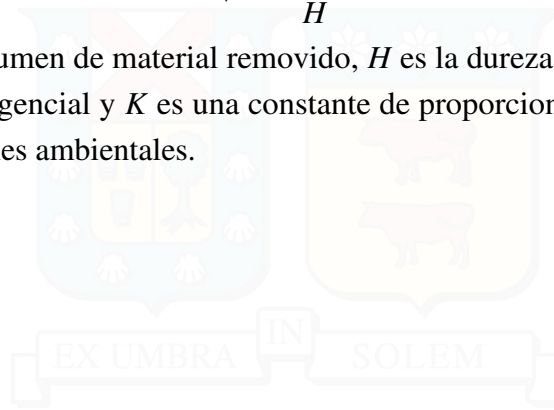
$$W = kP \quad (3.10)$$

Donde k que sirve para comparar la severidad del desgaste.

Según las publicaciones (A. Ramalho, nd; X. Shen, L. Cao, R. Li, 2010), la ecuación de Archad de forma práctica se muestra en la ecuación 3.11.

$$V = \frac{PK\delta_t}{H} \quad (3.11)$$

Donde V es el volumen de material removido, H es la dureza del material base, δ_t es el desplazamiento tangencial y K es una constante de proporcionalidad dependiente del material y/o condiciones ambientales.



3.3. Software basado en el método de elementos discretos (MED).

Se define un software MED como una herramienta computacional de carácter numérico que es capaz de simular el comportamiento de partículas en un paquete pre-construido de algoritmos y ecuaciones numéricas, evitando así la necesidad de programar nuevamente el método de elementos discretos ya que este es un proceso complejo el cual requiere características avanzadas de informática, para funcionar estos programas requieren el ingreso de información del usuario al momento de caracterizar el fenómeno que se quiere simular.

3.3.1. Algunos Software basados en MED.

A continuación se muestran programas basados en MED y sus principales características en cuanto a la simulación.

1. **Liggghts:** Software de código abierto basado en el método de elementos discretos para la modelación de partículas, puede ser usado para la simulación de materiales granulares, y enfocado en aplicaciones para problemas en la industria. LIGGGHTS es usado en una gran cantidad de instituciones dedicadas a la investigación en todo el mundo en áreas como química, farmacéutica, ingeniería agrícola, producción de comida, acero, minería, plásticos, etc. Siendo una herramienta que permite mejorar el proceso productivo.

Sus ventajas al momento de seleccionar un software basado en el método de elementos discretos son: factibilidad de importar geometrías complejas desde CAD, permite generar mallas móviles para tener una geometría en movimiento, permite simular la transferencia de calor entre partículas, posee un mecanismo “estándar” que permite ingresar partículas no uniformes.

Sin embargo carece de interfaz gráfica por lo tanto deja de ser intuitivo para el común de los usuarios y sus resultados deben ser post procesados para poder ser interpretados. (CFDEM, 2017)

2. **EDEM:** Es un software que tiene múltiples interfaces y funcionalidades acopladas con diferentes tecnologías como análisis de elementos finitos (FEA), dinámica de multi-cuerpo (MBD) y dinámica de fluido computacional (CFD). (EDEM, 2017a) Destaca por sus simulaciones variadas y personalizadas por el usuario para partículas, modelos de contacto y variables globales (EDEM, 2017b) .

3. **ESyS-Particle:** Este software de código abierto para modelación numérica basada en partículas utiliza el método de elementos discretos (DEM), ha sido utilizado para simular múltiples fenómenos como fragmentación de roca, nucleación de terremotos, entre otros. Se basa en múltiples revisiones de carácter abierto donde una de las limitantes es que se utiliza una densidad de partícula por defecto sin importar si es un ensamble de partículas. Por esto último, los desarrolladores instan asignar con especial cuidado la densidad involucrada en el modelo ([ESYS, 2017](#)).
4. **Rocky-DEM:** Destaca del resto al ser capaz de usar memoria compartida y paralela entre CPU/GPU además de poder insertar distintos tipos de geometría a gusto del usuario de forma intuitiva. Cuenta con el respaldo de múltiples compañías de calibre mundial ([ROCKY-DEM, 2017a](#)). La personalización de la mayoría de sus características de este ejecutable es solo bajo el permiso de los desarrolladores del software, lo cual a nivel usuario puede causar problemas al no poder ingresar directamente lo requerido ([ROCKY-DEM, 2017b](#)). Este software es de pago.
5. **Newton Software DEM:** Permite simular flujo granular en tres dimensiones, además de trabajar con otras plataformas, como CAD para importar modelos, permite cargar múltiples materiales en el entorno gráfico para simular y se puede elegir una serie de propiedades definidas para trabajar. Tiene una comunidad que genera tutoriales de carácter abierto (gratis) y demo ([NEWTON DEM, 2017](#)).
6. **YADE:** Es un software libre diseñado para realizar simulaciones DEM escritos en C++ usando modelos de objetos flexibles, incluye librerías en lenguaje Python, que permiten controlar la ejecución de los cálculos, visualizar los resultados y hacer un post proceso de éstos.

Cuenta con documentación completa, donde se especifican las diferentes clases y atributos, es capaz de funcionar en multi-procesamiento, posee la capacidad de integración de geometrías complejas CAD desde formato STL.

Se pueden importar librerías de Python e implementar funciones, brindando flexibilidad y la capacidad de implementar nuevas técnicas limitadas solo por el usuario pero se necesita gran conocimiento en el área de la programación tanto sobre el software como en lenguaje python ([YADE DEM, 2017](#)).

3.3.2. Como utilizar Software basados en MED

La ejecución de un software basado en MED requiere de tres etapas elementales en las cuales el usuario debe intervenir para tener una simulación representativa y poder hacer un

análisis posterior de los resultados. Se puede observar el diagrama de flujo correspondiente a este proceso en la figura 3.15

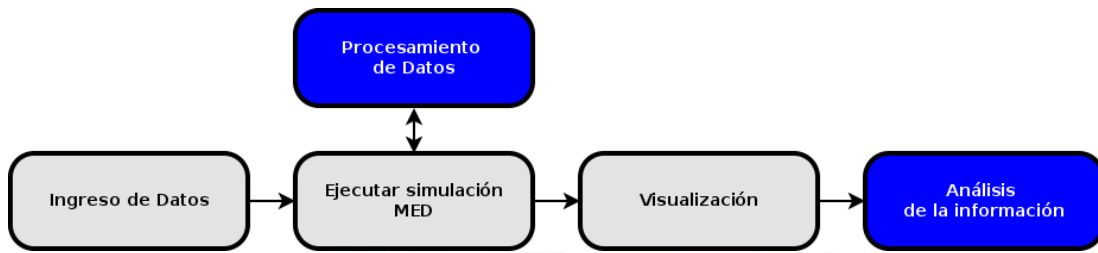


Figura 3.15: Diagrama elemental sobre la utilización de un software basado en MED.

1. **Ingreso de parámetros:** Corresponde a la selección y especificación de los parámetros de entrada que van a caracterizar el comportamiento mecánico de la simulación correspondiente, enumerando los parámetros necesarios que representan estas propiedades, donde una lista representativa se puede observar en la tabla A.1, esta puede variar dependiendo del software utilizado.

Para determinar estos parámetros es necesario identificar si corresponden a propiedades del sólido a granel o a la geometría utilizada para representar el fenómeno físico, luego es necesario realizar una serie de experimentos sobre los materiales.

A continuación se muestra en la tabla 3.1 una lista representativa de algunos ensayos, utilidad y los parámetros que se pueden obtener mediante el ensayo mencionado

Ensayo	Utilidad
Pesaje e inmersión	Medir densidad de partícula ρ_p
Tribómetro con disco rotacional	Estimar el coeficiente de roce estático μ_{pp}, μ_{pw}
Método ASAE con indentador esférico	Estimar el módulo elástico y el módulo de corte E, G
Plano inclinado	Estimar los coeficientes de roce estáticos y de rodadura entre partículas y materiales de pared $\mu_{pp}, \mu_{pw}, \mu_{roda,pp}, \mu_{roda,pw}$
Impacto en caída libre	Estimar los coeficientes de restitución entre partículas y pared y partícula. $\epsilon_{pp}, \epsilon_{pw}$
Ensayo de tamizado	Determina la distribución de tamaño de las partículas R
Medición de las partículas	Determina el tamaño y la forma de las partículas R, ar
Ensayo de corte directo	Permite caracterizar la intensidad de las fuerzas de cohesión en materiales granulares $F_{cohesion}$

Sigue en la página siguiente

Ensayo	Utilidad
Ensayo de humedad termogravimétrico	Permite determinar la humedad de una muestra %H
Determinación de influencia de fuerzas cohesivas	Permite determinar si es necesario analizar la cohesión en los ensayos experimentales y en la etapa de calibración

Tabla 3.1: Ensayos de caracterización de materiales para aplicaciones MED

Es necesario destacar que estos ensayos son representativos por lo que depende de la simulación la cantidad de ensayos necesarios a realizar y puede ser necesario agregar más ensayos con otras características.

2. **Procesamiento de datos:** Este paso corresponde a la ejecución del software basado en MED utilizando los parámetros ingresados en la sección anterior, por lo general en esta etapa se seleccionan las opciones de procesamiento, almacenamiento y post-procesamiento que posee el software utilizado.
3. **Visualización y análisis de resultados:** Es la etapa final de la utilización de un software MED que por lo general permite analizar gráficos y animaciones donde se puede observar el comportamiento del material simulado. Algunos ejemplos de estos parámetros son la visualización de la velocidad máxima de partículas en el flujo, representación de zonas de desgaste o en casos extremos si la simulación fue mal representada verificar si existe alguna inconsistencia con la realidad. Por ejemplo se puede observar en tan solo un fotograma de la siguiente simulación, como se comporta la velocidad de las partículas en un flujo granular, ver figura [3.16](#)

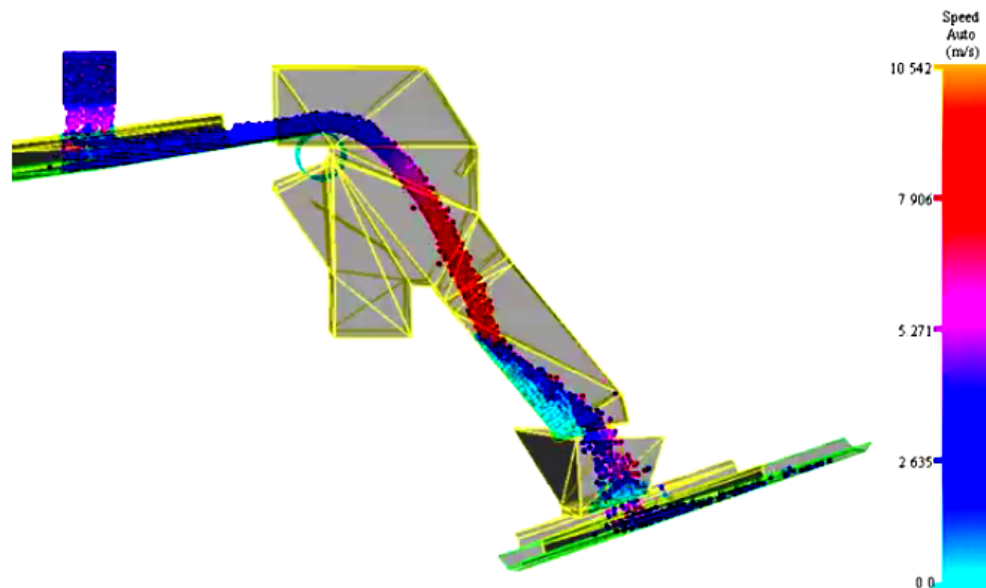


Figura 3.16: Distribución de velocidades en un flujo granular en una simulación de un chute de traspaso.

Haciendo un pequeño análisis de la situación se puede observar en el detalle (figura 3.17) que hay una zona donde el material granular se estanca (color celeste) luego de caer a una gran velocidad, por lo tanto esa zona es probablemente de alto desgaste debido al cambio de velocidad que debe generar la pared del chute hacia el material granular.

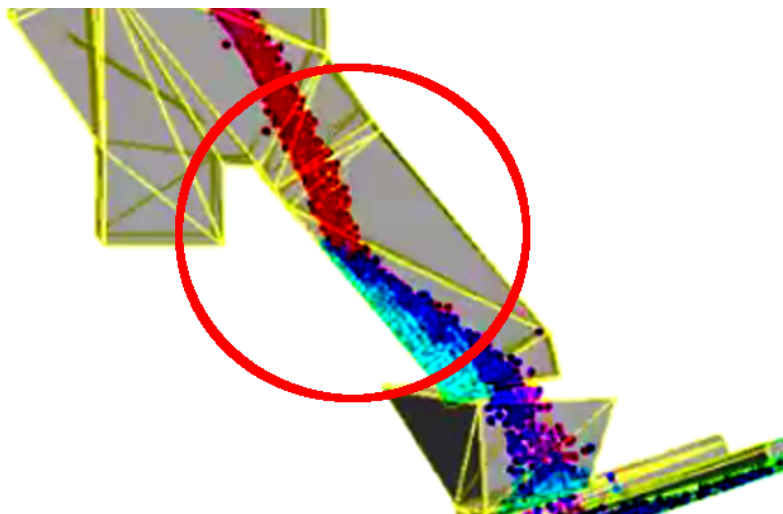


Figura 3.17: Detalle de zona de desgaste por cambio de velocidad en un chute de traspaso.

3.4. Un código en base al método de elementos discretos que permite modelar desgaste.

3.4.1. Descripción del funcionamiento del modelo numérico.

La finalidad del software implementado es modelar el ensayo de la rueda de desgaste (Norma ASTM g65 04, 2006), el cual se simplifica como un flujo de material granular que cae sobre un chute de alimentación, donde el flujo queda aprisionado entre la rueda y la probeta de desgaste. Este utiliza el método de elementos discretos para el flujo granular y la geometría necesaria para representar dicho ensayo.



Figura 3.18: Comparativa entre el esquema de la máquina real y la simulación del ensayo de desgaste.

El algoritmo resultante escrito por Frederik Knop (Frederik Knop, 2015), aplica las leyes de movimiento a todas las partículas, una ley de fuerza-desplazamiento e integra la posición con respecto al tiempo identificando la nueva localización de las partículas, luego se calculan las velocidades relativas entre ellas se aplicando el modelo de contacto para obtener las fuerzas de reacción sobre cada partícula en función de la interferencia entre partículas.

Análogamente se trabaja con el enmallado superficial, permitiendo los desplazamientos correspondientes al giro de la rueda y el pivoteo de la placa, con la diferencia que el método para identificar los contactos entre las partículas y el elemento de malla, se traduce en encontrar el contacto entre partícula y la cara o borde del elemento de malla, una vez hecho esto, se verifica si se activa o no el modelo de desgaste, dependiendo de dos factores, si el elemento impactado es el perteneciente a la placa de desgaste y si es suficiente el tiempo acumulado de simulación tal que esta se encuentre estable, evitando posibles identificaciones excesivas debido al rebote inicial de la placa de desgaste.

3.4.1.1. Diagrama de flujo.

En orden temporal esto se traduce como:

- I) **Seteo de variables:** En esta etapa el software preconfigura todas las variables necesarias para los cálculos.
 - 0) **Lectura de parámetros:** Lectura del archivo de texto con la configuración del sólido a granel y la malla.
- II) **Lectura de malla:** En esta etapa, se leen los archivos con extensión “.stl”, luego se homologan los puntos que corresponden al mismo vértice entre dos triángulos, además del marcaje de las caras con las propiedades correspondientes a la malla.
- III) **Ciclos:** En esta etapa se hacen los cálculos cíclicos para cada partícula en cada paso de tiempo.
 - 1) **Desplazamientos de malla:** Se hacen los cálculos referentes a los desplazamientos de malla.
 - 2) **Inserción de partículas:** Se verifican si existen partículas disponibles para la inyección, con esto se arma la cuadrícula de inyección y luego se calculan las posiciones en donde va la cuadrícula inyectada para finalmente posicionarlas en el espacio de trabajo.
 - 3) **Determinar zona de contacto:** Para cada partícula se determina una zona en la malla en la cual podría impactar, generando una lista de bordes y superficies cercanos que podrían estar en contacto con la *i-ésima* partícula evaluada. Luego reducida la búsqueda a una pequeña zona, se evalúa por criterio de distancia cual es el elemento de malla al que realmente impacta. Como este proceso es intensivo en cálculo se realiza cada cierta cantidad determinada de ciclos. En la figura 3.19, se puede ver como este proceso se encuadra en línea discontinua.
 - 4) **Búsqueda de vecinos:** Se determina si la partícula *i-ésima* es vecina de la partícula *j-ésima* si se cumple el siguiente criterio de distancia, $radio_i + radio_j + \Delta_{busqueda} > ||x||_i - ||x||_j$. Con esta información se genera una lista de vecinos entre partículas, esta por temas de memoria, almacena hasta 120 vecinos por partícula.
 - 5) **Cálculos sobre partículas:** En esta etapa se hacen los cálculos de fuerzas y momentos sobre las partículas y por reacción sobre los elementos de malla, utilizando la información obtenida en los pasos III.3 y III.4 .
 - 1) **Cálculos de fuerzas entre partícula y partícula:** A partir del modelo de contacto, se calculan las fuerzas y momentos entre la *i-ésima* partícula y la *j-ésima* partícula evaluada.

- 2) **Cálculos de fuerzas entre cara y partícula:** A partir del modelo de contacto, se calculan las fuerzas y momentos entre la i -ésima partícula y la q -ésima cara evaluada.
 - a) **Modelo de desgaste de Archard:** Si la q -ésima cara evaluada pertenece a la placa de desgaste, se activa el modelo de desgaste de Archard, el cual calcula el desplazamiento relativo de la cara impactada y los elementos de malla, provocando la deformación de esta.
- 3) **Cálculos de fuerzas entre Borde y partícula:** A partir del modelo de contacto, se calculan las fuerzas y momentos entre la i -ésima partícula y el n -ésimo borde evaluado.
 - a) **Modelo de desgaste de Archard:** Si el n -ésimo borde evaluado pertenece a la placa de desgaste, se activa el modelo de desgaste de Archard, el cual calcula el desplazamiento relativo del borde impactado y los elementos de malla, provocando la deformación de esta.
- 6) **Homologación de giros:** Una vez deformada la malla, se deben volver a homologar los vértices en común que pertenecen a más de una cara y borde.
- 7) **Integración de la posición:** Utilizando la información de las fuerzas y momentos, se integra la posiciones y velocidades de las partículas y objetos.
- 8) **Eliminación de partículas:** Luego del cálculo de la integración de la posición se evalúa la existencia de partículas fuera del volumen de control, de ser afirmativo aquellas partículas son eliminadas de la simulación y marcadas como posibles candidatos a reinyección.
- 9) **Cálculo de desgaste acumulado:** Con la información del modelo de desgaste de Archard se estima la pérdida de volumen y masa del sistema.
- 10) **Cálculo de energía del sistema:** Como parámetro de verificación se calcula la energía propia del sistema.
- 11) **Escritura en archivos:** Se escriben los archivos necesarios para la visualización y análisis de los resultados.

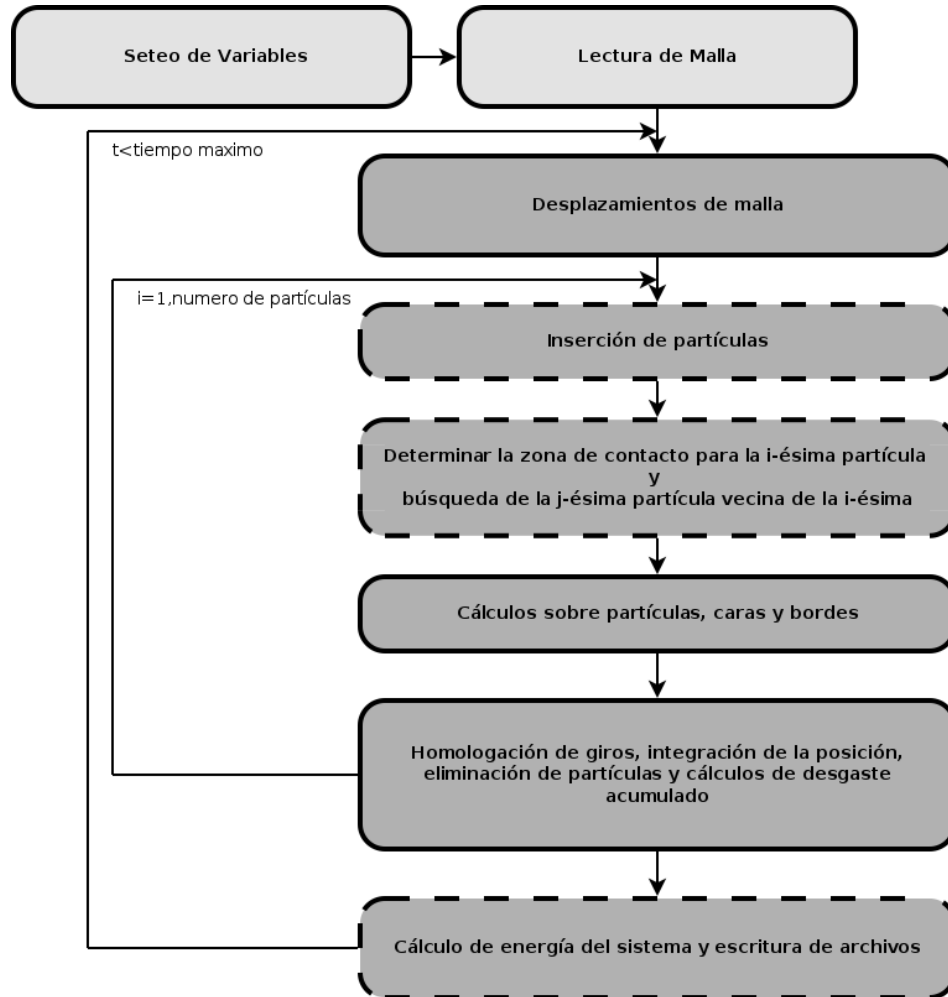


Figura 3.19: Diagrama de flujo general del software.

3.4.2. Metodología de calibración

La propuesta de calibración se subdivide en dos etapas, una dedicada a las propiedades que caracterizan al sólido a granel y la otra caracteriza la interacción con respecto a las superficies para poder aplicar el modelo de desgaste de Archard.

3.4.2.1. Calibración y caracterización del sólido a granel.

La finalidad de este capítulo es realizar ensayos para calibrar y caracterizar los minerales ensayados como un sólido a granel en la modelación, donde algunos de estos ensayos no tienen una entrada directa como variable en el programa por lo tanto se deben simular para obtener el mismo resultado en base a la propiedad que se desea calibrar.

1. **Forma del grano:** Se propone establecer la forma del grano como una configuración de macropartícula con la mejor semejanza entre la media de largo, ancho y alto. (ver

figura 3.20)

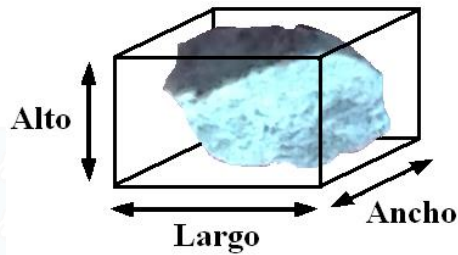


Figura 3.20: Determinación de las cotas principales de una muestra de mineral de cobre entre 6 y 12 [mm].

Utilizando la información entre las relaciones de $Ancho/Largo = 0,755$ y $Alto/Largo = 0,508$ donde el error de forma es la suma al cuadrado de los errores relativos de la proporción $Ancho/Largo$ y $Alto/Largo$ (ecuación 3.12).

$$Error = \left(\frac{Ancho}{Largo_{Macro}} - \frac{Ancho}{Real_{macro}} \right)^2 + \left(\frac{Alto}{Largo_{Macro}} - \frac{Alto}{Real_{macro}} \right)^2 \quad (3.12)$$

Luego evaluando la configuración de la macropartícula se obtienen los valores de factor de interferencia F_i que supone el menor error, según la figura 3.21 se obtiene que para obtener el menor error de forma se necesita una macropartícula compuesta de tres partículas con un factor de interferencia $F_i = 0,8$

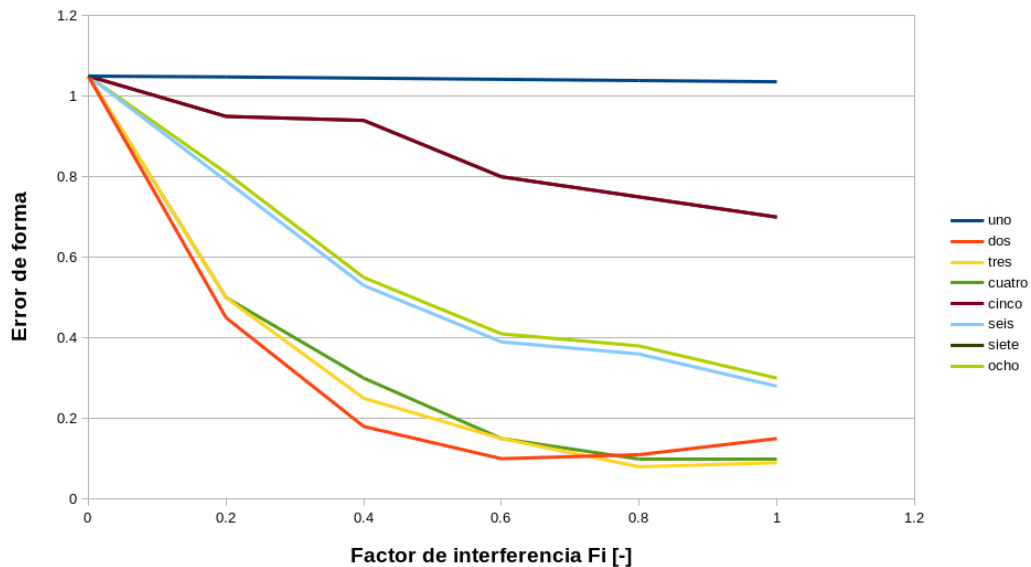


Figura 3.21: Error de forma en función del factor de interferencia entre partículas, utilizando diferente cantidad de partículas.

2. **Granulometría:** La granulometría afecta fundamentalmente el flujo de partículas que circula en la rueda de desgaste, este ensayo corresponde en tamizar la muestra del sólido a granel donde se propone trabajar con diez calibres de partícula en una distribución homogénea en número de cada especie, este supuesto permite simplificar la programación de la distribución de tamaño de las partículas.

Cada uno de estos tamices se le llamará Lu_{z_k} donde k es el k -ésimo número de tamiz de la muestra.

Debido a que la granulometría de los sólidos a granel está determinada mediante porciones másicas que pasan a travez del tamiz, se propone calcular una granulometría representada en número de partículas para tener el tamaño de cada decil correspondiente a la muestra de mineral.

Se muestra en la ecuación 3.13 la conversión de la k -ésima etapa del ensayo real.

$$f_{Numero\ k} = \frac{N^{\circ}_{particulas\ k}}{\sum_{i=1}^n N^{\circ}_{particulas\ i}} \quad (3.13)$$

Este proceso se hace para los minerales de cobre utilizados en la tesis, cabe destacar que si se quiere representar el k -ésimo decil de la Lu_{z_k} , se debe tomar el punto medio del rango del percentil P como tamaño de la partícula representante, como se puede ver en la ecuación 3.14

$$Lu_{z_k} = P_{k*10-5} \quad (3.14)$$

Luego de determinar los percentiles desde el 5 % al 95 % se pueden calcular los diámetros de los elementos que forman las macropartículas, estos tamaños deben calzar con el tamaño de Luz calculado a partir del número de partículas.

En la figura 3.22 se muestra como se ajusta el tamaño de las partículas en función del tamaño de Luz del tamiz.

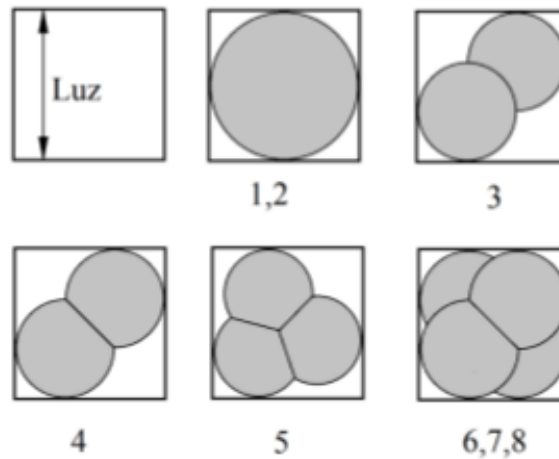


Figura 3.22: Esquemas de las partículas simuladas con MED para representar las partículas reales con la restricción del tamaño del tamiz

En este caso se muestran las siguientes relaciones que permiten determinar el diámetro de las partículas en función del tamaño de Luz y el factor de interferencia F_i .

$$\begin{aligned}\phi_{1,2} &= Luz & \phi_3 &= \frac{Luz}{\sqrt{3/8 * F_i + 1}} \\ \phi_4 &= \frac{Luz}{(F_i / \sqrt{2}) + 1} & \phi_5 &= \frac{Luz}{\cos(15^\circ * F_i + 1)} \\ \phi_{6,7,8} &= \frac{Luz}{(F_i / \sqrt{2}) + 1}\end{aligned}$$

Con el objetivo de minimizar el tiempo de cómputo se debe tener en cuenta que se debe minimizar el número de elementos requeridos en la simulación, por ello es conveniente utilizar partículas de diámetros mayores y se obvian las que tienen menor diámetro al no ser representativa de la muestra.

- 3. Estimación de la resistencia a la rodadura:** Se propone un ensayo para medir el coeficiente de resistencia a la rodadura C_{rod} , este consta en depositar una partícula de material granular sobre una superficie que la impide deslizar, lija en este caso, la que luego se inclina hasta que la piedra comienza a rodar.

El postulado se basa en que el ángulo de inclinación θ se relaciona con el coeficiente de resistencia a la rodadura, debido a que el momento angular generado por el punto de apoyo a la distancia del centro de masa, se iguala con el momento producido por la fuerza que opone la partícula al rodar debido a la resistencia a la rodadura.

En el caso de una partícula esférica ($F_i = 0$) se obtiene que el ángulo de rodadura es el mismo que el plano inclinado, mientras que para una macropartícula compuesta de tres elementos se tiene una relación empírica mostrada en la ecuación 3.15

$$C_{roda} = \sin(\theta) - F_i * \cos(\theta) \quad (3.15)$$

En este experimento se calcula la media para el coeficiente de rodadura, siendo este el punto de partida para la calibración de este parámetro en la simulación.

4. **Ángulo de reposo y dispersión de partículas:** La medición del ángulo de reposo es el ensayo más característico en MED debido a que este ángulo alimenta directamente el modelo normal tangencial entregando el valor del coeficiente de roce entre partículas, además de verificar el comportamiento de la rodadura en función del coeficiente de rodadura C_{roda} .

Según (S.R. Mead, P.W. Cleary, G.K. Robinson, 2012) el ensayo de calibración más común para este parámetro es utilizar un cilindro que tiene material granular hasta la mitad y luego se hace rodar lentamente hasta que se forme un perfil con un ángulo de reposo estable, esto se puede ver en la figura 3.23.

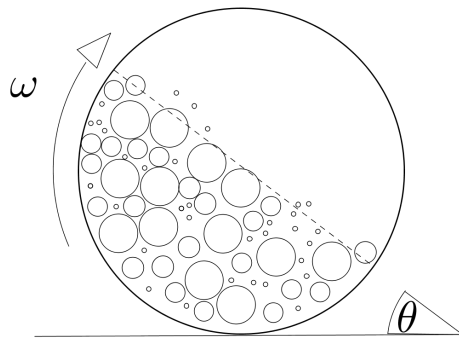


Figura 3.23: Esquema del ensayo para medir el ángulo de reposo propuesto.

En este caso se requieren aproximadamente 6 [s] de simulación para hacer girar el cilindro y percibir los efectos de las fuerzas centrífugas sobre las partículas, para el código realizado este tiempo de simulación es excesivo debido al tiempo necesario para realizar dicha simulación por lo que no fue posible implementarla.

Por otro lado se propuso otra metodología la cual requiere llenar un cilindro tapado a una cierta altura, para luego quitar la tapa del cilindro, de forma repentina, así dejar caer el material granular sobre una caja y luego medir el ángulo de reposo tanto en la simulación como en el ensayo real.

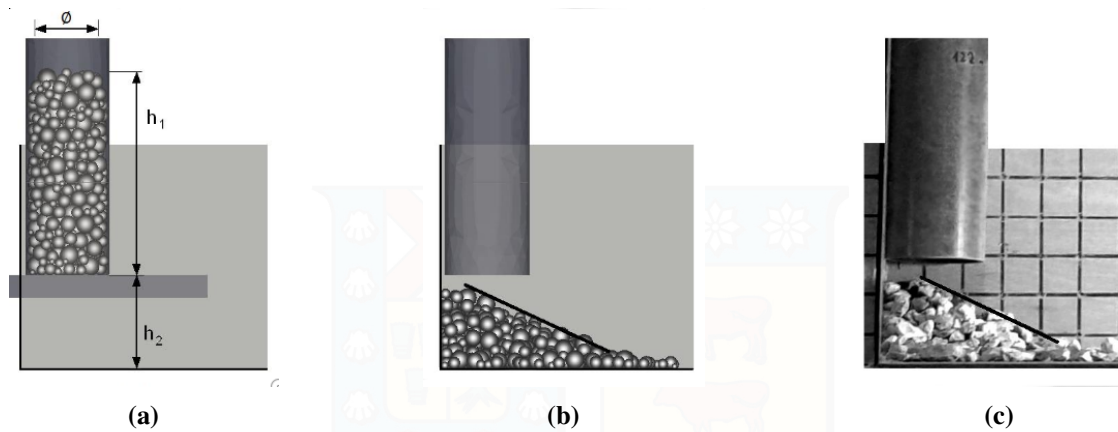


Figura 3.24: Esquema de la simulación y el experimento realizado que permite medir el ángulo de reposo y determinar el coeficiente de roce entre partículas. **a)** Cilindro lleno de material hasta la altura h_1 . **b)** Ángulo de reposo en la simulación. **c)** Ángulo de reposo en el experimento.

Cambiando el ángulo de visión a una vista superior, se puede apreciar como afectan los coeficiente de roce interno y rodadura en la dispersión de partículas en el plano, este ángulo se puede visualizar en la figura [3.25](#)

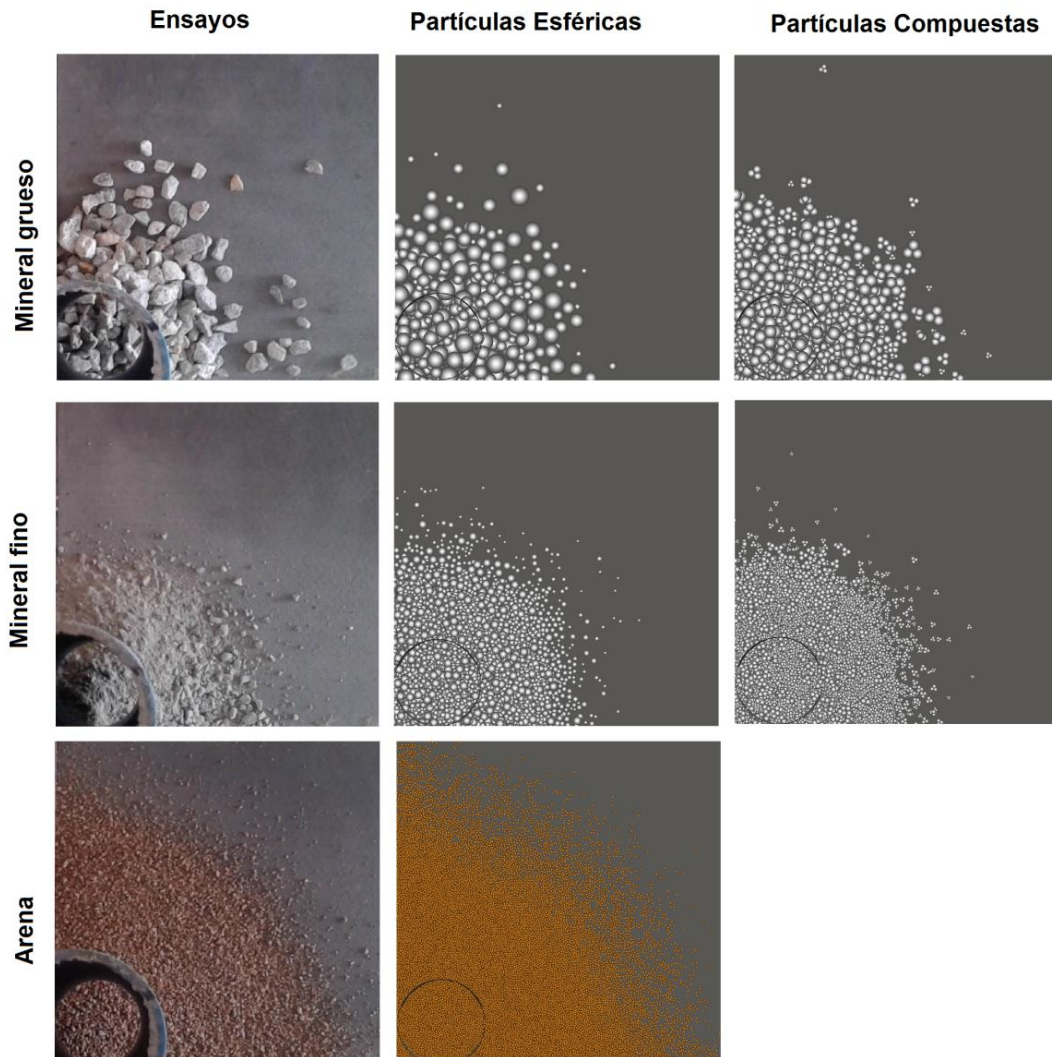


Figura 3.25: Visualización de la dispersión en función de los coeficientes de roce interno y resistencia a la rodadura.

- Densidad aparente:** Utilizando el mismo ensayo tubo del ensayo anterior se mide la masa utilizada para calcular el volumen desplazado por las partículas y luego se ajusta la densidad específica del sólido a granel para obtener la misma densidad aparente que en el ensayo real.

3.4.2.2. Calibración y caracterización de las superficies en la simulación.

Después de representar el material granular en la simulación es necesario ajustar las propiedades mecánicas del enmallado que se utiliza para representar las superficies existentes en el ensayo de la rueda de desgaste, se propuso que para obtener la información necesaria se utiliza el mismo ensayo de la rueda de desgaste para ajustar estos parámetros faltantes.

1. **Medición de flujo y tasa de desgaste:** Según el ensayo de la rueda de desgaste se necesita hacer pasar 30[kg] de material sólido a granel, midiendo el tiempo necesario para hacer pasar esa cantidad de material y luego se calcula la tasa de desgaste midiendo la variación de masa de la probeta de metal a desgastar.

En la simulación la inyección de partículas provoca un golpe en la placa de desgaste al inicio de la simulación inestabilizando su posición, por lo tanto se debe hacer pasar material hasta que la placa se estabilice. (ver figura 3.26)

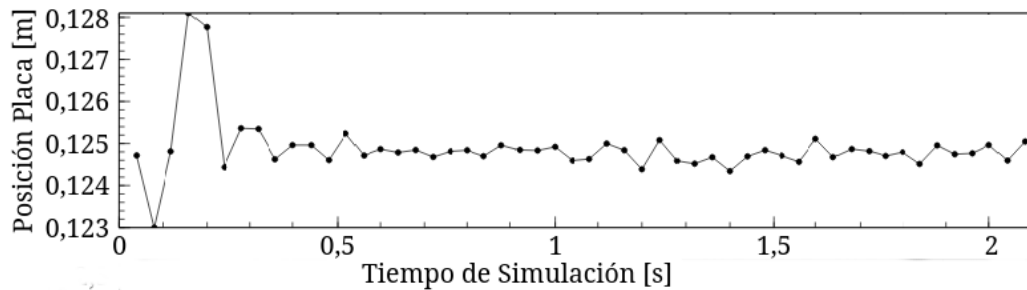


Figura 3.26: Posición de la placa en función del tiempo, mostrando la estabilización del flujo después de 0,2 [s].

Según la figura 3.26 hay una estabilización de la posición de la placa después de 0,2 [s] de simulación.

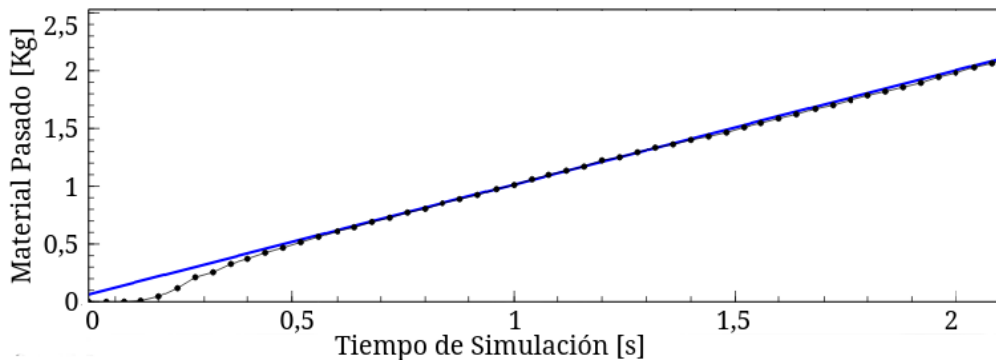


Figura 3.27: Material pasado en función del tiempo en la simulación de mineral de cobre.

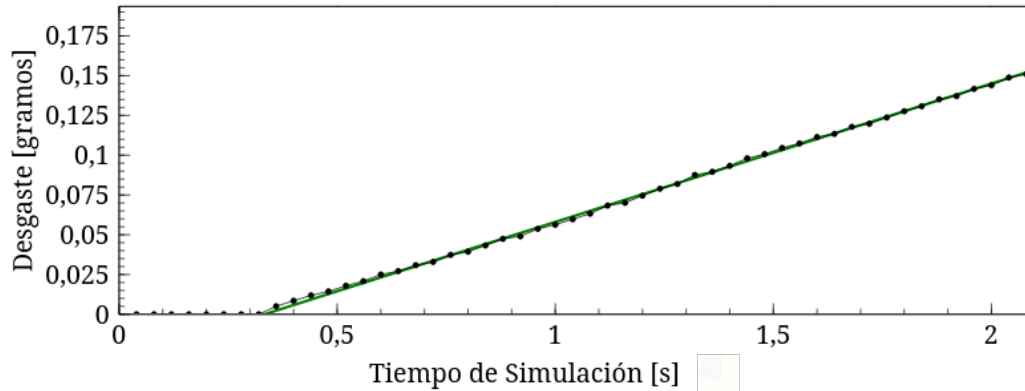


Figura 3.28: Desgaste acumulado en función del tiempo obtenido en la simulación de mineral de cobre.

Luego se toma un tiempo mayor al de la estabilización, en este caso 0,5 [s], para comenzar a medir desgaste acumulado (ver figura 3.28). Con esta información se calibra la tasa de desgaste específica de la probeta de tal forma que en 4 [s] de simulación se obtenga el mismo desgaste acumulado que en el tiempo total del ensayo de la rueda de desgaste. Dicho lo anterior la pendiente de las gráficas de material pasado y el desgaste acumulado (en la zona de régimen de trabajo estable) son el flujo de material y la tasa de desgaste de la probeta.

2. Paso de tiempo:

Dentro de las variables críticas de la simulación corresponde a escoger el paso de tiempo adecuado para que las interacciones entre las partículas no generen interferencias fuertes y además el tiempo de computo no sea excesivo.

Existe un criterio para obtener una simulación estable, este es el criterio de frecuencia de resonancia de la partícula con el menor diámetro (B. Muth, P. Eberhard, S. Luding., 2011).

En función de: el diámetro, el módulo elástico del material y la densidad específica se puede utilizar la ecuación 3.16 para determinar el paso de tiempo crítico de hertz.

$$h_{Hertz} = 2,87 \left[\frac{\rho_{esfera}^4 r_{esfera}^3}{r_{esfera} E^2 V_{max}} \right] \quad (3.16)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, ρ es la densidad específica, V_{max} es la máxima velocidad relativa entre las partículas y r_{esfera} es el radio de la esfera más pequeña de la simulación.

En este caso al utilizar partículas compuestas se utiliza un factor de seguridad siendo este el 20[%] del valor crítico de Herz.

$$h_{sim} = 0,2h_{Hertz} \quad (3.17)$$

Además existen parámetros que controlan la búsqueda de partículas o elementos de malla en la vecindad a la partícula evaluada, Estos se pueden apreciar en el diagrama de la figura 3.29 que la partícula i -ésima cercana a la partícula j -ésima y a la proyección del k -ésimo elemento de malla.

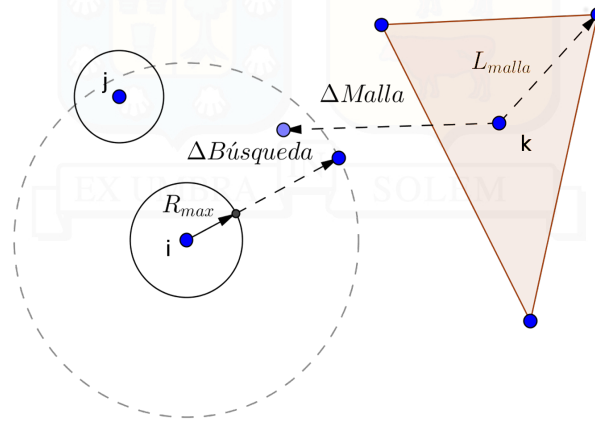


Figura 3.29: Esquema de búsqueda de partículas o elementos vecinos.

Donde $\Delta_{Búsqueda}$ permite aumentar la eficiencia del algoritmo utilizando listas de vecinos más grandes por iteración aprovechando que estas tienden a ser estáticas (B. Muth, P. Eberhard, S. Luding,, nd), con este argumento se reutilizan las listas generando pasos sin evaluación de vecinos ni zonas de contactos, a esto se le llama "pasos ciegos". Esta técnica genera la necesidad de utilizar una velocidad de búsqueda de vecinos $V_{busqueda}$ la cual no debe ser superada para evitar interferencias repentinas entre las partículas.

Luego se utiliza la ecuación 3.18 para calcular los "pasos ciegos".

$$pasosciegos = entero\left(\frac{\Delta_{Bus}}{h_{sim} \cdot V_{bus}}\right) \quad (3.18)$$

3. **Número de partículas:** El software actualmente cuenta con problemas de continuidad en la inyección de partículas, por lo que se determina un número mínimo de partículas requerido para amortiguar la interrupción de material y manteniendo una cantidad suficiente de partículas activas para poder simular correctamente el comportamiento del flujo de material granular y evitar la divergencia en la modelación de la tasa de desgaste.

En el caso de la simulación de arena surge un problema mayor aún debido a que este material es muy fino y con bajo coeficiente de roce con respecto a la placa de desgaste, así tiende a salir rápidamente de la zona de simulación.

Como aporte de este trabajo, siendo este uno de los puntos más débiles del código, una de las modificaciones del código apunta exclusivamente a mejorar el algoritmo de búsqueda e inyección de partículas para que esta sea continua.

4. **Representación del desgaste en el software:** Para poder representar el desgaste en una simulación MED se debe vincular al modelo de desgaste, este mecanismo se hará utilizando como base la ecuación 3.11. Debido a la pérdida de material por la remoción de asperezas es necesario representar esta pérdida de material para poder hacer análisis del fenómeno simulado. Para ello el método que utiliza el software utilizado es la deformación del enmallado superficial que representa a la placa de desgaste, se destaca que el modelo es válido siempre y cuando existan deformaciones pequeñas, aparentemente suaves y no haya contacto entre otras caras de la misma pieza.

Este método entrega mayor información del detalle de la pérdida de material asociado al desgaste, siendo apropiado para la modelación de la huella de desgaste que se quiere representar.

El mecanismo utilizado es desplazar los nodos, según la estimación local obtenida por el modelo de desgaste.

Usando el cambio de variables adecuado, en la ecuación 3.11.

$$D = \frac{K}{H} \quad (3.19)$$

Se puede interpretar como la pérdida del volumen V depende de: La constante D siendo la tasa de desgaste específico del material. La fuerza P con la que impacta la partícula a la superficie y δ_t el desplazamiento tangencial de la partícula sobre el elemento de malla.

Teniendo la información de la pérdida de volumen asociado a cada elemento de superficie impactado, se desplazan los nodos pertenecientes a este elemento de malla, por lo que la deformación del volumen para el i -ésimo elemento de malla ΔV_i en el paso de tiempo h queda expresado como la ecuación 3.20.

$$\Delta V_i = \int_t^{t+h} DP|\dot{\delta}_t|dt \approx DP|\dot{\delta}_t|h \quad (3.20)$$

Donde el desplazamiento diferencial del i -ésimo elemento de malla Δd_i , depende del área A_i y de la pérdida de volumen ΔV_i .

$$\Delta d_i = \frac{\Delta V_i}{A_i} \quad (3.21)$$

Luego el desplazamiento total en el tiempo $t + h$ depende del desplazamiento al tiempo t , del desplazamiento diferencial en el tiempo t y del vector normal del elemento de malla \hat{n}_i

$$d_i^{t+h} = dt_i + \Delta d_i \cdot \hat{n}_i \quad (3.22)$$

Con la información de los desplazamientos de los elementos de malla Δd_i , se calcula la nueva posición de los tres nodos del elemento.

$$p_{k,i}^{t+1} = p_{k,i}^t + \Delta d_i \cdot \hat{n}_i \quad (3.23)$$

Se puede observar en la figura 3.30 como el elemento de malla se mueve después de que la partícula impacta la superficie quedando esta discontinua.

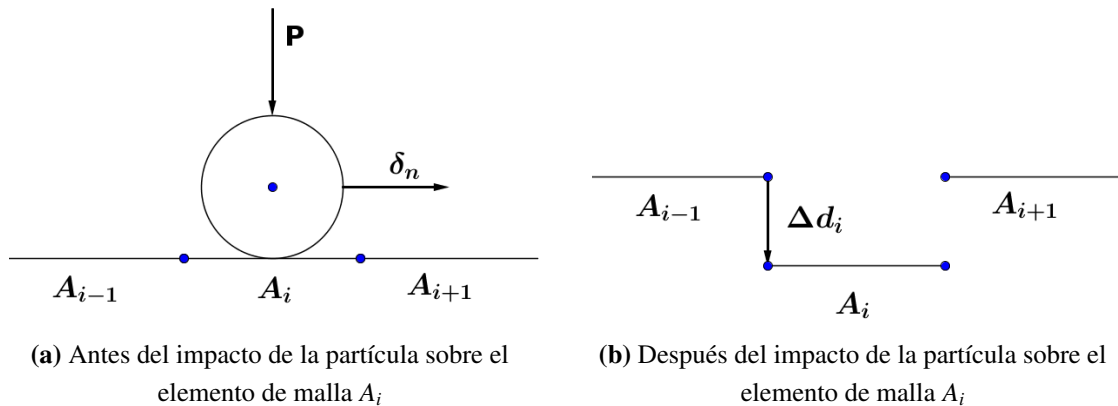


Figura 3.30: Desplazamiento de los nodos que pertenecen al elemento de malla A_i .

Luego se interconectan los nodos en común de los elementos de malla para lograr obtener la continuidad en la deformación de la superficie, obteniendo un patrón de desgaste suave. Esto se puede ver en la figura 3.31.

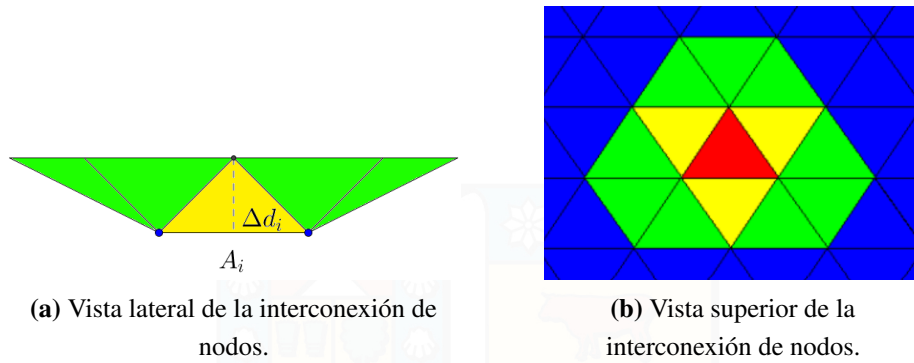


Figura 3.31: Interconexión de los nodos para dar continuidad a la superficie.

Teniendo en cuenta que el enmallado está en movimiento, para calcular el desgaste acumulado V_i sobre el elemento de malla, primero se calcula el punto central P_c del elemento de superficie.

$$P_{C_i} = \frac{P_{1,i} + P_{2,i} + P_{3,i}}{3} \quad (3.24)$$

Luego se integra las variaciones asociadas al desgaste.

$$V_i = V_i + |P_{C_i}^{t+h} - P_{C_i}^t| A_i \quad (3.25)$$

Con esta información se puede calcular la pérdida de volumen total, donde se suman todos los volúmenes desplazados de los elementos de malla.

$$V = \sum V_{cara} \quad (3.26)$$

Permitiendo así calcular la masa removida al multiplicar V por la densidad del material desgastado, siendo este el desgaste total en el tiempo actual de la simulación.

$$m_{removida} = \rho_{material} V \quad (3.27)$$

Cabe destacar que para la representación del desgaste, esta metodología posee dos grandes limitaciones: la primera es que solo sirve para representar deformaciones superficiales y la segunda es que el enmallado superficial debe tener elementos de tamaño uniforme porque un pequeño elemento, eventualmente, podría distorsionar el cálculo de volumen y posición de otro de mayor tamaño, si de todas formas se quiere utilizar una malla no uniforme se debe considerar una vecindad de elementos de malla al momento de calcular el desplazamiento de los nodos.

Luego para estimar la profundidad del desgaste d_i se utiliza el cociente entre V_i y A_i que aproxima el desplazamiento del punto medio del elemento de malla asociado al desgaste. Esto considera las deformaciones directas d_i y las deformaciones de su vecindad, cuando se interconectan los nodos de los elementos de superficie adyacente. Se formula en la ecuación 3.28

$$d_i = \frac{V_i}{A_i} \quad (3.28)$$

El requerimiento más importante de la representación del desgaste es obtener patrones de desgaste que se puedan comparar con los resultados del ensayo. Es por esto que se utiliza la información de los impactos sobre el elemento de malla I_i , que es la magnitud del vector desplazamiento d_i . Se puede ver en la ecuación 3.29

$$I_i = |d_i| \quad (3.29)$$

Donde la diferencia más significativa es en cuanto a la coloración de las zonas cercanas al impacto, debido a que la profundidad de desgaste d_i usa la información de los vecinos mientras que el impacto I_i solo utiliza la magnitud del vector desplazamiento en el elemento de malla impactado. La diferencia entre las coloraciones se puede notar en las figuras 3.32 y 3.33.

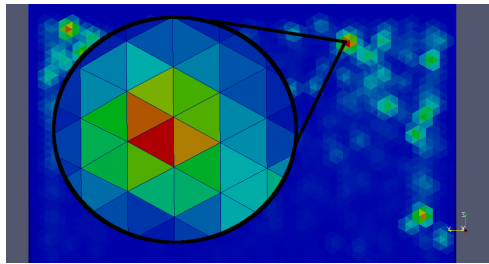


Figura 3.32: Detalle de la zona impactada coloreada por la profundidad del desgaste, utilizando la información del desplazamiento de los vecinos.

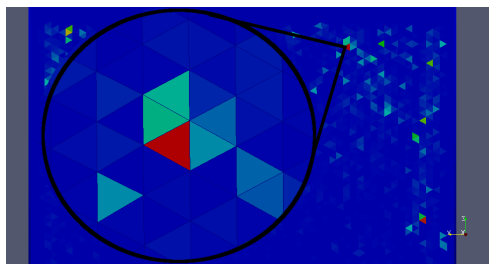


Figura 3.33: Detalle de la zona impactada coloreada por el impacto, sin utilizar la información del desplazamiento de los vecinos.

5. **Dureza de la probeta y tiempo de simulación:** El ensayo de la rueda de desgaste se realiza aproximadamente en 500 [s] donde se remueven 0,2 [g] de material, pero en este caso se busca acelerar la tasa de desgaste para disminuir el tiempo requerido para la simulación.

En el ensayo que se realiza se comparan las huellas de desgaste y tiempo de simulación para remover los 0,2 [g].

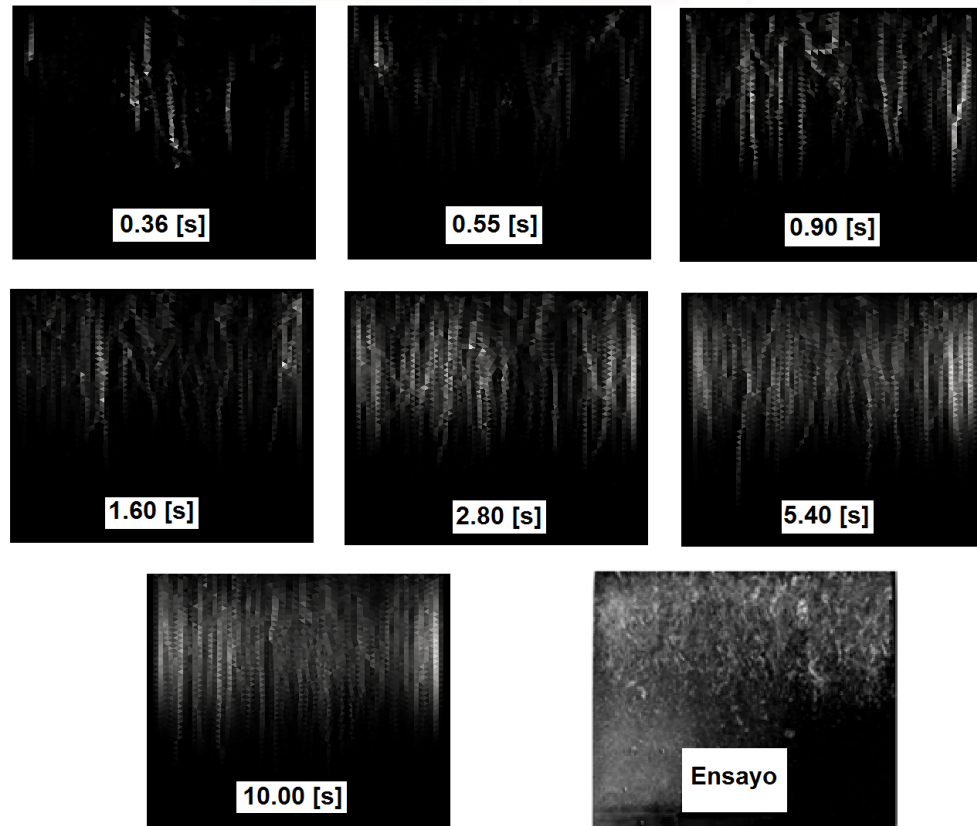


Figura 3.34: Patrón de las zonas desgastadas de la probeta donde se aprecia cada patrón y el tiempo de simulación necesario para desgastar 0,2 [g] de probeta

De la figura 3.34 se puede observar que mientras mayor sea el tiempo de simulación mejor será la distribución de los impactos en las zonas desgastadas.

6. **Roce estático entre las partículas y la placa de desgaste:**

A pesar de tener una metodología de calibración general de los coeficientes de roce estáticos entre el sólido a granel y las superficies, en la placa de desgaste aparecen los efectos de indentación y conminución de las partículas sobre la probeta afectando la huella de desgaste obtenida en la simulación.

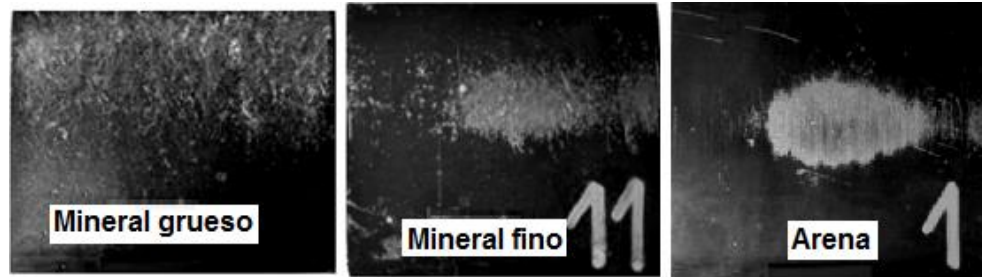


Figura 3.35: Placas de desgaste obtenidas en el ensayo de la rueda de desgaste utilizando diferentes tipos de mineral.

Luego de observar las probetas en la figura 3.35 el comportamiento de la rayadura en función del coeficiente de roce, se aprecia que para los minerales fino y grueso se obtiene una nube de puntos indicando un coeficiente de roce elevado mientras que para el arena se obtienen rayas debido al predominante deslizamiento.

Para verificar el comportamiento esperado se hacen simulaciones con diferentes valores para el coeficiente de roce, donde se obtiene la tendencia descrita anteriormente. Se puede verificar en la figura 3.36 que a medida que el coeficiente de roce aumenta la huella de desgaste pasa de ser una serie de rayaduras a una nube de puntos.

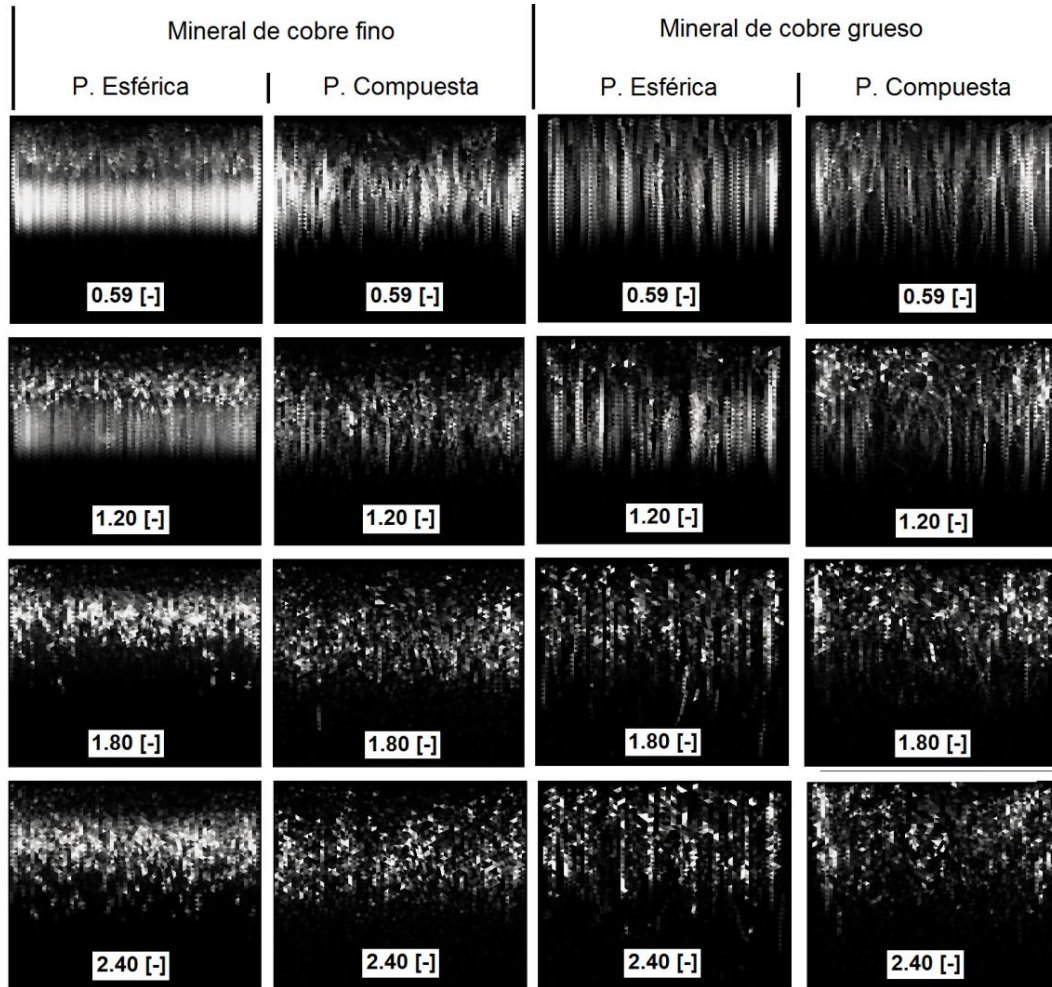


Figura 3.36: Patrón de las zonas impactadas por mineral de cobre grueso y fino, representado con partículas compuestas y esféricas, para distintos coeficientes de roce entre la probeta y el sólido a granel. (Frederik Knop, 2015)

Por la resolución del software, el visualizador y la malla utilizada se puede apreciar que a valores superiores de $1,8[-]$ la huella de desgaste prácticamente no cambia.

En la práctica este valor para un coeficiente de roce es elevado pero una hipótesis del alto valor es que los resultados deben contener el fenómeno de la indentación sobre la placa de desgaste eso implica que la partícula debe permanecer un tiempo mayor en contacto con la placa de desgaste e incorporar el total de la fuerza provocada por esta.

3.4.3. Análisis de resultados.

Esta sección se propone una metodología de análisis de resultados en base a las variaciones del tipo y la granulometría del sólido a granel comparando los patrones y las tasas

de desgaste tanto del ensayo de la rueda de desgaste como en la simulación.

Los parámetros de operación de la rueda de desgaste se aprecian en la tabla 3.2:

Parámetro	Valor
Velocidad tangencial	4,8[m/s]
Momento	5,076[Nm]

Tabla 3.2: Confgiciones de operación del ensayo de la rueda de desgaste.

En la figura 3.37 se observa como las diferentes simulaciones predicen el patrón de desgaste generando distribuciones semejantes a las obtenidas en el ensayo, por lo que en este caso se acepta la metodología de calibración para caracterizar el sólido a granel.

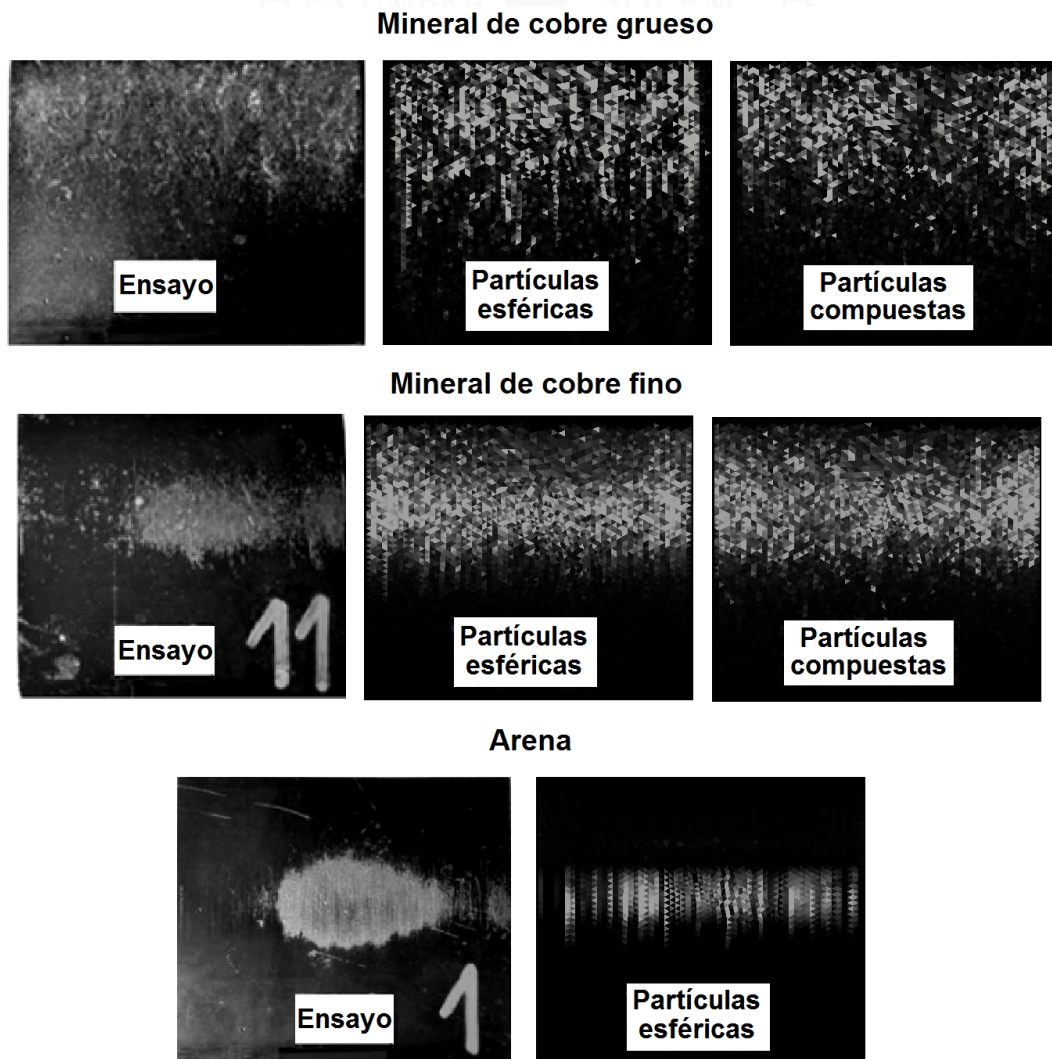


Figura 3.37: Comparativa entre la huella de desgaste del ensayo y la simulación. (Frederik Knop, 2015)

Debido a la aceleración de la tasa de desgaste descrita en la sección 3.4.2.1 se obtiene que las tasas de desgaste obtenidas en la simulación son elevadas en comparación a las obtenidas en el ensayo, esto se puede ver en la tabla 3.3.

	Mineral grueso	Mineral fino	Arena
Ensayo	0.000809	0.000964	0.001819
Simulación P. Esféricas	0.014650	0.017301	0.047502
Simulación P. Compuestas	0.013480	0.016130	[-]

Tabla 3.3: Resumen de las tasas de desgaste obtenidas en el ensayo de la rueda de desgaste (M. Erazo, 2013) y la simulación (Frederik Knop, 2015)

Se observa de mejor manera en la figura 3.38 donde se observa la diferencia significativa entre las tasas de desgaste.

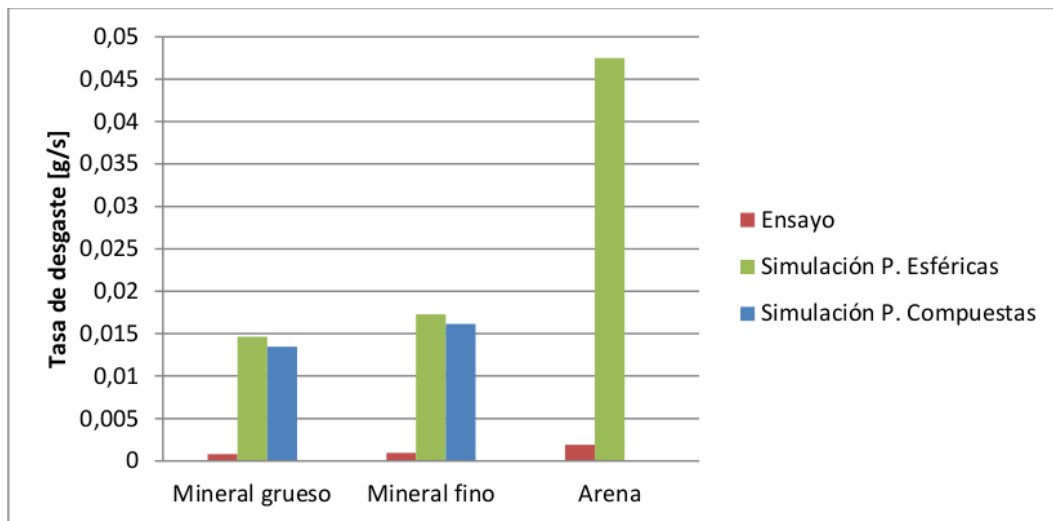


Figura 3.38: Gráfica de la tabla 3.3

Debido al diferente orden de magnitud de las tasas de desgaste en el ensayo con respecto a la del ensayo no es posible hacer una comparativa, para evitar este problema se utiliza la variación relativa de la tasa de desgaste utilizando la siguiente relación.

$$\Delta_{Tasa\ de\ Desgaste} = \frac{D_{Mineral\ fino} - D_{Mineral\ grueso}}{D_{Mineral\ grueso}} \cdot 100 \quad (3.30)$$

Donde $\Delta_{Tasa\ de\ Desgaste}$ es la variación de la tasa de desgaste entre el mineral fino y grueso, $D_{Mineral\ fino}$ es la tasa de desgaste del mineral fino y $D_{Mineral\ grueso}$ es la tasa de desgaste del mineral grueso.

Se obtienen los valores mostrados en la tabla 3.4.

	Mineral de Cobre fino	Arena gruesa
Ensayo	19,11 %	133,8 %
Partículas Esféricas	18,10 %	224,2 %
Partículas Compuestas	19,66 %	[-]

Tabla 3.4: Variación de la tasa de desgaste del ensayo y las simulaciones.

Graficando se puede observar en la figura 3.39

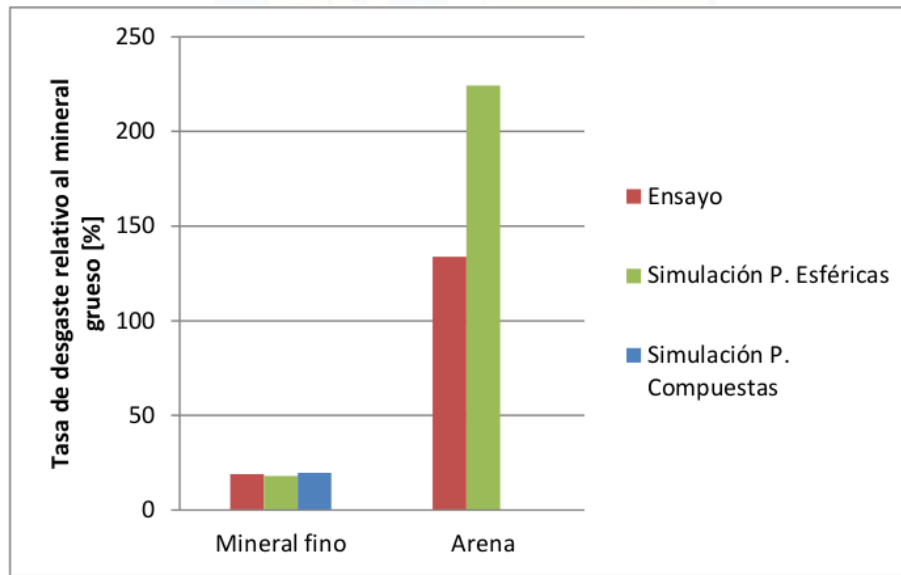


Figura 3.39: Gráfica de la tabla 3.4

Se propone mejorar esta metodología de análisis para los resultados, de manera que las tasas de desgaste simuladas se puedan comparar directamente la tasa de desgaste efectiva del material. Evitando la necesidad de una comparativa entre las tasas de desgaste obtenidas por las simulaciones de mineral grueso de cobre con respecto a las demás tasas de desgaste, para poder verificar si efectivamente corresponde la variación en la tasa de desgaste entre las dos simulaciones para el mismo material utilizado en la placa probeta.

Dicho lo anterior se deduce que es una metodología poco práctica y poco intuitiva debido a que se deben hacer dos ensayos de la rueda de desgaste como dos simulaciones para el mismo material.

4 | Calibración del sólido a granel.

En este capítulo se incorpora el comportamiento del sólido a granel en el software en función de los ensayos mencionados en el capítulo 3.4.2.1 de acuerdo al archivo de utilización que se proporciona en el capítulo B en el anexo.

A pesar de que existe una calibración previa en la tesis de Frederik Knop (Frederik Knop, 2015), debido al cambio de la metodología de análisis de resultados y a las mejoras implementadas en la inyección de partículas, se supone que existe un cambio en los valores de algunos coeficientes. Por lo tanto se vuelve a configurar todo el software en base a los ensayos necesarios.

4.1. Granulometría

Donde la **Calibración** es el tipo de simulación que se quiere hacer, **Fi** es el factor de interferencia en la partícula macrocompuesta, **N_{mac}** es la cantidad de partículas que componen la macropartícula y **Granulometría** es la granulometría pre-configurada en el software (ver detalle en el anexo B).

Se muestran las configuraciones de: mineral de cobre fino 4.1, mineral de cobre grueso 4.2 y arena gruesa 4.3.

Variable	Mineral fino simple	Mineral fino compuesto
Calibración	1	1
Fi	1	0.8
N _{mac}	1	3
Granulometría	1	2

Tabla 4.1: Configuración de granulometría utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % bajo 6 [mm].

Variable	Mineral grueso simple	Mineral grueso Compuesto
Calibración	1	1
Fi	1	0.8
Nmac	1	3
Granulometría	3	4

Tabla 4.2: Configuración de granulometría utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].

Variable	Arena gruesa
Calibración	1
Fi	1
Nmac	1
Granulometría	5

Tabla 4.3: Configuración de granulometría utilizada para el ensayo del arena gruesa.

4.2. Inserción de partículas

La inyección de partículas debe cumplir que el flujo másico de entrada debe ser mayor o igual al flujo de salida pero no debe superar la cantidad máxima de partículas permitidas en la simulación, esta razón puede causar grandes interferencias en las partículas de entrada causando fuerzas indeseadas en las partículas, si este fenómeno ocurre es posible una reacción en cadena haciendo una simulación con resultados fallidos.

Donde **Ncuerpo** es la cantidad máxima de partículas en la simulación, **Fmod** Factor de radio que permite la separación de las matrices de inyección y **Alturajet** es la altura de inyección de las partículas.

Variable	Mineral fino simple	Mineral fino compuesto
Ncuerpo	18000	15000
Fmod	2.	4.5
Alturajet	0.175	0.175

Tabla 4.4: Configuración de inyección utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % bajo 6 [mm].

Variable	Mineral grueso simple	Mineral grueso compuesto
Ncuerpo	700	700
Fmod	2.	2.
Alturajet	0.175	0.175

Tabla 4.5: Configuración de inyección utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].

Variable	Arena gruesa
Ncuerpo	158000
Fmod	3.5
Alturajet	0.19

Tabla 4.6: Configuración de inyección utilizada para el ensayo del arena gruesa.

Cabe destacar que no se muestran la cantidad de filas y columnas, ni la posición de la primera partícula con respecto debido a que la configuración corresponde tan solo a llenar la zona de inyección.

4.3. Parámetros de tiempo.

Debido a las constantes interacciones entre las partículas involucradas en el método de elementos discretos, es necesario utilizar los criterios mencionados en el capítulo 3.4.2.2.2.

Estos parámetros de tiempo se pueden ver en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 para sus respectivas granulometrías.

Se definen como **Deltabus** el radio extra para la búsqueda de vecinos, **Velbus** velocidad de búsqueda de vecinos, **H** paso de tiempo, **Tmax** tiempo total a simular, **Tdes** tiempo en el que se inicia el cálculo de desgaste y **Fotos** cantidad de veces que el software escribe los resultados parciales.

Variable	Mineral fino simple	Mineral fino compuesto
Deltabus	0.0025	0.0025
Velbus	25	25
H	7.14E-7	4.74E-7
Tmax	4	2
Tdesgaste	0.6	0.6
Fotos	100	100

Tabla 4.7: Configuración de tiempo utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % bajo 6 [mm].

Variable	Mineral grueso simple	Mineral grueso compuesto
Deltabus	0.00125	0.0025
Velbus	30	25
H	1.26E-6	8.12E-7
Tmax	4	4
Tdesgaste	0.6	0.6
Fotos	100	100

Tabla 4.8: Configuración de tiempo utilizada para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].

Variable	Arena gruesa
Deltabus	0.0025
Velbus	25
H	7.00E-7
Tmax	0.9
Tdesgaste	0.3
Fotos	100

Tabla 4.9: Configuración de tiempo utilizada en el ensayo del arena gruesa.

Es importante destacar que si existe alguna partícula energizada pero que logra salir del volumen de control antes de impactar a otras o a al enmallado, es un fenómeno despreciable debido a que la partícula es reseteada al momento de salir del volumen de control.

4.4. Coeficientes de rebote.

Debido a la utilización del método constitutivo *Normal - Tangencial* utilizado en DEM 3.1.3 para ello se debe configurar el comportamiento del rebote del sólido a granel, basandose en pruebas experimentales donde cada coeficiente requiere una prueba específica.

4.4.1. Coeficiente de rebote entre placa-partículas.

La metodología de calibración de los coeficientes de rebote, se basa en hacer caer una partícula del sólido a granel, desde el reposo, en una muestra de la superficie y luego ajustar este parámetro en función de la eficiencia de rebote, para lo cual en cada granulometría se debe configurar este parámetro ya que la eficiencia de rebote también depende de la cantidad de partículas en la macropartícula.

Se han preparado las gráficas en las figuras 4.1 y 4.2 que muestran la restitución en función del tiempo probando distintos valores de coeficientes de rebote utilizando granulometría constante.

En la figura 4.1 se muestra como afecta el coeficiente de rebote entre placa-partículas sobre las partículas esféricas en el software.

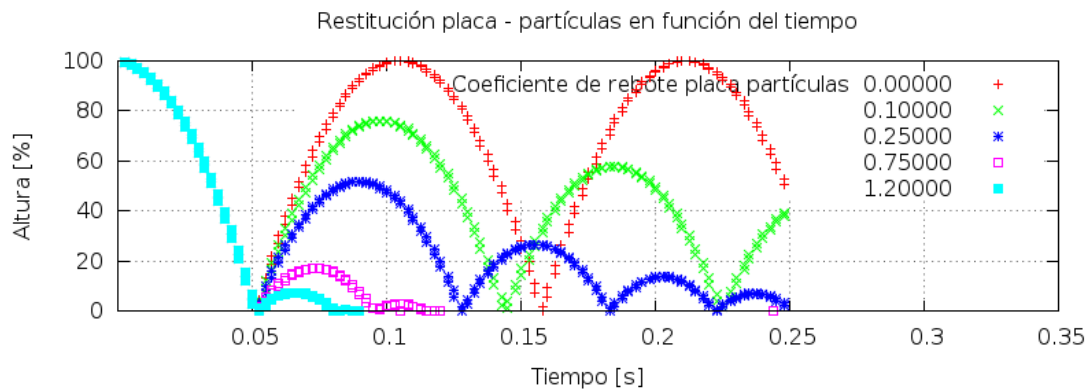


Figura 4.1: Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre placa partícula utilizando partículas esféricas .

En la figura 4.2 se muestra como afecta el coeficiente de rebote entre placa-partículas sobre las macropartículas compuestas en el software.

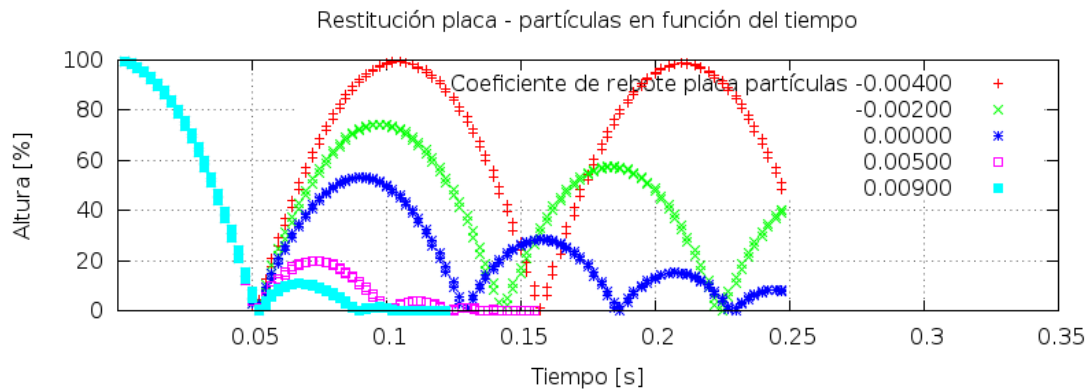


Figura 4.2: Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre placa partícula utilizando macropartículas compuestas .

4.4.2. Coeficiente de rebote entre partículas.

La metodología de calibración del coeficiente de rebote entre partículas, se basa en hacer caer una partícula del sólido a granel sobre otra del mismo sólido a granel, desde el reposo, en una superficie y luego ajustar este parámetro en función de la eficiencia de rebote, en cada granulometría se debe configurar este parámetro ya que la eficiencia de rebote entre partículas depende del radio de cada partícula interactuando.

Se han preparado las siguientes gráficas en las figuras 4.3 y 4.4 que representan la restitución de ambas partículas en función del tiempo probando distintos valores de coeficientes de rebote, utilizando granulometría constante.

En la figura 4.3 se muestra como afecta el coeficiente de rebote entre partículas sobre las partículas esféricas en el software.

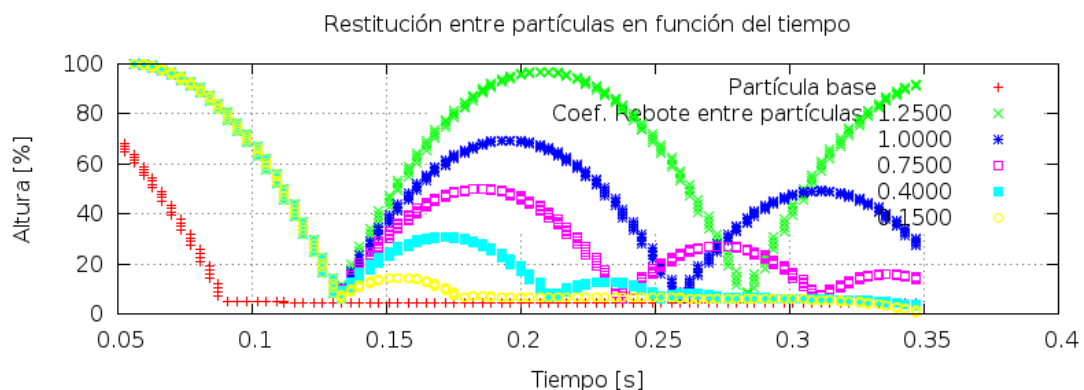


Figura 4.3: Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre partículas utilizando partículas esféricas .

En la figura 4.4 se muestra como afecta el coeficiente de rebote entre partículas sobre

las macropartículas compuestas en el software.

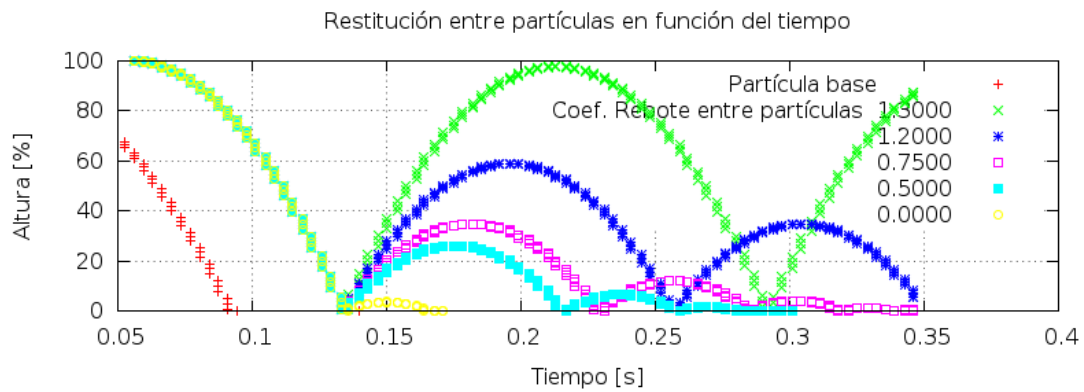


Figura 4.4: Rebote en función del tiempo a diferentes coeficientes de rebote entre partículas utilizando macropartículas compuestas .

4.4.3. Selección de los coeficientes de rebote.

De las gráficas descritas en 4.4.1, 4.4.2 y los datos experimentalmente extraídos del trabajo de (Frederik Knop, 2015), se muestran las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 con los coeficientes de rebote para las granulometrías mencionadas.

Los coeficientes que permiten controlar la eficiencia de rebote de los elementos en interacción son: **vPart** eficiencia de rebote entre partículas, **vChuteinox** eficiencia de rebote entre el chute y las partículas, **vChuteacero** eficiencia de rebote entre acero y las partículas, **vPlaca** eficiencia de rebote entre la probeta y las partículas, **vGoma** eficiencia de rebote entre la rueda de goma y las partículas, y finalmente **vBordegoma** eficiencia de rebote entre borde de la rueda y las partículas.

Variable	Mineral fino simple	Mineral fino compuesto
vPart	0.44	0.1
vChuteinox	0.33	0.33
vChuteacero	0.4	0.4
vPlaca	0.4	0.4
vGoma	0.05	0.05
vBordegoma	0.4	0.4

Tabla 4.10: Configuración de los coeficientes de rebote utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % menor a 6 [mm].

Variable	Mineral grueso simple	Mineral grueso compuesto
vPart	0.1	0.05
vChuteinox	0.33	0.33
vChuteacero	0.4	0.4
vPlaca	0.4	0.4
vGoma	0.05	0.05
vBordegoma	0.4	0.4

Tabla 4.11: Configuración de los coeficientes de rebote utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].

Variable	Arena gruesa
vPart	0.01
vChuteinox	0.7
vChuteacero	0.7
vPlaca	0.7
vGoma	0.9
vBordegoma	0.8

Tabla 4.12: Configuración de los coeficientes de rebote utilizados en el ensayo del arena gruesa.

4.5. Coeficientes de roce.

Es necesario calibrar los coeficientes de roce para terminar de configurar el comportamiento del sólido a granel en cuanto al modelo tangencial del modelo constitutivo del método de elementos discretos. El modelo tangencial se encarga de calibrar las rotaciones individuales de las partículas o macropartículas con respecto al centro de gravedad de la misma. (Ver capítulo 3.1.1)

4.5.1. Chute - partículas.

El coeficiente de roce entre el chute y las partículas determina cuanto las partículas ruedan sobre el chute utilizado en la simulación de la rueda de desgaste. Este chute está construido de dos tipos de aceros, ferrico e inoxidable, de la forma que se muestra en la figura 4.5. Donde en azul está construido de plancha de acero y en amarillo el acero inoxidable.

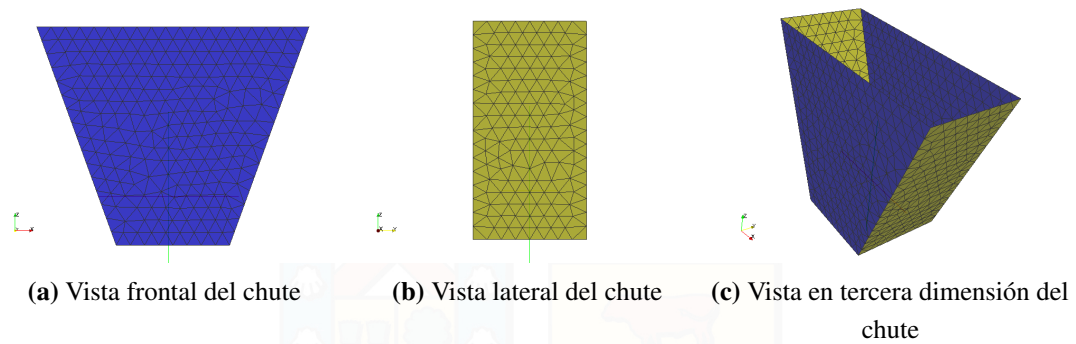


Figura 4.5: Esquemas del chute coloreando los distintos aceros utilizados en su construcción.

La metodología para calibrar el coeficiente de roce es dejar una partícula del material sobre placa del material, luego es pivoteada lentamente y se mide el ángulo donde comienza a deslizarse. Para comprobar que el ángulo de entrada es el correcto se prepara una simulación con el código en la que se puede observar el ángulo en el cual comienza a deslizarse la partícula. La simulación se muestra en la figura 4.6.

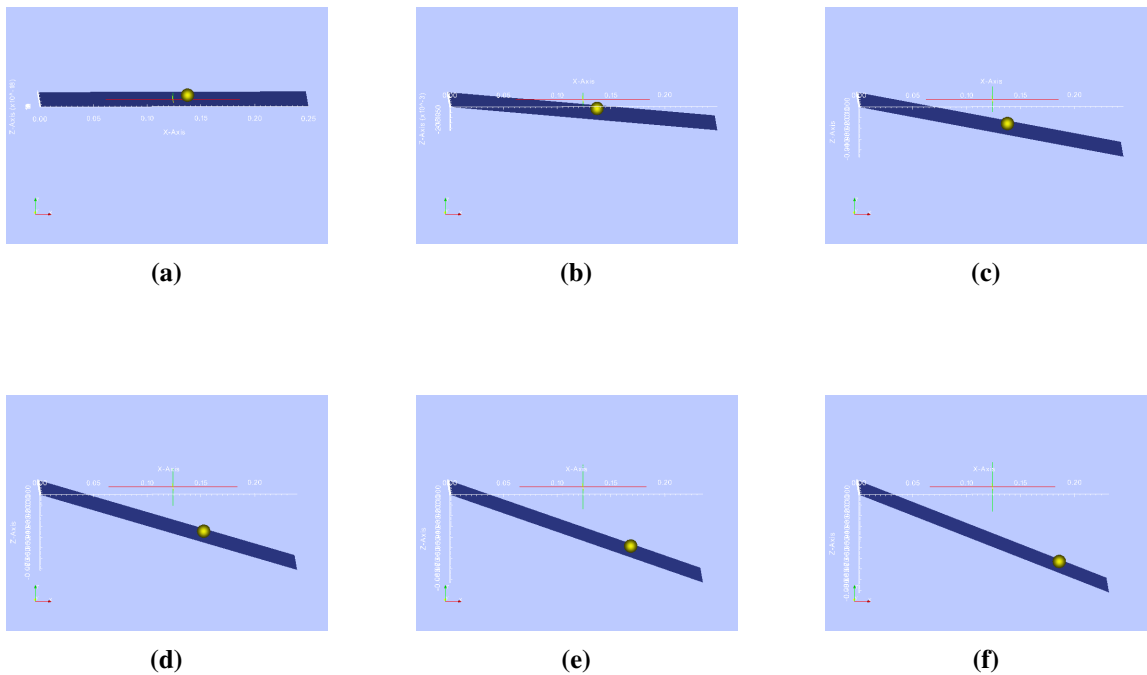


Figura 4.6: Deslizamiento de la partícula sobre el enmallado en la simulación.

Para determinar el punto de deslizamiento, se grafica el módulo de la velocidad tangencial en función del ángulo de giro de la placa como se puede observar en la figura 4.7.

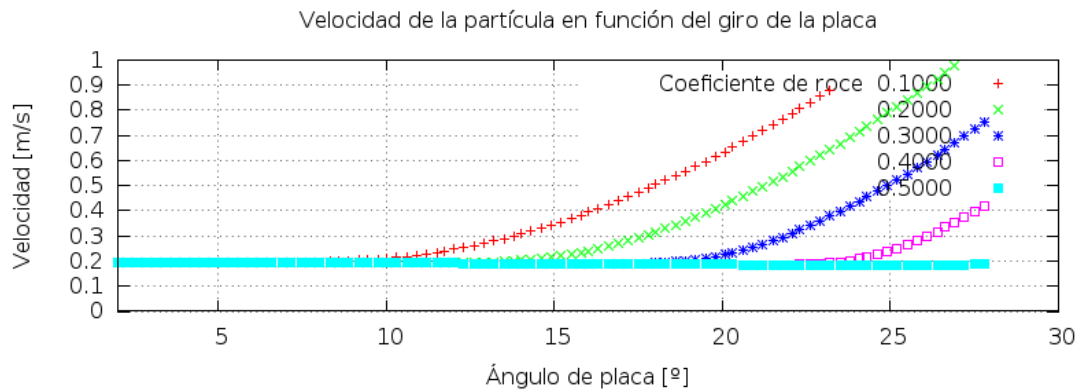


Figura 4.7: Módulo de la velocidad en función del ángulo de giro de la placa utilizando distintos coeficientes de roce.

En esta gráfica el coeficiente de roce coincide con el punto donde la velocidad tangencial aumenta por deslizamiento.

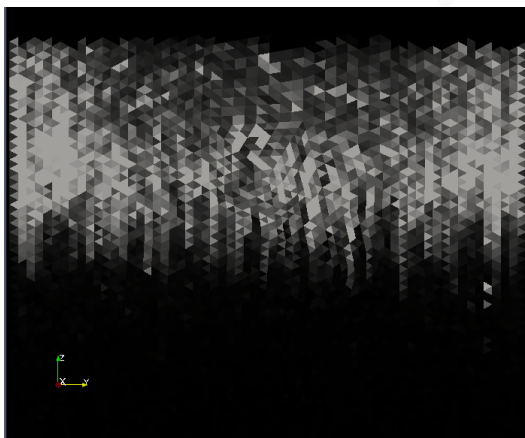
4.5.2. Rueda - partículas.

Este parámetro se utiliza la misma metodología que en el capítulo 4.5.1 para determinar el coeficiente de roce estático de la rueda de goma pero debido a que la rueda de goma debe considerar el efecto de indentación sobre la misma y para evitar deformar la malla simulando este efecto (aumentando el costo computacional) se utilizará un coeficiente de roce de rueda igual a 1,85

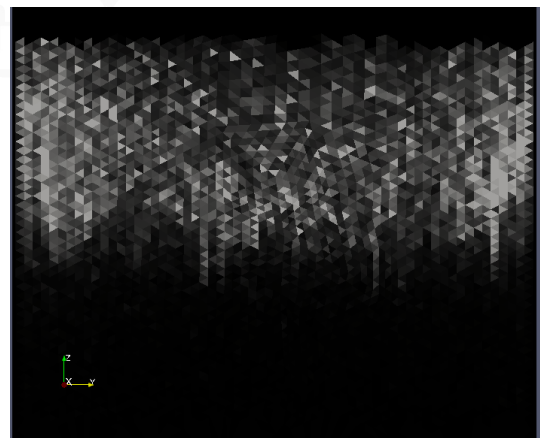
4.5.3. Placa de desgaste - partículas.

Para calibrar el coeficiente de roce entre las partículas y la placa de desgaste, se propone comparar la huella de la placa de desgaste con la huella obtenida en la simulación. Teniendo en cuenta que este coeficiente de roce $\mu_{particula-placa}$ debe incorporar los efectos de indentación sobre el material, en el cual se debe identificar el tipo de rayadura que se obtiene dependiendo del material. Al deslizar, las partículas, desgastan fuertemente la superficie del material, mientras que estando en estado de rodadura estas tienden a indentar el material debido a que el deslizamiento es menor.

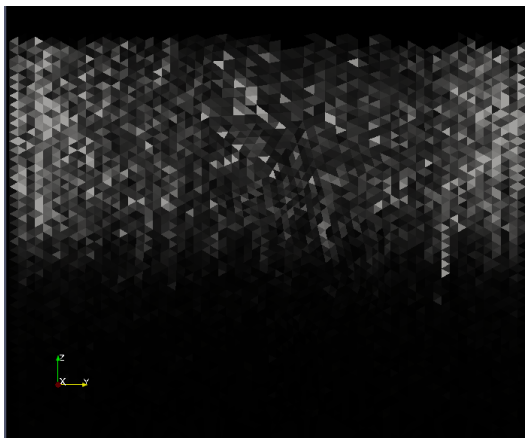
1. Granulometría 100 % menor a 6 [mm]. Partículas esféricas.



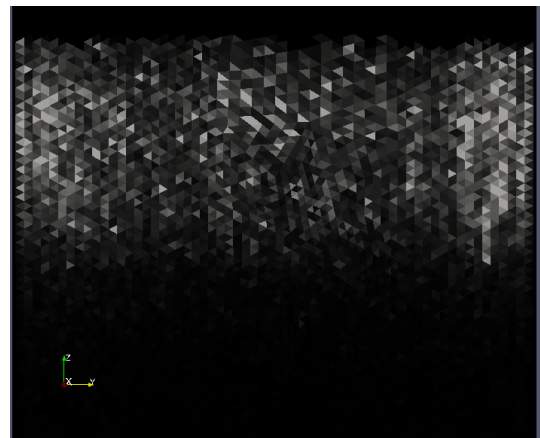
(a) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,2$, partículas finas esféricas.



(b) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,4$, partículas finas esféricas.



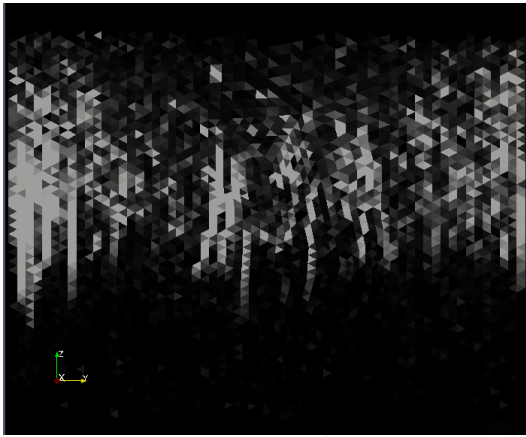
(c) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,6$, partículas finas esféricas.



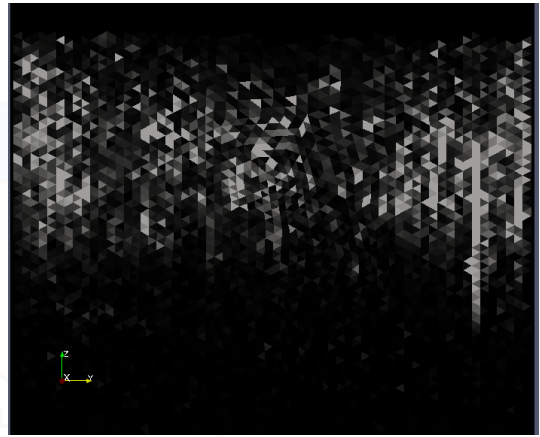
(d) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,8$, partículas finas esféricas.

Figura 4.8: Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.

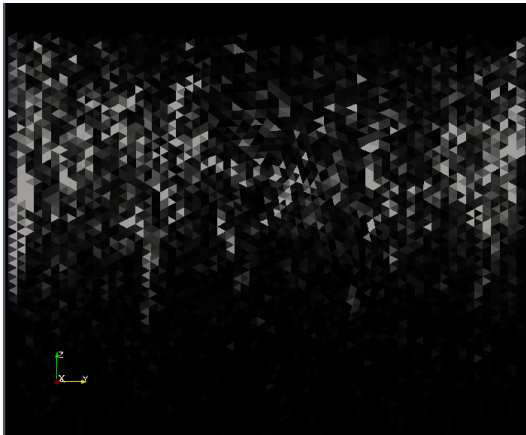
2. Granulometría 100 % menor a 6 [mm]. Partículas compuestas.



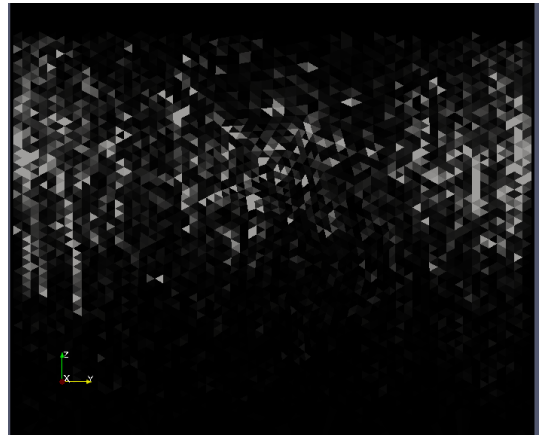
(a) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,2$, partículas finas compuestas.



(b) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,4$, partículas finas compuestas.



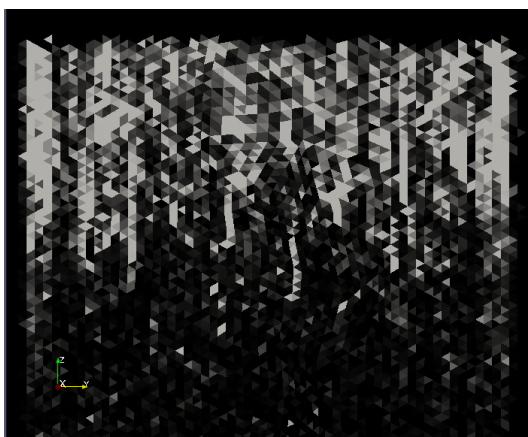
(c) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,6$, partículas finas compuestas.



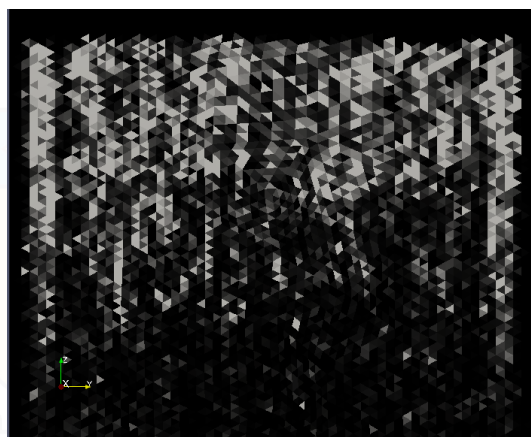
(d) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,8$, partículas finas compuestas.

Figura 4.9: Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.

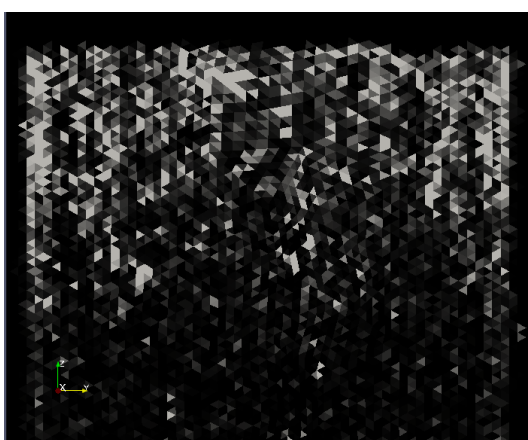
3. Granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm]. Partículas esféricas.



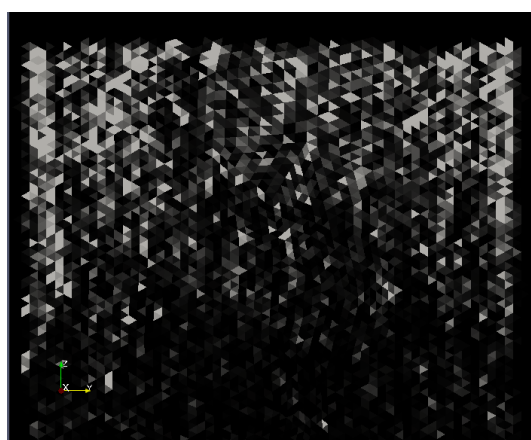
(a) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,4$, partículas gruesas esféricas.



(b) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,6$, partículas gruesas esféricas.



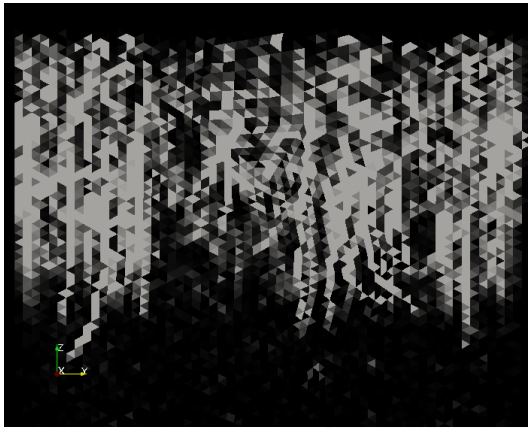
(c) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,8$, partículas gruesas esféricas.



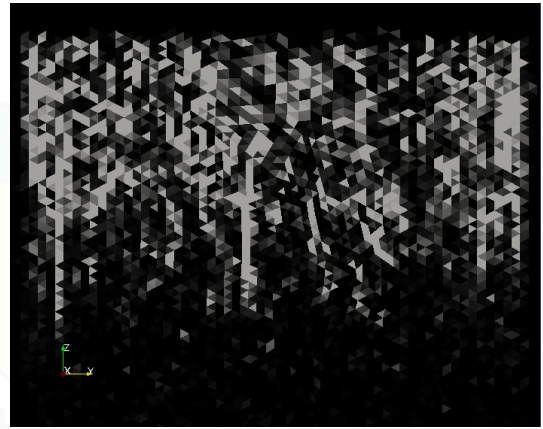
(d) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 2,0$, partículas gruesas esféricas.

Figura 4.10: Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.

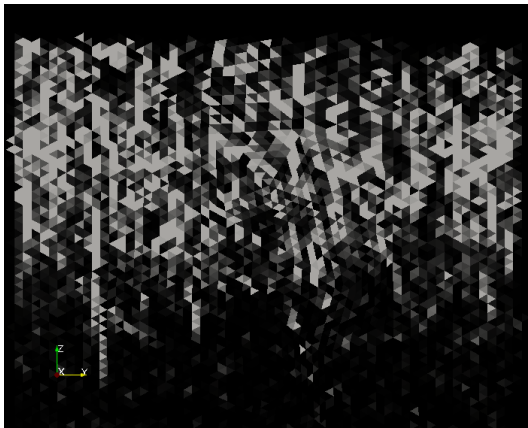
4. Granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm]. Partículas compuestas.



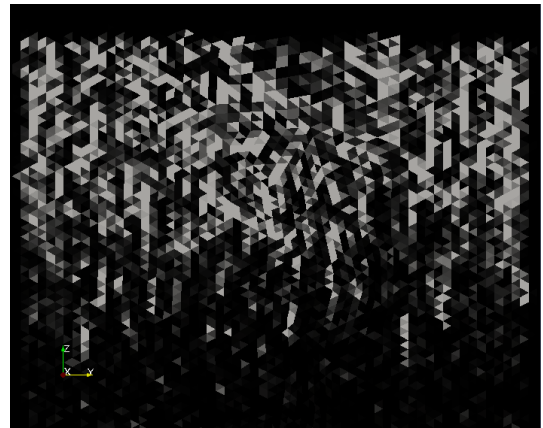
(a) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,2$, partículas gruesas compuestas.



(b) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,4$, partículas gruesas compuestas.



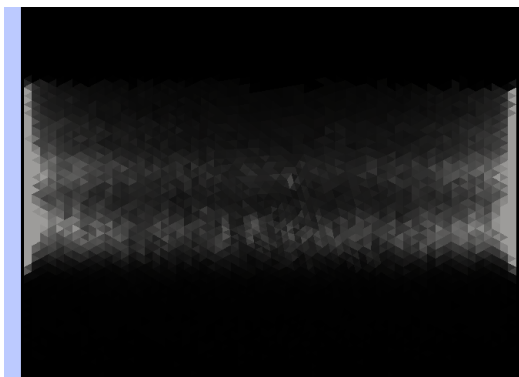
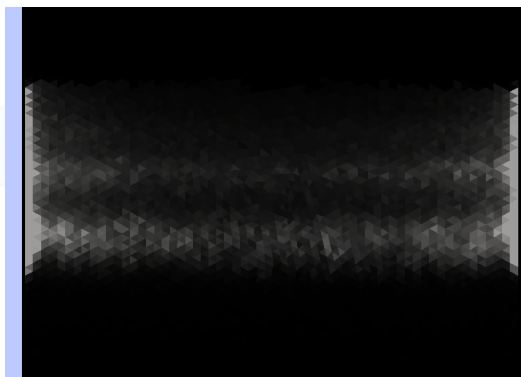
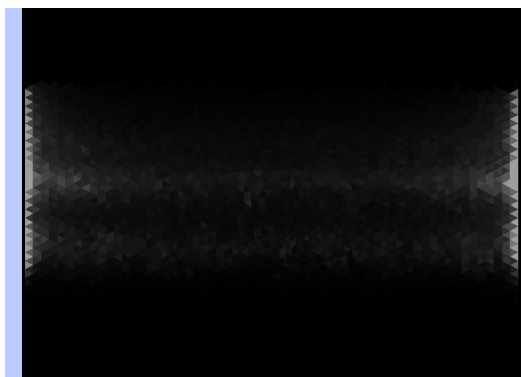
(c) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,6$, partículas gruesas compuestas.



(d) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 1,8$, partículas gruesas compuestas.

Figura 4.11: Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.

5. Arena gruesa 1,6 [mm] .

(a) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 0,5$, arena gruesa .(b) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 0,6$, arena gruesa.(c) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 0,7$, arena gruesa .(d) Huella de desgaste $\mu_{placa} = 0,8$, arena gruesa.**Figura 4.12:** Resultado de la calibración del coeficiente μ_{placa} para el arena gruesa.

4.5.4. Entre partículas.

De acuerdo a la metodología expuesta en 3.4.2.2.4 se utiliza un cilindro de diámetro interior $\phi = 51,45 [mm]$ desde $h_2 = 62,75 [mm]$ hasta lograr una columna de $h_1 = 102 [mm]$ con el sólido a granel, con esta información es suficiente para poder simular el ensayo en el software.

En este caso se utiliza PVC debido a que es un material que posee un bajo coeficiente de roce con respecto al material granular durante la caída de este en el ensayo, bajo este supuesto es posible utilizar un bajo coeficiente de roce con la pared en la simulación.

Bajo este mismo criterio en la caja donde el material golpea se debe tener en cuenta el coeficiente de rebote de tal forma que el mismo rebote no afecte la caída de material.

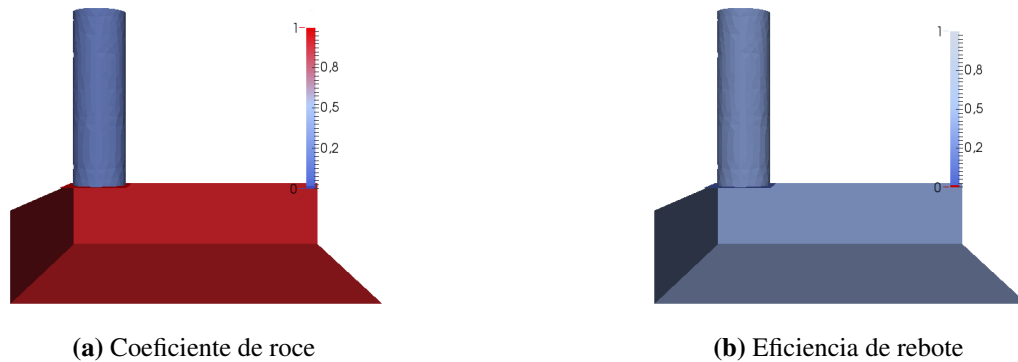


Figura 4.13: Representación visual del coeficiente de roce y eficiencia de rebote sobre la malla de la simulación

A continuación se muestran los resultados obtenidos para diferentes valores del coeficiente de roce entre partículas. Luego se hará la comparación entre el ensayo y la simulación.

1. Granulometría 100 % menor a 6 [mm]. Partículas esféricas.

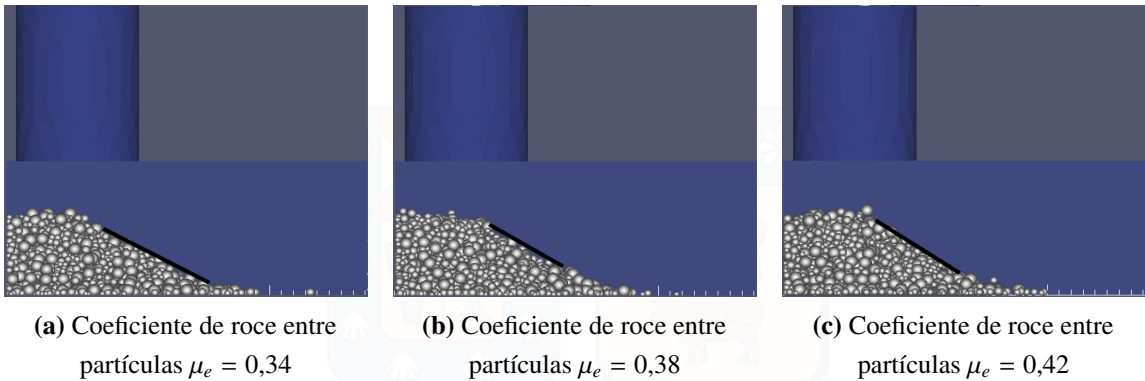


Figura 4.14: Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas esféricas.

2. Granulometría 100 % menor a 6 [mm]. Partículas compuestas.

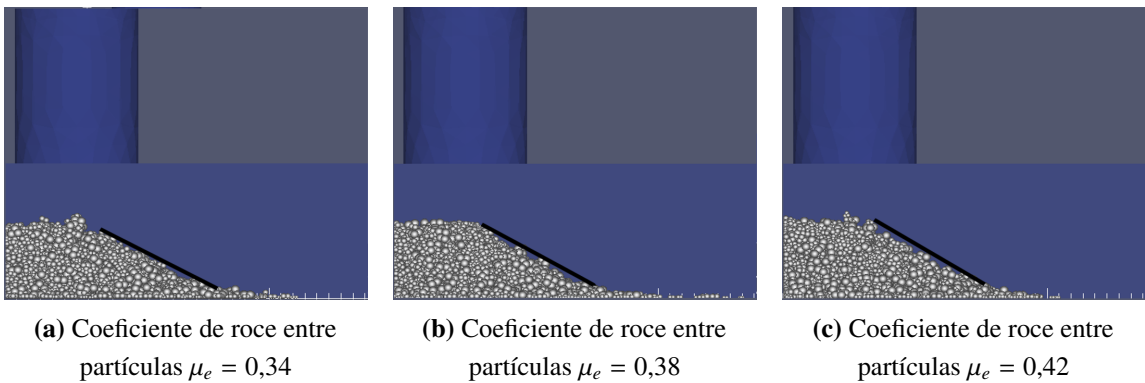


Figura 4.15: Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría 100 % menor a 6 [mm], partículas compuestas.

3. Granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm]. Partículas esféricas.

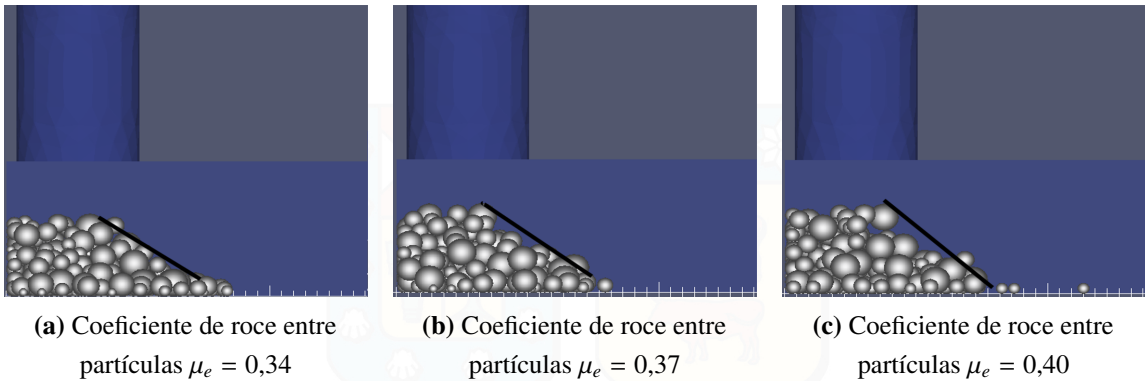


Figura 4.16: Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm], partículas esféricas.

4. Granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm]. Partículas compuestas.

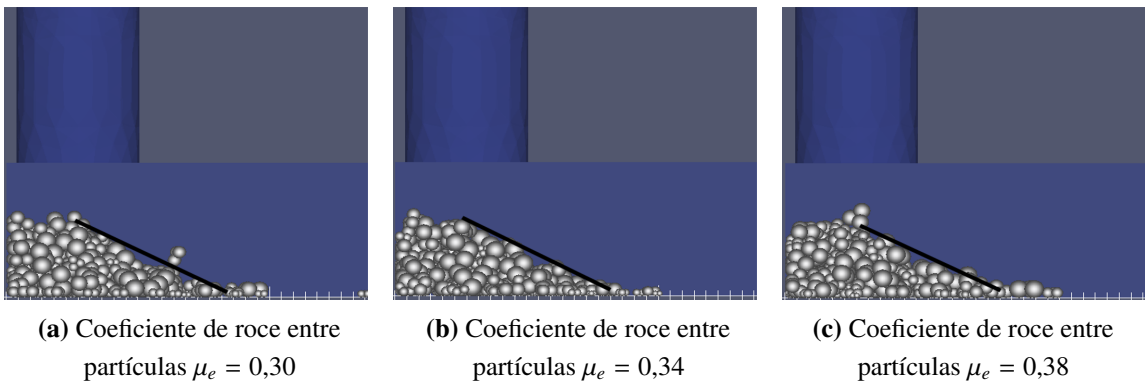
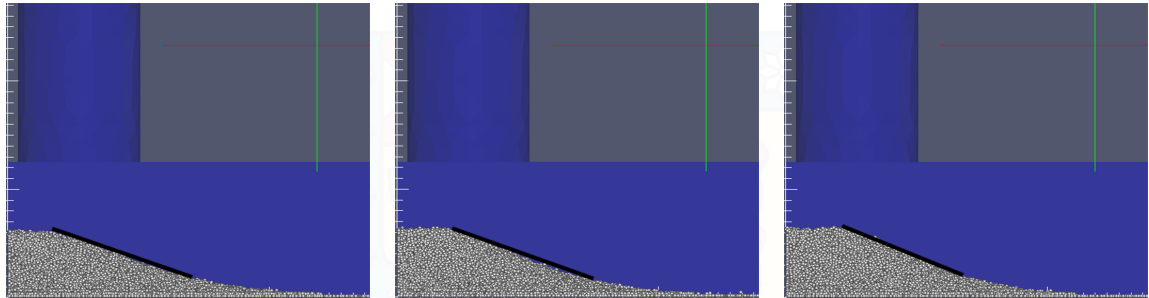


Figura 4.17: Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm], partículas compuestas.

5. Arena gruesa 1,6 [mm] .

6. Granulometría constante 1,6 [mm]. Partículas esféricas.



(a) Coeficiente de roce entre partículas $\mu_e = 0,16$

(b) Coeficiente de roce entre partículas $\mu_e = 0,18$

(c) Coeficiente de roce entre partículas $\mu_e = 0,20$

Figura 4.18: Resultados de las simulaciones para el coeficiente de roce entre partículas, para granulometría arena 1,6 [mm], partículas esféricas.

Luego, se contrasta con las fotografías tomadas del experimento.

1. Granulometría 100 % menor a 6 [mm].

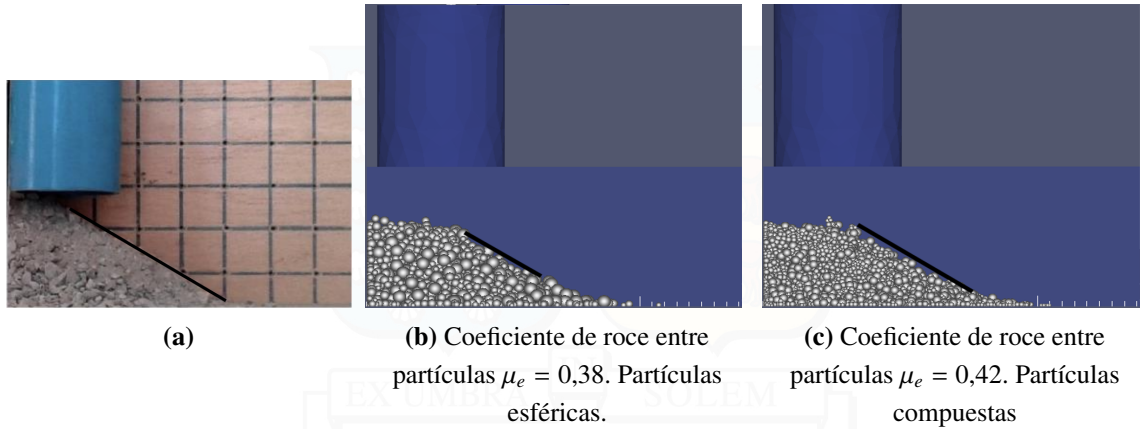


Figura 4.19: Comparativa entre la foto tomada del experimento y las simulaciones para la granulometría 100 % menor a 6 [mm].

Caso	Coefficiente μE [-]	Pendiente[-]	Error [%]
Experimental	-	0.667	-
Partículas esféricas	0.38	0.667	0.0
Partículas compuestas	0.42	0.667	0.0

Tabla 4.13: Comparativa entre las pendientes obtenidas en el experimento y en la simulación para la granulometría menor a 6 [mm].

2. Granulometría entre 6 [mm] y 12 [mm].

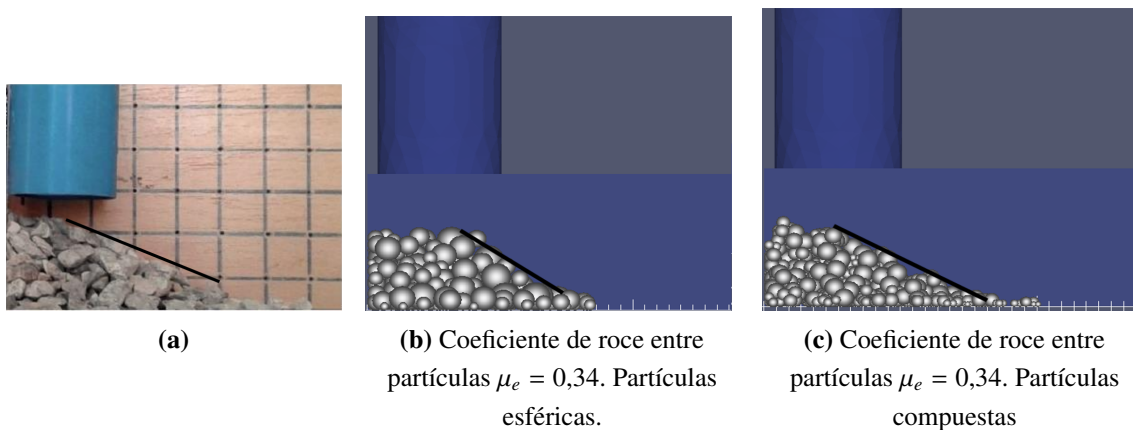


Figura 4.20: Comparativa entre la foto tomada del experimento y las simulaciones para la granulometría 100 % entre 6 [mm] y 12 [mm].

Caso	Coefficiente μE [-]	Pendiente[-]	Error [%]
Experimental	-	0.500	-
Partículas esféricas	0.34	0.571	14.29
Partículas compuestas	0.34	0.500.	0.00

Tabla 4.14: Comparativa entre las pendientes obtenidas en el experimento y en la simulación para la granulometría entre 12[mm] y 6 [mm].

3. Arena gruesa 1,6 [mm].

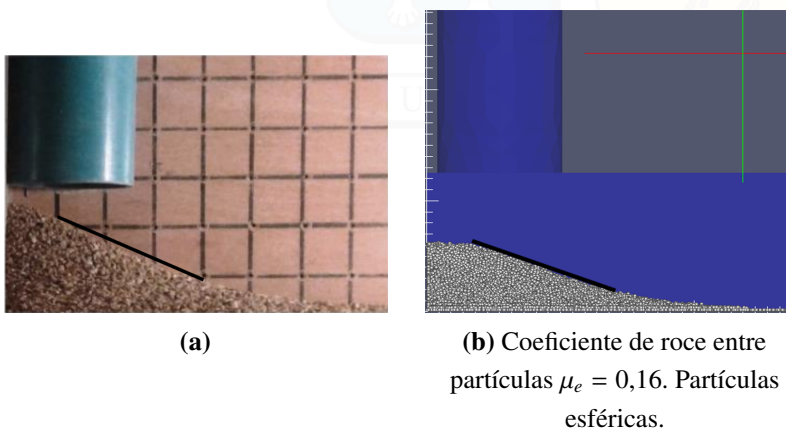


Figura 4.21: Comparativa entre la foto tomada del experimento y la simulación del arena.

Caso	Coefficiente μE [-]	Pendiente[-]	Error [%]
Experimental	-	0.333	-
Partículas esféricas	0.16	0.273	18.2

Tabla 4.15: Comparativa entre las pendientes obtenidas en el experimento y en la simulación para la granulometría correspondiente a arena.

4.5.5. Selección de coeficientes de roce.

Utilizando la información descrita anteriormente en las secciones 4.5.1, 4.5.2, 4.5.3 y 4.5.4, se completan los parámetros requeridos y se muestran en las tablas 4.16, 4.17 y 4.18.

Variable	Mineral fino simple	Mineral fino compuesto
μ Chuteinox	0.21	0.21
μ Chuteacero	0.451	0.45
μ Placa	1.6	1.4
μ Goma	1.835	1.94
μ E	0.42	0.4
$f\mu c$	0.5	0.5
Roda	0.94	0.7
μp	0.7	0.7

Tabla 4.16: Configuración de los coeficientes de roce utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % menor a 6 [mm].

Variable	Mineral grueso simple	Mineral grueso compuesto
μ Chuteinox	0.21	0.21
μ Chuteacero	0.451	0.45
μ Placa	1.8	1.6
μ Goma	1.835	1.835
μ E	0.16	0.11
$f\mu c$	0.5	0.5
Roda	0.94	0.941
μp	0.7	0.7

Tabla 4.17: Configuración de los coeficientes de roce utilizados para el ensayo del mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12 [mm] y 6 [mm].

Variable	Arena gruesa
μ Chuteinox	0.21
μ Chuteacero	0.21
μ Placa	0.7
μ Goma	1.835
μ E	0.18
$f\mu c$	0.5
Roda	0.94
μp	0.7

Tabla 4.18: Configuración de los coeficientes de roce utilizados en el ensayo del arena gruesa.

4.6. Módulos elásticos.

Los módulos elásticos utilizados para representar los materiales se muestran en la tabla 4.19:

Variable	Valor [N/m^2]
ϵ Chuteinox	2.1e11
ϵ Chuteacero	2.1e11
ϵ Placa	2.1e11
ϵ Goma	1.77e7
ϵ Mineral de cobre grueso	1.77e8
ϵ Mineral de cobre fino	1.77e8
ϵ Arena gruesa	0.7e9

Tabla 4.19: Configuración de los módulos elásticos utilizados en las simulaciones.

4.7. Calibración de la dureza específica acero SAE-A37.

Debido a que no se conoce el valor de la constante de desgaste específico del acero SAE-A37, se procede a utilizar la información de la tasa de desgaste obtenida en el ensayo de la rueda de desgaste. Donde el desgaste acumulado para el mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] se muestran en la tabla 4.20. La metodología y la obtención de los datos experimentales están en (M. Erazo, 2013).

Medición	Masa probeta [g]	Tiempo [s]
1	256.00	25.9
2	255.95	26.1
3	255.94	24.5
4	255.91	24.9
5	255.89	24.1
6	255.85	24.7
7	255.84	23.9
8	255.83	24.3
9	255.81	23.9
10	255.80	24.9

Tabla 4.20: Datos medidos para el desgaste de la probeta de acero SAE-A37 utilizando mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] para desgastar la probeta.

De acuerdo a los datos obtenidos, se muestran los resultados en la tabla 4.21.

Masa total removida	0.200 [g]
Tiempo total ensayo	247.2 [s]
Tasa de desgaste	0.0008090615 [g/s]

Tabla 4.21: Datos calculados con la información del desgaste de la probeta de acero SAE-A37 utilizando mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] para desgastar la probeta.

Al tener esta información se utilizan valores de prueba para el coeficiente de dureza específica y se calcula la tasa de desgaste de la probeta en la simulación.

Dureza específica [N/m^2]	Tasa de desgaste obtenida [g/s]	Error [%]
449E9	0.00053161	34.29
388E9	0.00058531	27.65
327E9	0.00075044	7.25
267E9	0.00081766	1.06
206E9	0.00109959	35.91
145E9	0.00128968	59.40

Tabla 4.22: Tasa de desgaste obtenida a diferentes valores de dureza específica para representar la probeta de acero SAE-A37, utilizando mineral de cobre con granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm] para desgastar la probeta.

Usando 267E9[N/m^2] para la dureza específica D se obtiene un error de 1,06[%] se selecciona este valor como la dureza específica del acero SAE-A37.

5 | Geometría y representación del ensayo.

Las cualidades del software permiten integrar desde uno hasta tres elementos tridimensionales previamente discretizados por enmallado de superficie de figuras triangulares en extensión “.stl”. En la creación de la malla se utiliza el software GiD™, que permite generar elementos de superficie con proporciones cercanas al triángulo isósceles y además permite afinar la malla en zonas específicas para poder representar con detalle el desgaste.

5.1. Superficies y enmallado superficial.

En representación del ensayo de la rueda desgaste se propone utilizar tres geometrías de enmallado superficial de los elementos de máquina: Un chute de tolva rectangular estático, una rueda giratoria con respecto a su eje y una placa plana pivoteada con respecto a un eje, esta placa plana está sometida a momento debido a la presión que se aplica sobre el porta-probeta.

5.1.1. Placa de desgaste.

Este enmallado es una superficie rectangular que representa la probeta que se desgasta en la simulación de la rueda de desgaste. La cantidad de vértices utilizada es 25272, en consecuencia se tienen 8424 elementos de malla dispuestos de forma que la zona donde se aprecian los elementos más finos es donde impactan las esferas que simulan el sólido a granel. La miniatura de la malla se puede apreciar en la figura 5.1.

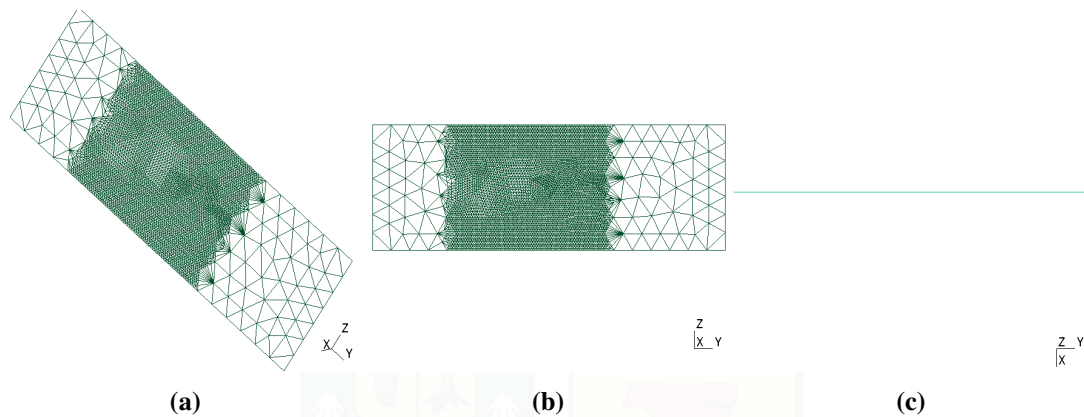


Figura 5.1: Enmallado de la placa de desgaste utilizada en la simulación.

La configuración de la posición del enmallado que representa la placa de desgaste se presenta en la tabla 5.1 de tal forma que en la misma posición que el ensayo de la rueda de desgaste utilizada en (M. Erazo, 2013).

Variable	Valor
D	267e9
Momento	5.7119
Poisson	0.3
Dxplaca	0.0
Dyplaca	0.0
Dzplaca	0.11
Puntogiro_x	0.1390896
Puntogiro_y	0.0
Puntogiro_z	0.0869142

Tabla 5.1: Configuración de las variables que controlan la posición de “*placader.stl*”.

La calibración del parámetro de dureza específica D es el único parámetro del enmallado que necesita calibración, ya que de acuerdo con la representación del modelo de desgaste de Archard en MED 4 se debe utilizar la constante de desgaste específico de cada material k , por lo tanto la obtención del acero SAE A-37 utilizado en el ensayo de la rueda de desgaste se explicará en la sección de calibración de la dureza específica 4.7.

5.1.2. Rueda giratoria.

Este enmallado superficial corresponde a la rueda que regula la velocidad del flujo que pasa por el ensayo según la cantidad de rpm que gira la rueda. La cantidad de vertices

utilizada es 41028, en consecuencia se tienen 13676 elementos de malla dispuestos de forma regular. La miniatura de la malla se puede apreciar en la figura 5.2

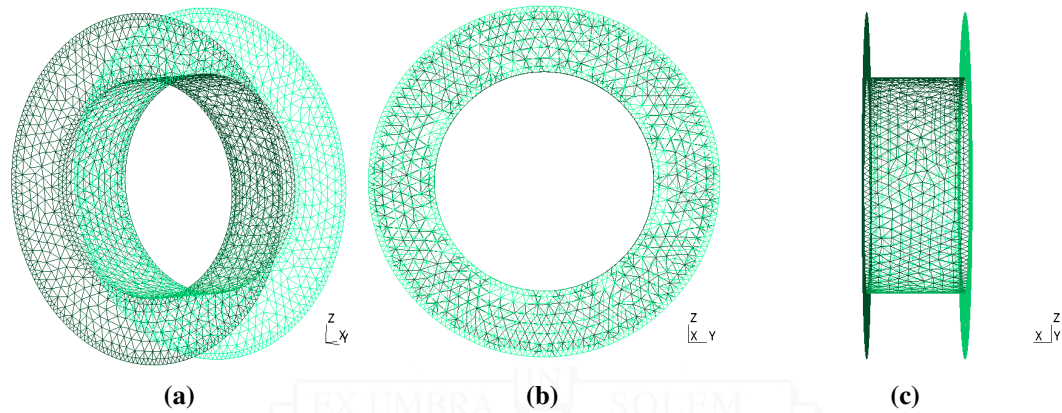


Figura 5.2: Enmallado de la rueda giratoria utilizada en la simulación.

La configuración de la posición del enmallado que representa la rueda de goma se presenta en la tabla 5.2 de tal forma que la placa de desgaste quede haciendo contacto con la rueda mientras esta gira.

Variable	Valor
Rps	7.5833
Dxrueda	0.0
Dyrueda	0.0
Dzchute	0.0

Tabla 5.2: Configuración de las variables que controlan la posición de “rueda.stl”.

5.1.3. Chute tolva rectangular.

Este enmallado superficial corresponde a la sección de entrada del sólido a granel donde el flujo se tiende a estabilizar debido a la interacción con el chute. La cantidad de vértices utilizada es 45294, en consecuencia se tienen 15098 elementos de malla dispuestos de forma regular. La miniatura de la malla se puede apreciar en la figura 5.3

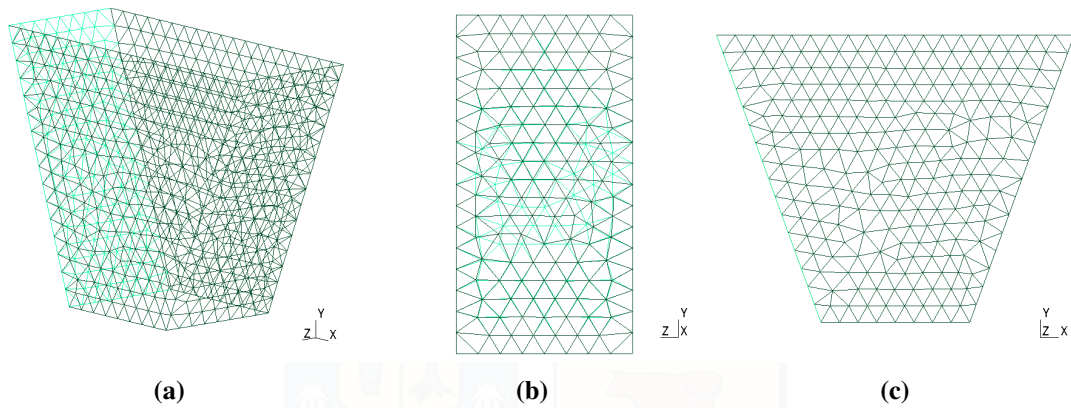


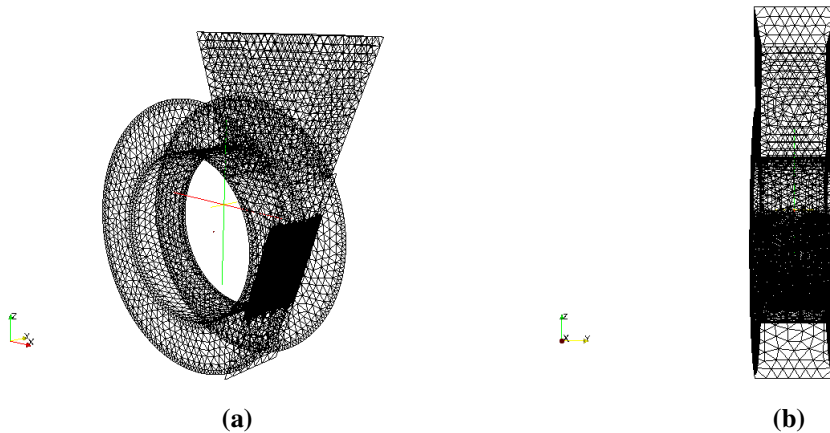
Figura 5.3: Enmallado del chute estático utilizado en la simulación.

La configuración de la posición del enmallado que representa al chute se presentan en la tabla 5.3. De tal forma que sea capaz de recibir el flujo del material granular para estabilizarlo.

Variable	Valor
Dxchute	0.0595
Dychute	-0.040
Dzchute	0.083

Tabla 5.3: Configuración de las variables asociadas a la posición del chute estático colocándolo arriba de del chute de tolva rectangular.

Al final de la configuración, se muestra el conjunto resultante post-procesado del ensayo de la rueda de desgaste. Ver figura 5.4.



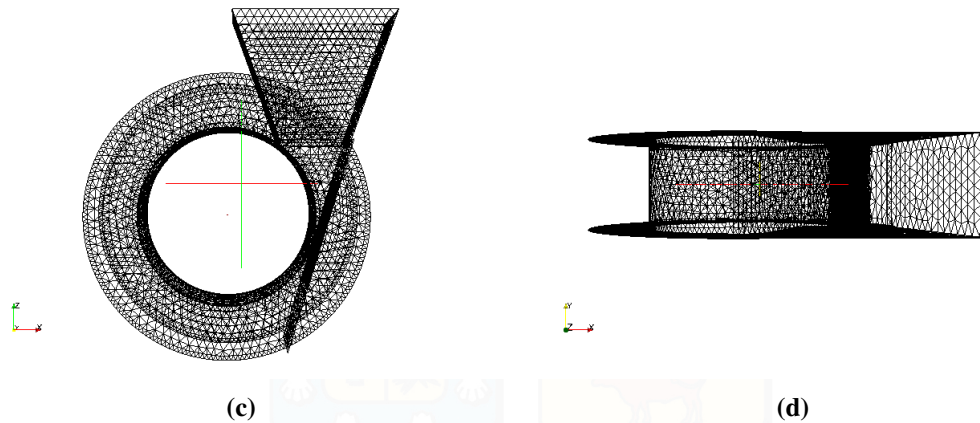


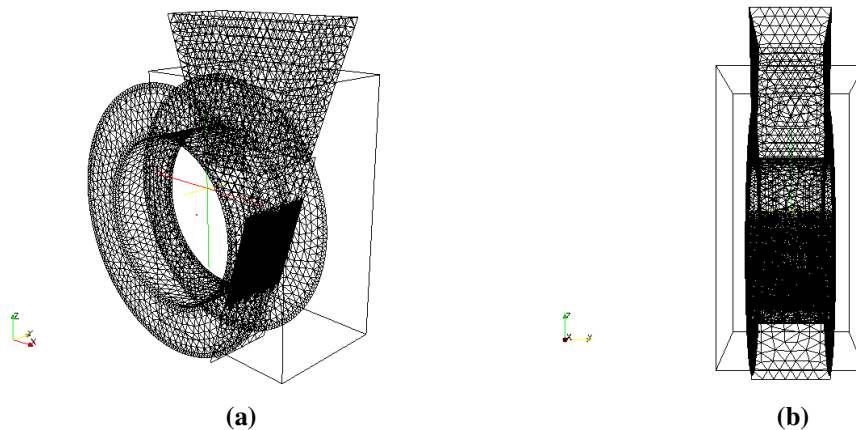
Figura 5.4: Conjunto de las tres geometrías que representan el ensayo de la rueda de desgaste.

Luego se adapta la configuración del volumen de control para que el espacio de trabajo sea el mínimo posible, ya que de esta forma reduce el tiempo de cálculo al tener menor cantidad de partículas rondando en la simulación. Estas se detallan en la tabla 5.4.

Variable	Valor
Xiz	0.01
Xder	0.2
Yiz	-0.07
Yder	0.07
AlturaCorte	-0.11

Tabla 5.4: Configuración del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.

Se puede ver en la figura 5.5 el área de trabajo que contiene el flujo granular, más no contiene el enmallado donde no interactúan partículas.



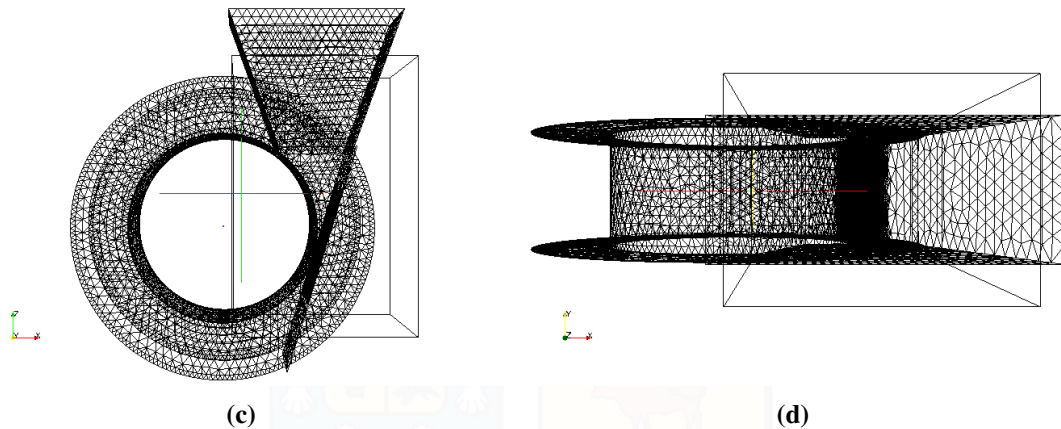


Figura 5.5: Detalle del contorno del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.

En cuanto a la calibración se propone adicionar tres enmallados superficiales, los cuales corresponden a; Un cilindro hueco estático, una superficie cuadrada y un recipiente de base cuadrada con dos paredes, que recibe el material para la calibración del coeficiente de roce entre partículas y de rodadura.

Estos tres enmallado se configuran de la misma forma que los enmallados utilizados para la representación de la rueda de desgaste, pero el código solo toma en cuenta las posiciones dejando fija la dinámica de los objetos.

6 | Resultados de la simulación del ensayo.

Al completar los cinco archivos utilizados para las configuraciones correspondientes a la simulación se procede a iniciar el software para comparar los resultados entre las tasas de desgaste de los distintos sólidos a granel y las representaciones posibles utilizando partículas esféricas, macropartículas, granulometría o radio constante.

6.1. Hardware y software.

Para realizar los cálculos se utilizó el servidor *LEGACY*, dedicado a los alumnos que trabajan en el AULA CIMNE.

- Hardware
 - Marca: Lanix
 - Sistema operativo: Scientific Linux release 7.2
 - Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2687W 0 @ 3.10GHz 16 nucleos Lógicos
 - Memoria RAM: 94 GB
 - Disco duro: Disco1 SSD de 128 GB
 - Disco duro secundario: SATA de 1 TB
- Software
 - Compilador fortran: ifort version 16.0.1
 - Visualizador de archivos vtk: Paraview 4.1.0 64 bits
 - Enmallador GiD para 64 bits
 - Gmesh version 2.12.0

6.2. Resultados

Se dividen los resultados en tres secciones de acuerdo al material granular utilizado, estos son:

1. Mineral fino de cobre, granulometría 100 % menor a 6[mm].
2. Mineral grueso de cobre, granulometría 100 % entre 12[mm] y 6[mm].
3. Arena gruesa, granulometría constante 100 % 1,6[mm].

6.2.1. Mineral fino de cobre.

1. Partículas esféricas

Se muestra la posición de la placa de desgaste en la simulación con el fin de obtener el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste de Archard.

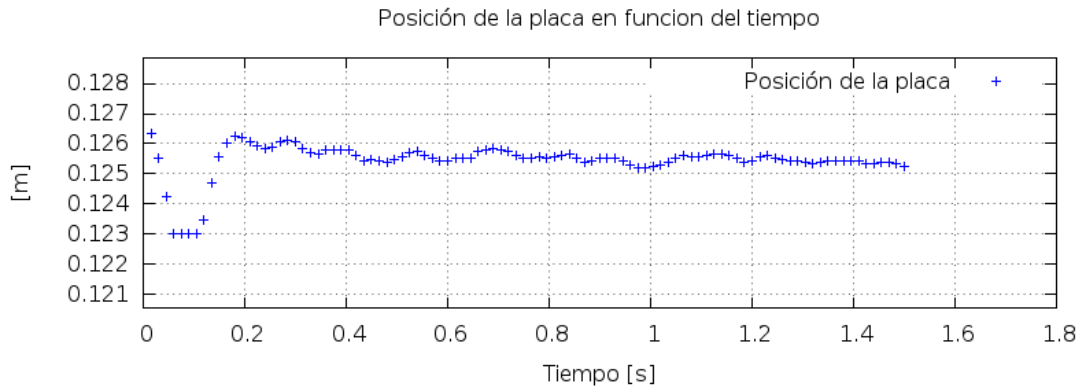


Figura 6.1: Posición de la placa en función del tiempo, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.

Se muestra como la placa antes de los 0,2[s] de simulación alcanza una cota de valores, por lo tanto cualquier tiempo superior a este es posible activar el modelo de desgaste. En este caso se ha utilizado 0,5[s] como factor de seguridad, donde la gráfica de la tasa de desgaste se muestra en la figura 6.2.

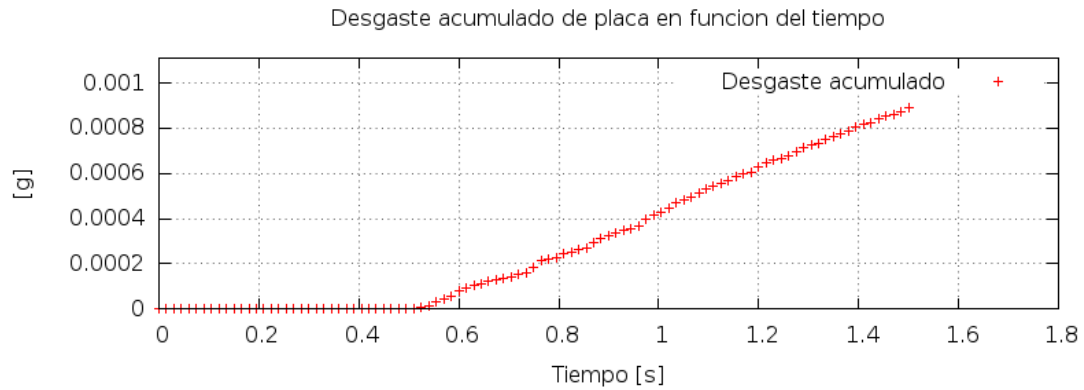


Figura 6.2: Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando partículas esféricas para representar la granulometría fina.

Donde la tasa de desgaste correspondiente es $0,0009417[g/s]$.

2. Macropartículas compuestas

Se muestra la posición de la placa de desgaste en la simulación con el fin de obtener el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste de Archard.

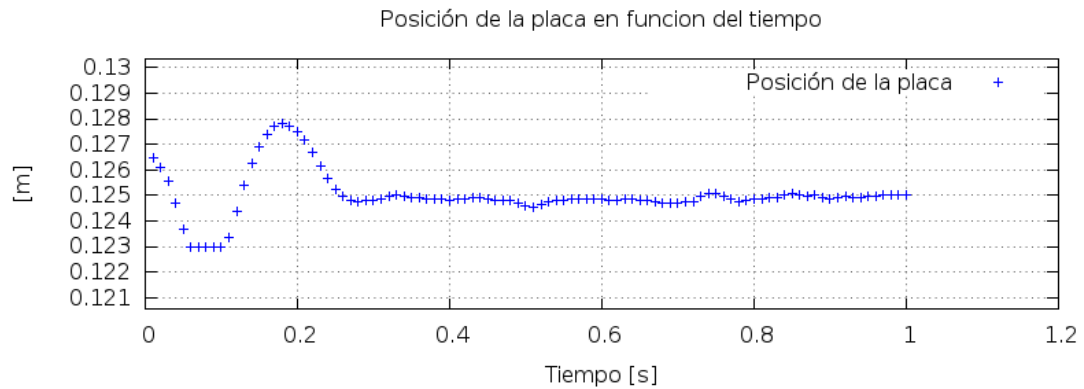


Figura 6.3: Posición de la placa en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría fina, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.

Se muestra como la placa cerca a los $0,3[s]$ de simulación alcanza una cota de valores, por lo tanto cualquier tiempo superior a este es posible activar el modelo de desgaste. En este caso se ha utilizado $0,4[s]$ como factor de seguridad, donde la gráfica de la tasa de desgaste se muestra en la figura 6.4.

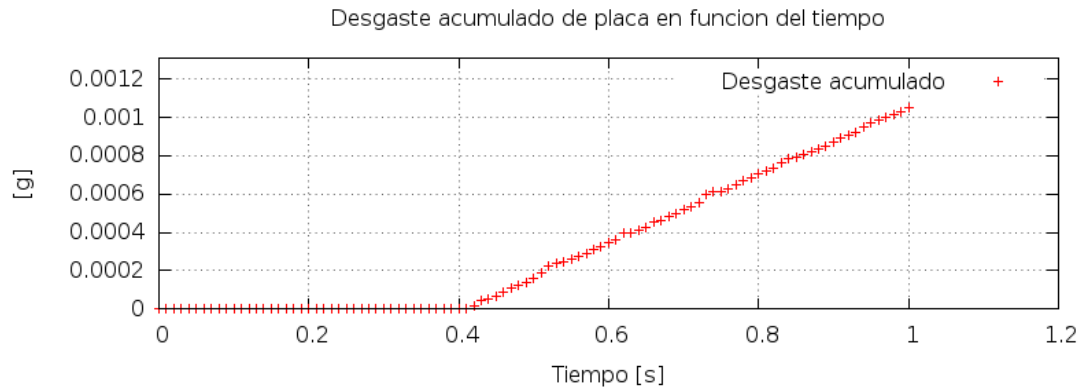


Figura 6.4: Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría fina.

Donde la tasa de desgaste correspondiente es $0,0017684[g/s]$.

3. Comparativa.

Tomando en cuenta la tabla 6.1 de datos obtenida del ensayo con material fino de cobre en (M. Erazo, 2013).

Desgaste acumulado	Tiempo [s]
0	0
0.04	40.3
0.09	80.8
0.13	121.9
0.17	162.8
0.22	203.4
0.25	242.7
0.28	284
0.31	324.8
0.34	364.7
0.39	404.7
Tasa de desgaste [g/s]	0.0009636

Tabla 6.1: Datos experimentales obtenidos por M. Erazo para el mineral fino de cobre.

Comparando con los resultados obtenidos en las simulaciones se obtiene la tabla 6.2.

Representación	Desgaste simulado [g/s]	Desgaste experimental [g/s]	Error [%]
Esferas	0.0009417	0.0009636	2.27
Macropartículas	0.0017684	0.0009636	83.52

Tabla 6.2: Comparativa entre las tasas de desgaste simuladas y la experimental para la granulometría fina.

Obteniendo en ambas simulaciones un orden de magnitud cercano al de la tasa de desgaste real, siendo la tasa más cercana obtenida con partículas esféricas con un error de 2,27[%] mientras que la simulación utilizando macropartículas compuestas se tiene un error de 83,52[%].

6.2.2. Mineral grueso de cobre.

1. Partículas esféricas

Se muestra la posición de la placa de desgaste en la simulación con el fin de obtener el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste de Archard.

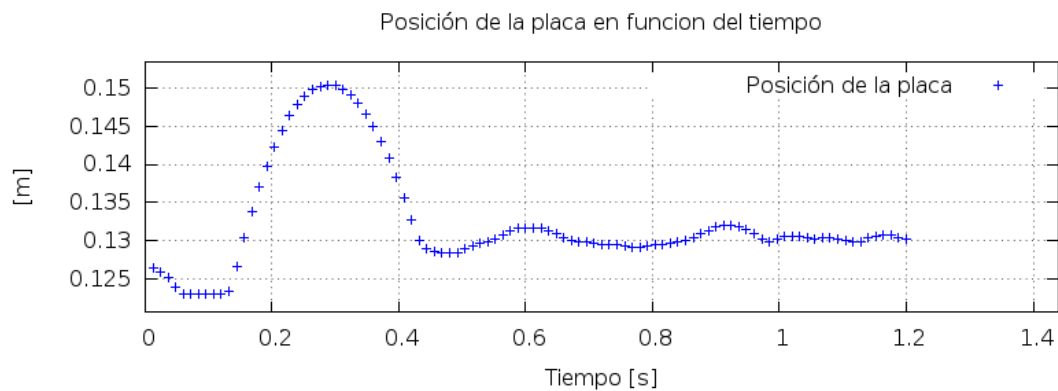


Figura 6.5: Posición de la placa en función del tiempo, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.

Se muestra como la placa antes de los 0,5[s] de simulación alcanza una cota de valores, por lo tanto cualquier tiempo superior a este es posible activar el modelo de desgaste. En este caso se ha utilizado 0,6[s] como factor de seguridad, donde la gráfica de la tasa de desgaste se muestra en la figura 6.6.

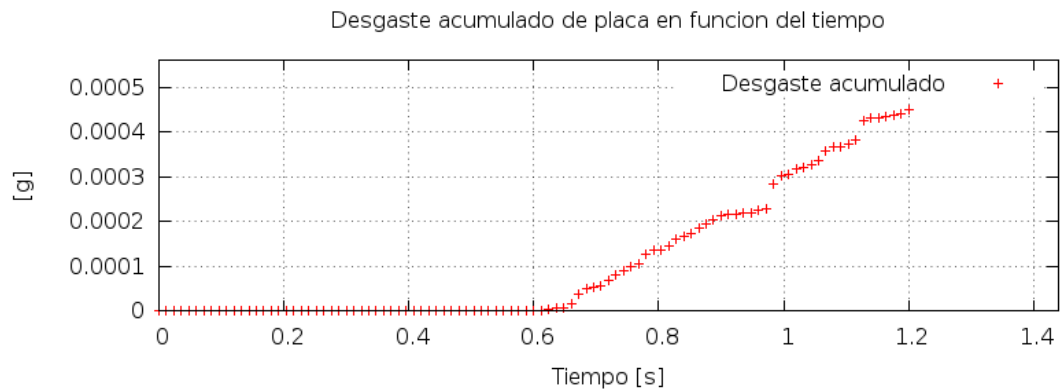


Figura 6.6: Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando partículas esféricas para representar la granulometría gruesa.

Donde la tasa de desgaste correspondiente es $0,0008209[g/s]$.

2. Macropartículas compuestas

Se muestra la posición de la placa de desgaste en la simulación con el fin de obtener el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste de Archard.

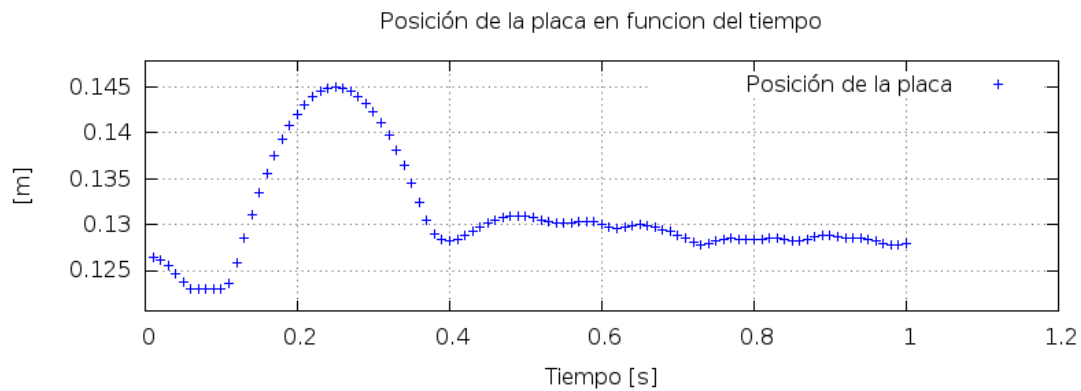


Figura 6.7: Posición de la placa en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría gruesa, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.

Se muestra como la placa cerca a los $0,5[s]$ de simulación alcanza una cota de valores, por lo tanto cualquier tiempo superior a este es posible activar el modelo de desgaste. En este caso se ha utilizado $0,6[s]$ como factor de seguridad, donde la gráfica de la tasa de desgaste se muestra en la figura 6.8.

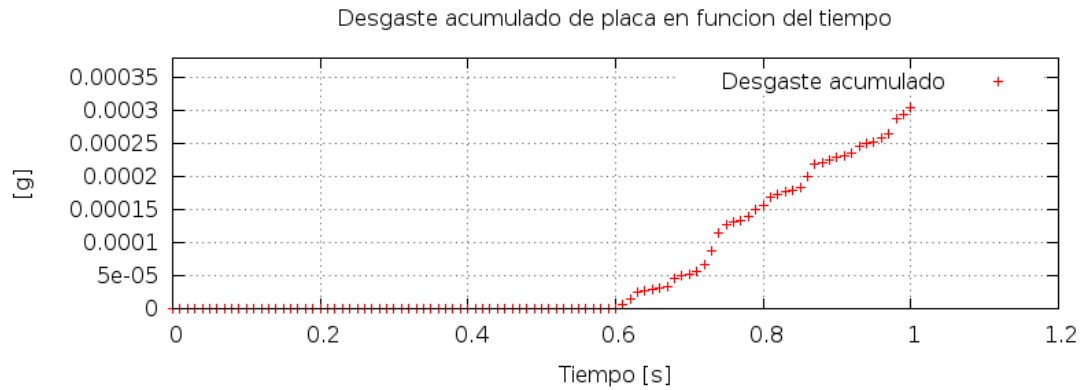


Figura 6.8: Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando macropartículas compuestas para representar la granulometría gruesa.

Donde la tasa de desgaste correspondiente es $0,0007731[g/s]$.

3. Comparativa.

Tomando en cuenta la tabla 6.3 de datos obtenida del ensayo con material fino de cobre en (M. Erazo, 2013).

Desgaste acumulado	Tiempo [s]
0.05	52
0.06	76.5
0.09	101.4
0.11	125.5
0.15	150.2
0.16	174.1
0.17	198.4
0.19	222.3
0.2	247.2
Tasa de desgaste [g/s]	0.0008091

Tabla 6.3: Datos experimentales obtenidos por M. Erazo para el mineral grueso de cobre.

Comparando con los resultados obtenidos en las simulaciones se obtiene la tabla 6.4.

Representación	Desgaste simulado [g/s]	Desgaste experimental [g/s]	Error [%]
Esferas	0.0008209	0.0008091	1.46
Macropartículas	0.0007731	0.0008091	4.45

Tabla 6.4: Comparativa entre las tasas de desgaste simuladas y la experimental para la granulometría gruesa.

Donde en ambas simulaciones se obtienen cotas de error relativo pequeñas, 1,46[%] para la simulación utilizando partículas esféricas y 4,45[%] utilizando macropartículas compuestas.

6.2.3. Arena gruesa.

1. Partículas esféricas

Se muestra la posición de la placa de desgaste en la simulación con el fin de obtener el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste de Archard.

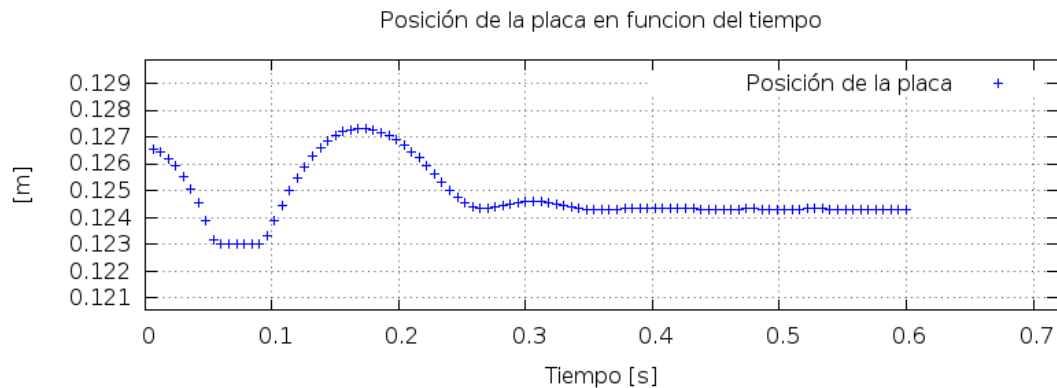


Figura 6.9: Posición de la placa en función del tiempo, con el fin de determinar el tiempo mínimo para activar el modelo de desgaste utilizado.

Se muestra como la placa cerca de 0,3[s] de simulación alcanza una cota de valores, por lo tanto cualquier tiempo superior a este es posible activar el modelo de desgaste. En este caso se ha utilizado 0,4[s] como factor de seguridad, donde la gráfica de la tasa de desgaste se muestra en la figura 6.10.

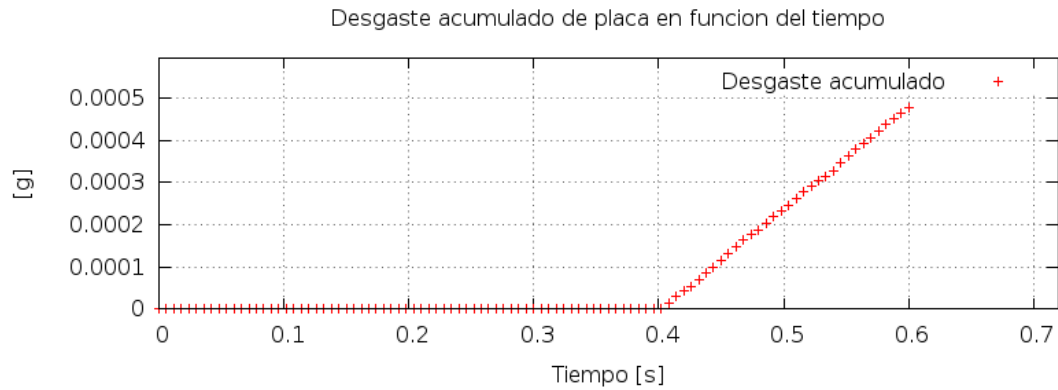


Figura 6.10: Desgaste acumulado en función del tiempo utilizando partículas esféricas para representar la arena de granulometría constante.

Donde la tasa de desgaste correspondiente es $0,0024188[g/s]$.

2. Comparativa.

Tomando en cuenta la tabla 6.5 de datos obtenida del ensayo con material fino de cobre en (M. Erazo, 2013).

Desgaste acumulado	Tiempo [s]
0.16	58.3
0.29	116.2
0.45	175.3
0.57	233.9
0.67	291.8
0.72	349.4
0.84	407.9
0.95	466.2
1.04	527.1
1.11	586.8
Tasa de desgaste [g/s]	0.0018916

Tabla 6.5: Datos experimentales obtenidos por M. Erazo para el arena gruesa.

Comparando con los resultados obtenidos en las simulaciones se obtiene la tabla 6.6.

Representación	Desgaste simulado [g/s]	Desgaste experimental [g/s]	Error [%]
Esferas	0.0024188	0.0018916	27.87

Tabla 6.6: Comparativa entre las tasas de desgaste simuladas y la experimental para la granulometría gruesa.

Se obtiene un error considerable al momento de comparar las tasas de desgaste experimental con la simulada. En este caso particular se debe a que se puso énfasis en mejorar el tiempo de cómputo del software utilizando la menor cantidad de partículas posibles en la simulación, esto sin duda pudo haber alterado la simulación.

6.3. Discusión y análisis.

1. De acuerdo al modelo de desgaste utilizado en 3.2.4 específicamente en la ecuación 3.10, se predice que el desgaste acumulado es de tipo lineal debido a que la fuerza de indentación de la partícula depende linealmente de la presión que ejerce sobre el material que está desgastando. Este fenómeno se aprecia en las gráficas de la simulación 6.2, 6.4, 6.6 6.8 y 6.10. por lo tanto se puede afirmar que el software predice correctamente la tendencia del desgaste acumulado.
2. Una vez asegurado que el software predice correctamente la tendencia lineal del desgaste, se toman en cuenta los valores de las tasas de desgaste obtenidas, donde estas se pueden ver en las tabla 6.2, 6.4 y 6.6.

Al simular el mineral fino de cobre con partículas esféricas se calcula un error de 2,27 % y simular mineral grueso de cobre con partículas esféricas y macropartículas, resulta un error de 1,46 % y 4,45 % respectivamente, de acuerdo a lo antes expuesto, estas simulaciones representan claramente la tasa de desgaste obtenida experimentalmente donde estos errores en la simulación son pequeños. No es así en el caso de la simulación de mineral fino de cobre representado por macropartículas compuestas y ni para la simulación con arena gruesa obteniendo un error de 83,52 % y 27,87 % respectivamente. Estos errores podrían explicarse debido a que la selección del número total de partículas utilizadas en esta simulación, ya que para disminuir el tiempo de cómputo se utilizó el menor número de partículas posibles para que la simulación tenga convergencia.

3. Para representar el comportamiento de los sólidos a granel en la simulación, se deben hacer una serie de ensayos característicos para cada propiedad, mientras para obtener la correcta constante de dureza específica D , se debe hacer una tabulación bibliográfica de las tasas de desgaste de diferentes materiales.

7 | Optimización y mejoras.

Durante este trabajo, se dedicaron grandes esfuerzos a la mejora del software utilizado para ello fué necesario ordenar el código en base a las funciones de cada parte de tal forma que se pudiese apreciar en forma de “*subrutinas*” para lograr un mejor entendimiento del código, luego se hizo un perfil de tiempo del código para determinar cual es la sección que más tiempo de cálculo toma.

7.1. Modularización del código.

Si bien el código original está seccionado y autoexplicado debido a los comentarios que posee, no está modularizado porque es un código escrito en base a un archivo principal.

Para realizar la modularización se utilizó una técnica sencilla que consiste en declarar todas las variables en un “*módulo Fortran*” y dividir el código en las mismas “*subrutinas*” que requiere el modelo numérico explicado en la sección 3.4.1.1.

Como resultado de este proceso se obtuvo un programa principal (*main*) con tres subrutinas que son requeridas directamente de él, once subrutinas que son requeridas de las subrutinas anteriores, tres subrutinas que son requeridas por las anteriores y una subrutina requerida una de las subrutinas anteriores. Para ordenar las subrutinas se propusieron niveles siendo:

- a) Nivel 1: Subrutinas llamadas desde el programa principal
- b) Nivel 2: Subrutinas llamadas desde subrutinas de nivel 1
- c) Nivel 3: Subrutinas llamadas desde subrutinas de nivel 2
- d) Nivel 4: Subrutinas llamadas desde subrutinas de nivel 3

Luego se utilizara este orden para hacer referencia el perfil del código.

7.1.1. Perfil de tiempos del código.

Una vez dividido el código se implementó una rutina que marca y guarda el tiempo de cada subrutina en cada ciclo, luego se prepara una configuración base del software la que permite acceder a una simulación donde los tiempos de cálculo son del orden de los minutos.

En resumen esta configuración corresponde a la malla utilizada en el ensayo de la rueda de desgaste, granulometría gruesa, 700 partículas esféricas, paso de tiempo $h = 5,0 * E-06$ y 1[s] de simulación. Debido a esta configuración el tiempo de cálculo se reduce con el fin de hacer la medición ya que esta produce un efecto negativo en cuanto al costo computacional, además esta simulación no es convergente y por lo tanto solo se toma como base para la medición de tiempos.

Este artilugio permite estimar cual es el set de "subrutinas" más costosas computacionalmente y también permite saber cual rutina optimizar para reducir los tiempos de ejecución del software.

Los resultados de tiempo antes de optimizar para las rutinas de nivel 1 se pueden ver en la tabla 7.1:

Subrutina	Tiempo [s]	Porcentaje
1-1 Set. Variables	0.23	0.06
1-2 Lectura de Malla	5.26	1.54
1-3 Ciclos	331.36	98.40
Total	336.85	100

Tabla 7.1: Mediciones para obtener el perfil del código de las subrutinas de nivel 1

La figura 7.1 muestra el perfil de tiempos del programa por subrutinas de nivel 1.

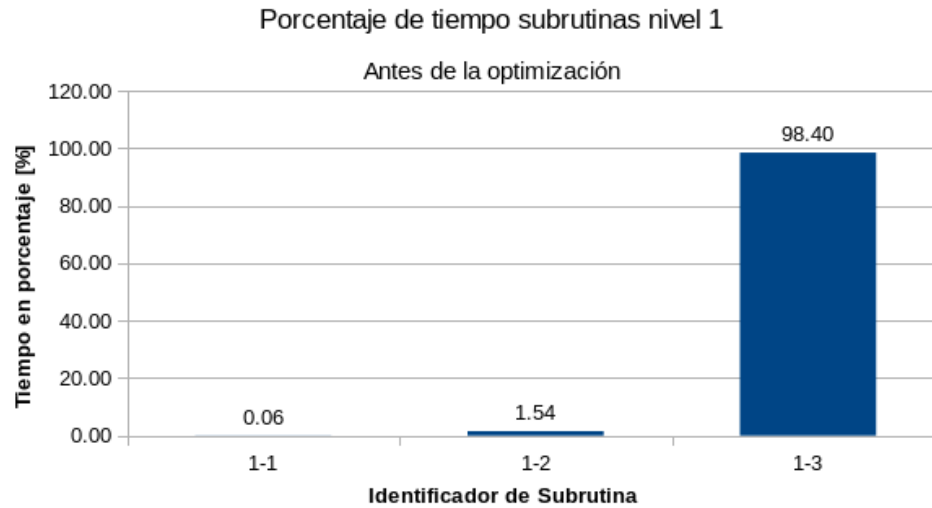


Figura 7.1: Perfil del código en las subrutinas de nivel 1

Como es de esperar la parte cíclica del código es la que demanda la mayor parte del tiempo de ejecución del programa 98,40[%] se debe a que son algoritmos que deben ejecutarse en cada paso de tiempo mientras que las subrutinas de **1-1 Seteo de variables** y **1-2 Lectura de malla** se ejecutan tan solo una vez al inicio del programa, siendo de bajo costo computacional.

Luego se analiza la subrutina **1-3 Ciclos** ya que es la de mayor tiempo computacional además la que más subrutinas de nivel 2 necesita para funcionar, los resultados antes de optimizar se ven en la tabla 7.1.

Subrutina	Tiempo [s]	Porcentaje
2-1 Desplazamientos	5.07	1.51
2-2 Inserción de partículas	0.48	0.14
2-3 Det. Zona de Contacto	280.53	83.30
2-4 Búsqueda de vecinos	30.61	9.09
2-5 Cálculos sobre Partículas	4.97	1.48
2-6 Homologación de giros	4.16	1.24
2-7 Integración de la posición	0.51	0.15
2-8 eliminación de partículas	0.93	0.28
2-9 cálculo de desgaste acumulado	2.18	0.65
2-10 cálculo de energía del sistema	0.92	0.27
2-11 Escritura de archivos	1.01	0.30
Total	331.36	98.40

Tabla 7.2: Mediciones para obtener el perfil del código de las subrutinas de nivel 2

La figura 7.2 muestra el perfil de tiempos del programa por subrutinas de nivel 2, llamadas por la subrutina **1-3 ciclos**:

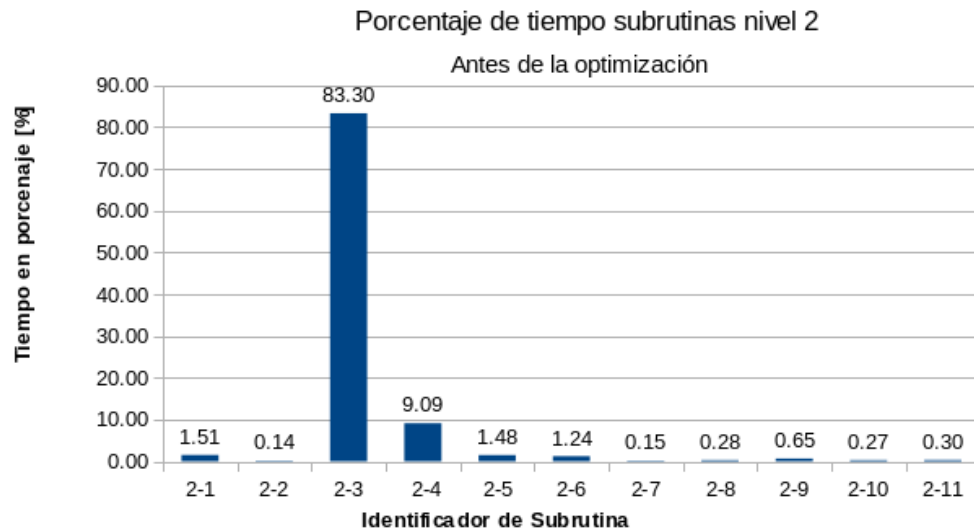


Figura 7.2: Perfil del código en las subrutinas de nivel 2

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 7.2 se aprecia que la subrutina **2-3 Detección de zona de contactos** destaca del resto consumiendo el 83,30[%] de tiempo de ejecución del código mientras que la subrutina predecesora **2-4 Búsqueda de de vecinos** ocupa tan sólo el 9,09[%] del tiempo.

Se deja nota de que esta última subrutina depende de la cantidad de partículas en la simulación por lo tanto para una medición correcta se debe variar la granulometría con el fin de hacer variar el número de partículas dentro del volumen de control pero en este caso se hace imposible tomar una medición representativa debido a que al cambiar la granulometría se debe variar el paso de tiempo afectando el ensayo base para la medición.

7.2. Mejoras.

7.2.1. Memoria asignada sobre partículas.

Una de las limitantes más grandes que tenía el software es el uso de memoria estática, esto quiere decir que al momento de iniciarlo ocupa un “bloque” de memoria fijo independiente de la cantidad de partículas utilizadas en la simulación.

Esta forma de asignar la memoria tiene aspectos positivos y negativos, pero los más relevantes son; permite desligarse de la necesidad de saber la cantidad de partículas necesarias en la simulación en el momento de configurar el programa pero ocupa una cantidad fija

de memoria independiente de la cantidad de partículas necesarias y en caso de necesitar más de 50000 partículas (número máximo permitido) el software deja de inyectar partículas en la simulación vaciando el volumen de control.

En la figura 7.3 se observa el diagrama de flujo de la rutina encargada de la asignación de memoria estática.

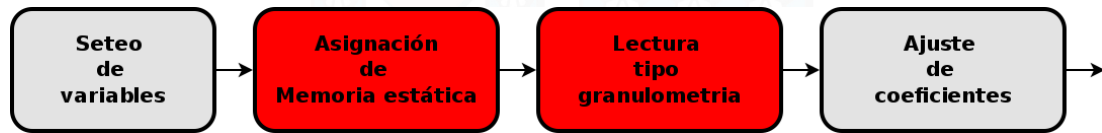


Figura 7.3: Diagrama de la subrutina 1-1 seteo de variables antes de la modificación.

Por estas razones se optó en utilizar memoria asignada y quiere decir que el número máximo de partículas en la simulación va a ser determinado por el usuario en el archivo de texto de entrada. En la figura 7.4 se refleja el cambio de la asignación de memoria en la rutina de 1-1 seteo de variables.

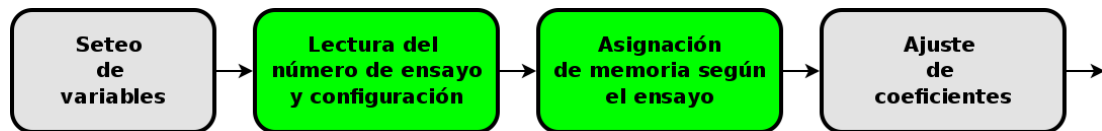


Figura 7.4: Diagrama de la subrutina 1-1 seteo de variables después de la modificación propuesta en este trabajo.

A raíz de esto al utilizar menos de 50000 partículas como máximo se hizo más profundo el problema de programación en el cual la búsqueda de partículas dependía de la probabilidad de encontrar partículas consecutivas libres para la inyección, este problema se resuelve en la sección 7.2.2.

7.2.2. Inyección de partículas.

Debido que el software contaba con problemas en la inyección de partículas, primero se hizo un análisis acerca del funcionamiento de la subrutina encargada donde se dedujo que esta cuenta con tres etapas diferenciables entre si.

1. Evaluación y detección de la partícula más alta en la zona de inyección.
2. Búsqueda de partículas libres en la simulación.
3. Inserción de partículas en el espacio de trabajo, con las condiciones iniciales.

El problema se encuentra en la segunda etapa de la subrutina donde se puede ver en el diagrama de flujos en la figura 7.5 la dirección de la flecha marcada con rojo debido a que la búsqueda funciona hasta encontrar una partícula que no está disponible, luego procede a inyectar las partículas encontradas y no espera a llenar toda la sección de inyección definida, en resumen “la inyección depende de la probabilidad de encontrar partículas consecutivas”.

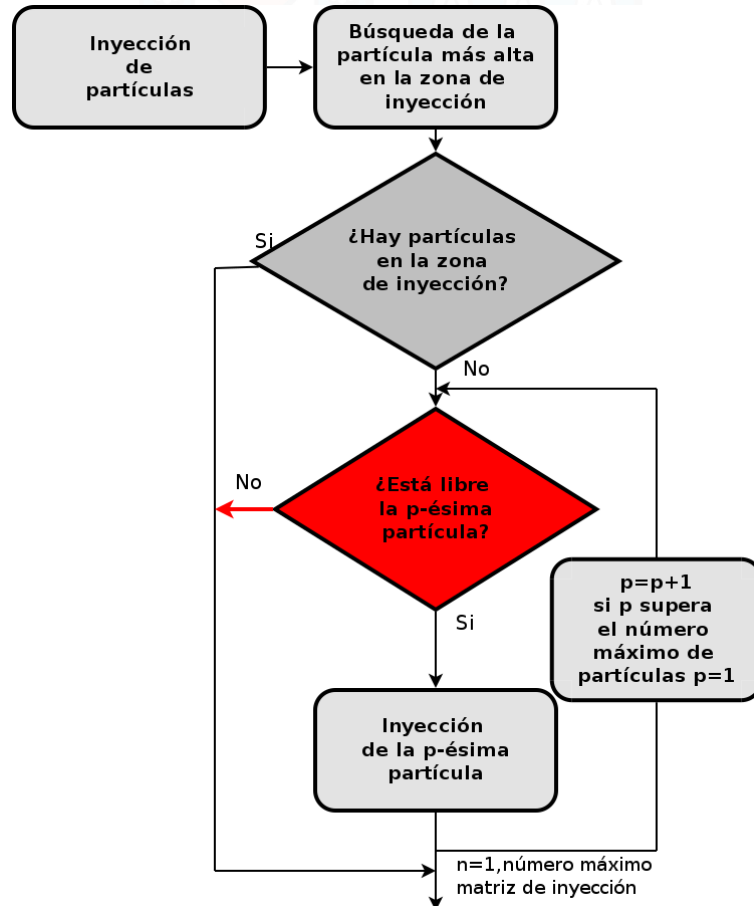


Figura 7.5: Diagrama de la subrutina 2-2 inserción de partículas antes de la modificación. Se puede ver más grande en la figura C.5

Esto se modificó tanto en la primera como segunda etapa:

1. Evaluación y detección de INSTANTE DE TIEMPO para la inyección de partículas.
2. Búsqueda de partículas libres, NO NECESARIAMENTE CONSECUTIVAS, en la simulación.
3. Inserción de partículas en el espacio de trabajo, con las condiciones iniciales.

Primero se modificó la evaluación de cuando se debe inyectar porque si alguna partícula llega a subir al área de inyección, el flujo de inyección se interrumpe y segundo se mejoró

el algoritmo de búsqueda de partículas libres utilizando una búsqueda de partículas libres no consecutivas pero necesariamente en orden creciente.

7.2.2.1. Evaluación del instante de tiempo para la inyección de partículas.

Para determinar la inyección de partículas se propone utilizar la velocidad inicial de la matriz de partículas en la dirección $-z$, calculando la cantidad de pasos necesarios para que ocurra el desplazamiento de al menos dos veces el radio más un delta, $2r + \delta$.

Esto se muestra en la figura 7.6.

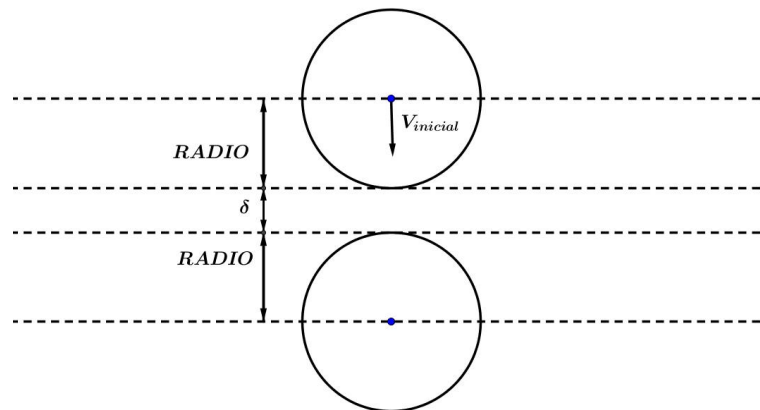


Figura 7.6: Modelo de inyección de partículas

Este δ se controla con el parámetro **fmod**, que es un factor del radio máximo de las partículas en la simulación donde se cumple la siguiente relación:

$$fmod * radio_{maximo} = 2 * radio_{maximo} + \delta \quad (7.1)$$

De esta forma se puede despejar δ en función de $fmod$ y de el $radio_{maximo}$ de las partículas en la simulación.

7.2.2.2. Búsqueda de partículas libres en la simulación.

Siendo $xcol$ e $ycol$ la cantidad de partículas en x e y respectivamente al momento de la inyección, la búsqueda de partículas implica llenar una “lista de inyección” la cual consta en buscar $xcol * ycol$ partículas libres en la simulación (fuera del volumen de control) y en caso de no existir $xcol * ycol$ partículas libres simplemente no se inyectan partículas en este paso de tiempo.

Para desarrollar el algoritmo de búsqueda se utilizan dos criterios.

1. Las partículas encontradas no son necesariamente consecutivas.
2. La lista de inyección se llena en orden creciente.

Lo cual da origen al siguiente algoritmo:

```

j = 1
vectorinyeccion() = 0
marcadoravance = 0
MIENTRAS { j < xcol * ycol
  SI j-esima partícula esta fuera del volumen de control {
    vectorinyeccion(j) = partícula !LLENA LA LISTA DE INYECCION
    j = j + 1
  }
  partícula = partícula + nmac

  SI partícula > ncuerpo {
    partícula = 1
    marcadoravance = 1
  }
  SI marcadoravance = 1 {
    inyeccion = .false.
    exit
  }
}

```

7.2.2.3. Inserción de partículas en el espacio de trabajo con las condiciones iniciales.

Luego de haber buscado partículas libres y haber llenado la matriz de inyección, se utiliza esta información para asignar las siguientes condiciones iniciales a las partículas inyectadas.

1. Posición
2. Velocidad inicial cartesiana
3. Velocidad angular inicial
4. Contacto (para macropartículas)

Después de las modificaciones señaladas se puede observar el nuevo diagrama de flujos en la figura 7.7 donde se aprecian los cambios demarcados con la flecha y recuadros verdes.

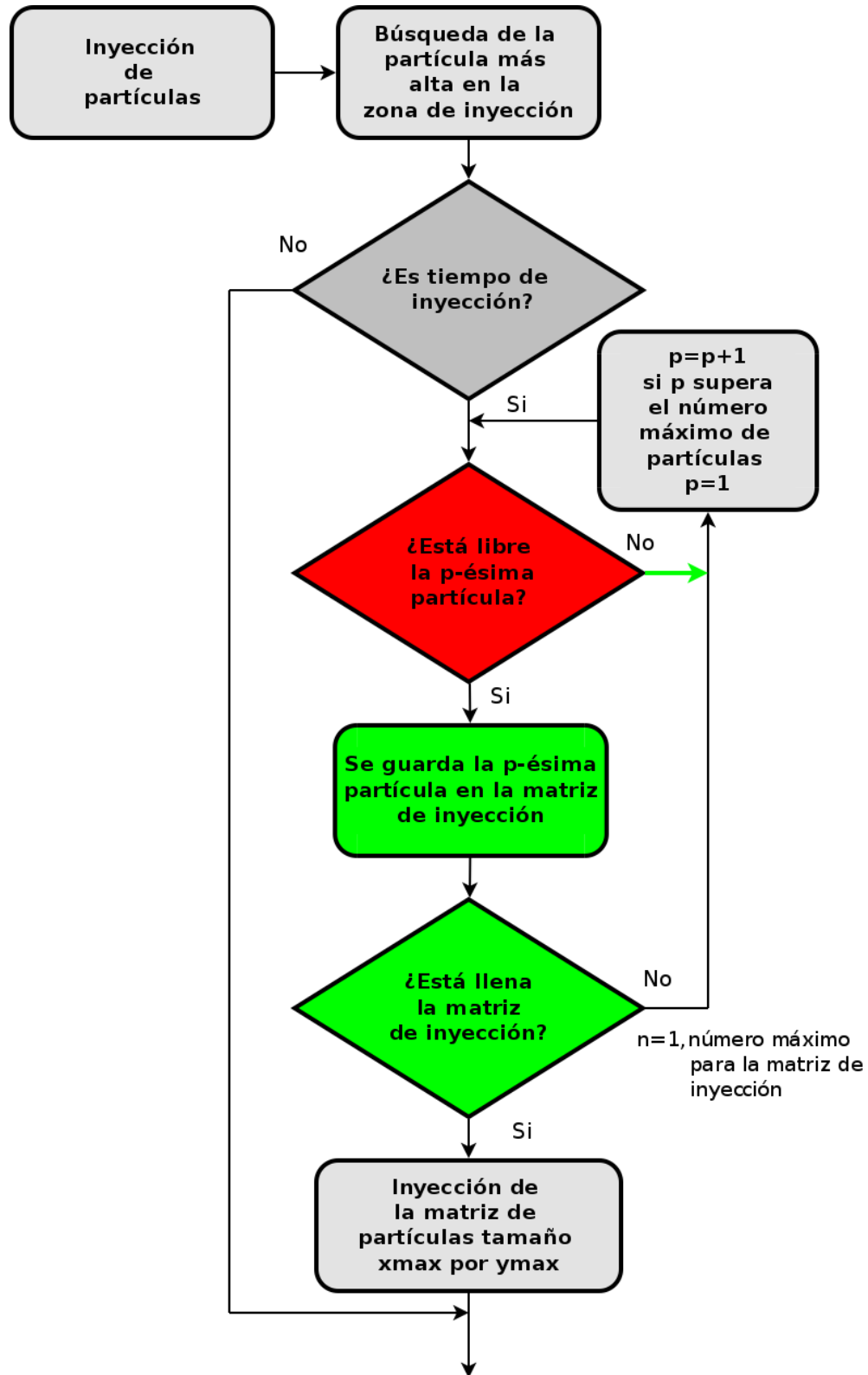


Figura 7.7: Diagrama de la subrutina 2-2 **inserción de partículas** después de la modificación en este trabajo.

7.3. Optimización.

Optimización consta en disminuir el tiempo general de ejecución del software con el objetivo de mejorar el costo computacional, en este caso es imprescindible la mejora de estos tiempos ya que en los casos más complejos el tiempo de cálculo está en el orden de magnitud de días hasta semanas para tener una simulación de tan solo 4 [s]; por ejemplo al utilizar la granulometría fina de cobre representada por macropartículas compuestas donde los pasos de tiempo para la simulación son pequeños y los cálculos son complejos a través de la macropartícula tarda aproximadamente 14 días.

En general al optimizar se considera utilizar nuevos algoritmos, metodologías de cálculo, paralelización y/o uso de memoria pero en este caso dió prioridad por analizar esta última, uso de memoria del software, ya que en un principio utilizaba memoria estática y ahora utiliza memoria asignada, lo que implica directamente un cambio en el comportamiento ya que al momento de simular un número menor a las 50000 partículas definidas en un principio, tanto la memoria en uso y el tiempo de cálculo se reducen.

7.3.1. Análisis de la subrutina 2-3 Detección de zonas de contactos.

Se aprecia en la figura 7.2 que el 83,30 % del tiempo se emplea en la subrutina corresponde a **2-3 detección de zonas de contactos** es evidente que al mejorar el tiempo de ejecución en esta subrutina se obtendrá una mejora sustancial en el tiempo de ejecución del software.

La subrutina se puede seguir en el diagrama de la figura 7.8 consta de cuatro etapas generales y tres consultas lógicas.

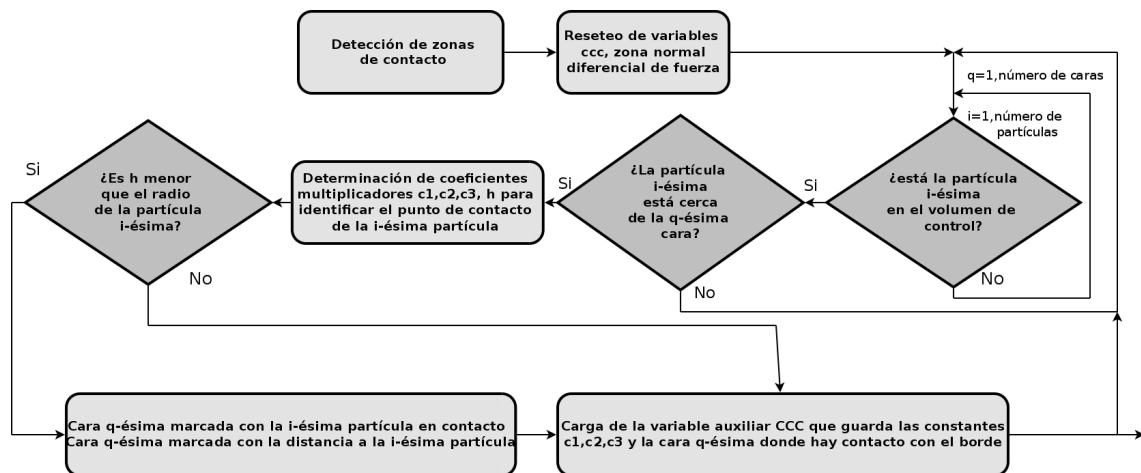


Figura 7.8: Diagrama de la subrutina 2-3 determinación de las zonas de contacto. Se puede ver de mejor forma el diagrama en la figura C.7

7.3.1.1. Reseteo de variables.

En esta etapa se resetean a cero las variables necesarias que controlan las listas de vecinos que son asociados a la malla (cara y borde) este proceso consume aproximadamente el 45 %¹ del trabajo computacional de la subrutina.

Las variables reseteadas son:

Variable	Tipo	Tamaño máximo	Descripción
dfc	entero	1	Marcador sobre cara (dfc=1) o borde (dfc=0)
zona	entero	$i_{max} = N_{max}^{\circ}$	Determina si la cara i -ésima está marcada con alguna partícula en contacto
zonaa	entero	$i_{max} = N_{max}^{\circ}$	Cantidad de elementos de malla marcados en la i -ésima partícula
zonaaa	entero	$i_{max} = N_{max}^{\circ}$	cantidad de elementos de borde marcados en la i -ésima partícula
vn	real	$i_{max} = N_{max}^{\circ}$ $j_{max} = 24$	Asocia la i -ésima partícula con el j -ésimo elemento de malla
ccc	real	$i_{max} = N_{max}^{\circ}$ $q_{max} = 350$ $k_{max} = 4$	$k \leq 3$ guarda las constantes x_k pertenecientes a la i -ésima partícula asociada con el q -ésimo elemento de borde

Tabla 7.3: Variables que se resetean a cero al inicio de la subrutina **2-3 determinación de las zonas de contacto.**

Luego de un análisis del código se observó que el reseteo de la variable **ccc** es el más costoso computacionalmente debido a que es un arreglo de reales de doble precisión con dimensiones $i_{max} = N_{max}^{\circ}$, $q_{max} = 350$ y $k_{max} = 4$, por lo que solo el uso de este arreglo de forma estática consume cerca de 70[MB] de memoria por lo tanto si consideramos que se llena con valor cero (0) esta cantidad de memoria en cada ciclo, es un proceso de alto recurso computacional.

Esta variable contiene dos tipos de información como se ve en la tabla 7.3 donde utiliza la información de la columna $k_{max} = 4$ para guardar las constantes $c1$, $c2$ y $c3$ asociandolas al elemento q -ésimo guardado en la cuarta posición, para luego utilizar estas constantes en el cálculo de la interferencia entre las partículas y el borde de la q -ésima cara, en el caso de no haber contacto entre las partículas y el borde el modelo encuentra un cero (0) en el valor de la cuarta columna y así evitar el cálculo de fuerzas entre bordes y partículas cuando no hay contacto.

¹Estimado con respecto a la mejora total del tiempo del código debido a que el efecto de implementar marcadores de tiempo en la subrutina aumenta el costo computacional alterando la medición.

Dicho lo anterior se puede determinar que en la variable **ccc** no es necesario volver a cero (0) todo el arreglo para poder cumplir la misma función dentro del código, basta con resetear solo la cuarta columna $k = 4$ que contiene el marcador del q -ésimo elemento de borde impactado por la i -ésima partícula.

En consecuencia se separó las funciones de la variable en dos arreglos: el primero conserva el nombre **ccc(i,j,k)** de *doble precisión* de tamaño ($i_{max} = N_{max}^{\circ}$, $j_{max} = 350$, $k_{max} = 3$) y la segunda variable se cambia el nombre a **ccc4(i,j,k)** que es de tipo entero de (8-bytes) de tamaño ($i_{max} = N_{max}^{\circ}$, $j_{max} = 350$, $k_{max} = 1$).

Este nuevo arreglo **ccc4** es el que se llena con ceros (0) al inicio de la subrutina y reemplaza la cuarta columna del antiguo arreglo **ccc** cumpliendo la misma función, teniendo el procesamiento más rápido debido ya que posee $\frac{1}{4}$ del tamaño original y además es del tipo entero siendo $\frac{1}{8}$ de la memoria total.

7.3.1.2. Resolución de sistema de ecuaciones $Ax = b$ de 4×4 .

En esta etapa se resuelve el sistema de ecuaciones $Ax = b$ de tamaño 4×4 mediante el método directo de descomposición LU y consume aproximadamente el 57%² del trabajo computacional de la subrutina.

Esta resolución de sistema sirve para encontrar los valores de los coeficientes $c1$, $c2$, $c3$ y $c4$ que permiten encontrar si la posición de la partícula se encuentra en contacto con el con el elemento de malla correspondiente, donde la posición de la partícula x_{part} se calcula como la combinación lineal de los tres vértices del elemento triangular más cercano $p1$, $p2$, $p3$ más un vector perpendicular a la superficie de magnitud h correspondiente a la altura de la partícula respecto al plano.

$$(c1 * p1 + c2 * p2 + c3 * p3) + \hat{n} * h = x_{part}$$

Imponiendo como condición:

$$\sum_{i=1}^3 c_i = 1$$

De esto se obtiene el sistema de ecuaciones de la forma $AX = b$

$$\begin{bmatrix} p_{1x} & p_{2x} & p_{3x} & N_x \\ p_{1y} & p_{2y} & p_{3y} & N_y \\ p_{1z} & p_{2z} & p_{3z} & N_z \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c1 \\ c2 \\ c3 \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

² Estimado omitiendo el proceso de cálculo del sistema, debido a que el efecto de implementar marcadores de tiempo en la subrutina aumenta el costo computacional alterando la medición.

En este procedimiento el código utiliza el algoritmo genérico de pivoteo parcial LU documentado en (Richard L. Burden, 2004), por lo que en este trabajo se investigó acerca de otros métodos y librerías estándar como *LAPACK* o *iMKL* pero según su documentación ((community wide effort, 1999) e (Intel Software, 2016) respectivamente) se encuentran optimizadas para sistemas matriciales sobre 10×10 ya que se basan en métodos indirectos de resolución de sistemas, por lo que no se intentó la implementación de ellas.

7.3.1.3. Marcaje de partículas con los contactos.

Esta etapa se encarga de cargar las variables *zonaa*, *zonaaa* y *vn* con la información obtenida en el cálculo del sistema de ecuaciones mencionado anteriormente, esta etapa ocupa menos del 1 % por lo que no se investigó forma de optimizarla.

7.3.1.4. Carga de variable *ccc*.

En esta etapa se cargan los coeficientes x_k pertenecientes a la *i-ésima* partícula asociada con el *j-ésimo* elemento de borde en contacto, luego en la posición $k = 4$ guarda el *q-ésimo* elemento de malla al cual está en contacto la *i-ésimo* partícula, el costo computacional de esta etapa también se estima menor al 1 % por lo que no se investigó forma de optimizarla.

8 | Resultados de la optimización y mejoras.

Al obtener resultados de la medición después de haber realizado los cambios anteriormente mencionados se llena la tabla 8.1.

Subrutina	Tiempo [s]	Porcentaje
1-1 Seteo de variables	0.20	0.09
1-2 Lectura de malla	5.20	2.35
1-3 Ciclos	216.34	97.56
Total	221.74	100

Tabla 8.1: Perfil de tiempo de las subrutinas de nivel 1 después de la optimización.

El gráfico se puede ver en la figura 8.1.

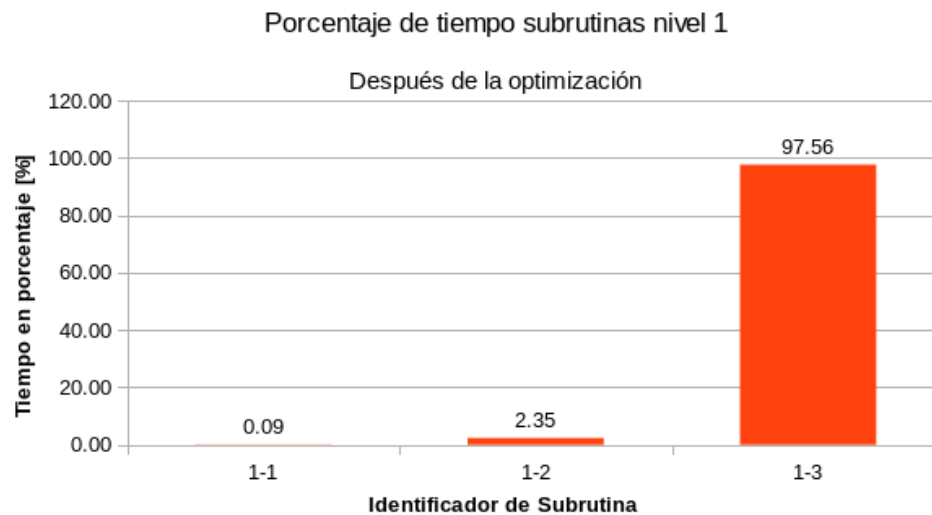


Figura 8.1: Perfil del código en las subrutinas de nivel 1 después de la optimización.

Se aprecia que la subrutina **1-3 ciclos** sigue siendo la etapa más costosa computacional-

mente, aunque se nota una pequeña disminución tanto el tiempo como el porcentaje del tiempo total de esta y se puede ver en la figura 8.2.

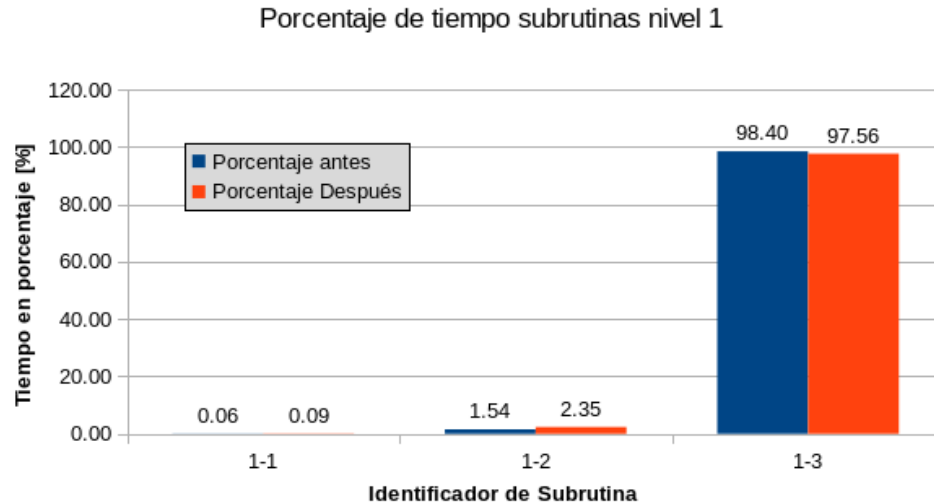


Figura 8.2: Comparativa de los perfiles del código en las subrutinas de nivel 1 antes y después de la optimización.

Se muestran los resultados para las subrutinas de nivel 2 en la tabla 8.2.

Subrutina	Tiempo [s]	Porcentaje
2-1 Desplazamientos	30.46	13.74
2-2 Inserción de partículas	1.31	0.59
2-3 Det. Zona de contactos	106.21	47.90
2-4 Búsqueda de vecinos	36.55	16.48
2-5 Cálculos sobre Partículas	22.37	10.09
2-6 Homologación de giros	6.08	2.74
2-7 Integración de la posición	1.14	0.52
2-8 Eliminación de partículas	0.84	0.38
2-9 Cálculo de desgaste acumulado	8.27	3.73
2-10 Cálculo de energía del sistema	0.93	0.42
2-11 Escritura de archivos	2.18	0.98
Total	216.34	97.56

Tabla 8.2: Perfil de tiempo de las subrutinas de nivel 2 después de la optimización.

En la figura 8.3 se aprecia que la subrutina **2-3 Detección de las zonas de contactos** sigue siendo la rutina más costosa computacionalmente y la subrutina **2-4 Búsqueda de vecinos** es la que le precede.

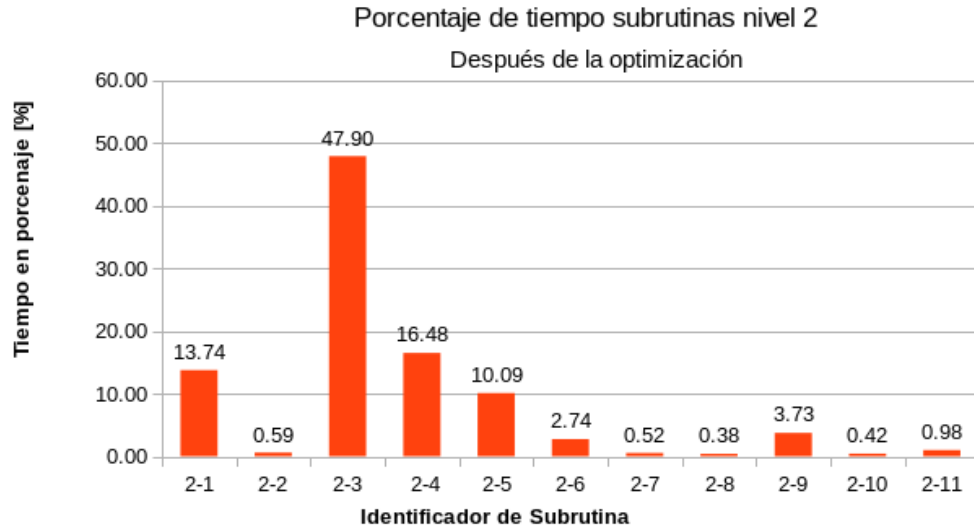


Figura 8.3: Perfil del código en las subrutinas de nivel 2 después de la optimización.

Se hace una comparativa en la figura 8.4 donde se puede observar que el tiempo de ejecución de la subrutina **2-3 Detección de las zonas de contactos** ha disminuido un 35,4 % con respecto a la medición antes de la optimización.

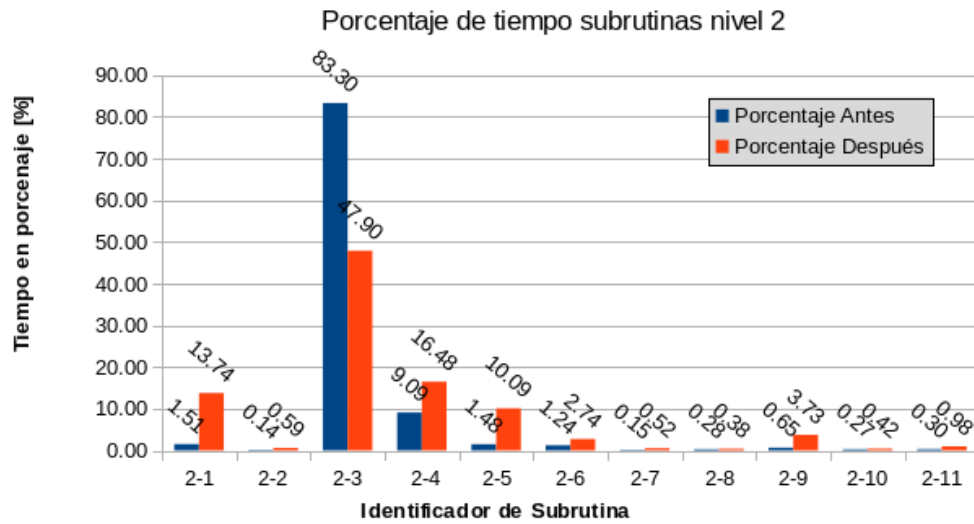


Figura 8.4: Comparativa de los perfiles del código en las subrutinas de nivel 2 antes y después de la optimización.

9 | Conclusiones.

A lo largo de este trabajo, se logró cumplir con los objetivos generales. Simulando con un software basado en el método de elementos discretos, la tasa de desgaste utilizando el modelo de Archard, demostrándose su linealidad en función del tiempo.

Además mediante la modificación del código fuente, se optimizó la utilización de recursos reduciendo el costo computacional.

Calibración de un software basado en el método de elementos discretos para modelar desgaste abrasivo a partir de mediciones experimentales.

La utilización de métodos numéricos para predecir el movimiento de materiales sólidos a granel, es una técnica muy utilizada para reducir costos. Una de las herramientas utilizadas es el método de elementos discretos, el cual necesita una serie de parámetros de entrada para caracterizar este comportamiento mediante una serie de ensayos que permiten.

- **Graduar las propiedades de los materiales granulares en el software.**

Se logran calibrar las propiedades que controlan el movimiento entre partículas y el enmallado, de acuerdo al modelo constitutivo que utiliza el software basado en MED. Esto se logra en base a ensayos independientes mencionados en ([Frederik Knop, 2015](#)). Donde la diferencia fundamental con respecto a esta memoria se basa en simular la tasa de desgaste y no la variación de esta misma.

- **Estudio del modelo de desgaste de Archard.**

Como se esperaba al utilizar el modelo de desgaste de Archard (Ecuación 3.11), se obtiene que la tasa de desgaste de la probeta de acero SAE A37 es de carácter lineal, siendo la tasa de dureza específica D la pendiente de la recta. Además para encontrar el valor de esta constante D es necesario conocer la tasa de desgaste del material obtenido por el ensayo de la rueda de desgaste.

- **Comparativa de los resultados de volumen, patrón, y tasa de desgaste numéricos versus volumen, patrón y tasa de desgaste experimentales.**

En cuanto al volumen removido, se determina de forma numérica y se utiliza para calcular la masa total removida en cada paso de tiempo pero no es posible determinarlo de forma gráfica porque las variaciones de este son pequeñas en comparación a la resolución computacional disponible.

El patrón o huella se calibra en base a la rodadura o raspadura de un sólido a granel sobre la probeta desgastada, siendo este el mecanismo de desgaste simulado en base al coeficiente de roce entre placa y partículas.

Para la tasa de desgaste, según el análisis hecho en 6.3 sobre el error obtenido entre el experimento y la simulación, los resultados son favorables dejando claro que el software es una herramienta útil en cuanto a la etapa de diseño al momento de necesitar dimensionar el tiempo de vida de una placa de acero SAE-A37 sometida a desgaste acelerado, como es el caso del ensayo de la rueda de desgaste.

Reducción del tiempo de cómputo del software.

El software utilizado en este trabajo, desarrollado en el DIMEC, invierte demasiado tiempo en la ejecución de los cálculos, siendo costoso computacionalmente por esta razón es imprescindible optimizarlo. Debido a la programación en archivo de texto escrito en lenguaje fortran, prácticamente se desconocía la forma en como el software consumía recursos y el tiempo requerido en cada rutina interna.

- **Medir y realizar un perfil de tiempo de cómputo requerido por el software y sus subrutinas:**

La estrategia fue subdividir el código en rutinas que comparten la memoria, esto permite incluir marcadores de tiempo donde se midieron las subrutinas. Es por esto que se logra determinar el perfil de tiempos utilizado por el software, este se puede ver en el capítulo 7.1.1, donde **2-3 Detección de zona de contactos** consume el 83,30[%] de tiempo de ejecución del código dejando como despreciables los tiempos de ejecución del resto de las subrutinas.

- **Optimizar algoritmos específicos del código desarrollado:**

La metodología de optimización de algoritmos se enfocó en mejorar el uso de memoria de la rutina antes mencionada, logrando disminuir el tiempo de cómputo al 47,90 % del tiempo de ejecución del software.

10 | Futuras líneas de investigación

1. En primera instancia se propone hacer una bibliografía de la constante de dureza específica D del material, midiendo la tasa de desgaste de diferentes aceros el ensayo de la rueda de desgaste.
2. Durante el análisis del código, se hizo una investigación paralela acerca de metodologías para optimizar software en cuanto al uso de memoria y se llegó a que existe una herramienta informática completamente necesaria en este tipo de software basados en MED, esta herramienta corresponde al uso de listas enlazadas para la utilización de memoria dinámica. El fin de utilizar la memoria dinámica es utilizar la memoria exacta requerida por las partículas que caben dentro del volumen de control, sin necesidad de decidir la cantidad de partículas en la simulación. De esta forma se disminuye considerablemente el uso de memoria y el uso de CPU, debido a que solo se recorren partículas activas, más no las partículas inactivas en el "depósito de partículas" fuera del volumen de control.
3. La utilización de listas enlazadas para la generación de listas de vecinos en adición con el algoritmos de *munjiza NBS* de búsqueda de elementos en la simulación permitirán reducir el orden exponencial de tiempo cálculo, por orden lineal reduciendo el costo computacional al momento de necesitar grandes cantidades de partículas.
4. En un principio fué un objetivo de esta memoria paralelizar el código, pero debido al tipo de programación utilizado este software contiene *problemas de condición de carrera* en el cual la estrategia para paralelizar comienza por buscar algoritmos de costo computacional lineal para obtener resultados relevantes en cuanto a la mejora del tiempo de cómputo. Esto requiere la utilización de las dos herramientas básicas mencionadas anteriormente lo que conlleva una reformulación del código debido a que la estrategia del uso de memoria es distinta.
5. El método de elementos discretos es una herramienta potente y versátil, permitiendo modelar sólidos rígidos, sólidos a granel y las combinaciones posibles de estos, en base a un modelo constitutivo. Pero en un proceso industrial es común encontrar

combinaciones de sólidos a granel con fluidos, por lo tanto es interesante proponer una combinación entre ambos métodos, con una utilidad práctica que es modelar tanto transporte de sólidos a granel por medios neumáticos como hidráulicos.

6. Utilizar un paso de tiempo variable en función de la velocidad de las partículas dentro de la simulación. En un principio este proceso parece costoso, pero durante la ejecución del software al momento de buscar las listas de vecinos se deben hacer comprobaciones acerca de la velocidad y posición de las partículas, si se sabe utilizar bien esta etapa es posible determinar el paso de tiempo mínimo necesario para la etapa siguiente incluyendo un factor de seguridad, esto, al igual que en el método de volúmenes finitos, provoca que si el flujo se tiende a estabilizar el paso de tiempo tiende a aumentar disminuyendo la cantidad de iteraciones necesarias para llegar al tiempo total de simulación.

Bibliografía

- A. Calvo (2011). Determinación experimental del desgaste abrasivo en tolvas de flujo másico mediante una máquina de desgaste de placas. [3.2.3.1](#)
- A. Ramalho (n.d.). Revisiting the archard's wear equation. methods of data analysis for wear sliding tests. *Universidade de Coimbra*. [3.2.4](#)
- B. Muth, P. Eberhard, S. Luding, (2011). Discrete element modelling of granular snow particle using liggghts. *University of Edinburgh*. [2](#)
- B. Muth, P. Eberhard, S. Luding, (n.d.). Collision detection and administration methods for many particles with different sizes. *n.d.* [2](#), [B](#)
- C. Spero, D.J. Hargreaves, R.K. Kirkcaldie, H.J. Flitt (1991). The steel wheel abrasion test (swat): A tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry. *Wear*. [3.2](#)
- CFDEM (2017). Liggghts open source discrete element method particle simulation code. [1](#)
- CFrederic, S. H., Donze, V. and Daudeville, L. (2004). Discrete element modeling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates. *Computers and Structures*. [3.1](#)
- CHunt, S. P., Meyers, A. G. and Louchnikov, V. (2006). Modelling the kaiser effect and deformation rate analysis in sandstone using the discrete element method. *Computers and Geotechnics*. [3.1](#)
- community wide effort (1999). Linear algebra package. [7.3.1.2](#)
- Cundall, P. A. (1971). *A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems*. Int.Symposium on Rock Fracture, I.S.R.M., 1 edición. [3.1](#), [3.1.4.1](#)
- Cundall PA. ,Strack ODL (1979). A discrete numerical model for granular assemblies,. *Geotechnique*. [3.1](#)
- D. Zhao (2006). Three dimensional discrete element simulation for granular materials. *Eng. Comput.* [3.1.4.3](#)
- EDEM (2017a). Edem is the market-leading discrete element method (dem) software for bulk material simulation. [2](#)

- EDEM (2017b). Edem is the market-leading discrete element method (dem) software for bulk material simulation. [2](#)
- ESYS (2017). Esysparticle is open source software for particle based numerical modelling. [3](#)
- Frederik Knop (2015). Modelación de desgaste abrasivo mediante método de elementos discretos. *Universidad Técnica Federico Santa María*. ([document](#)), [1](#), [3.4.1](#), [3.36](#), [3.37](#), [3.3](#), [4](#), [4.4.3](#), [9](#), [B](#)
- G. Hu, Z. Hu, B. Jian, L. Liu, H. Wan (2011). On the determination of the damping coefficient of nonlinear springdashpot system to model hertz contact for simulation by discrete element method. *J. Comput.* [3.1.3.2](#)
- H.P. Zhu, Z.Y. Zhou, R.Y. Yang, A.B. Yu (2007). Discrete particle simulation of particulate systems theoretical developments. *Chemical Engineering Science*. [3.1.1](#)
- Intel Software (2016). Intel math kernel library (intel mkl). [7.3.1.2](#)
- J. Denape (2014). Third body concept and wear particle behavior in dry friction sliding conditions. *OTAO Université Toulouse, Ecole Nationale d'Ingénierus de Tarbes*. [3.2.1](#), [3.2.2](#)
- J. F. Archard (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of applied physics*. [3.2.4](#)
- M. Erazo (2013). Implementación de una máquina para la determinación experimental del desgaste abrasivo de placas de desgaste en chutes. ([document](#)), [3.2.3.1](#), [3.13](#), [3.2.3.1](#), [3.3](#), [4.7](#), [5.1.1](#), [3](#), [3](#), [2](#)
- M. Marigo, E.H. Stitt (2015). Discrete element method dem for industrial applications comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets. *KONA Powder and Particle Journal*. [3.1](#)
- NEWTON DEM (2017). Newton dem is a discrete element method simulation package wih 3-d flow granular materials. [5](#)
- Norma ASTM g65 04 (2006). Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. [1](#), [3.2.3.1](#), [3.4.1](#)
- P. Radziszewski (2009). Review of test method for abrasive wear in ore grinding. *Wear*. [3.2](#)
- Richard L. Burden, J. Douglas Faires (2004). *Análisis numérico*. Thomson Learning, 7 edición. [7.3.1.2](#)
- ROCKY-DEM (2017a). Rocky dem next generation dem particle simulator. [4](#)
- ROCKY-DEM (2017b). Rocky dem next generation dem particle simulator. [4](#)
- R.W. J. Peters, M. Hopkins, R. Kala (2009). Article information. *int. j. comput. Eng. Softw.* [3.1.4.4](#)

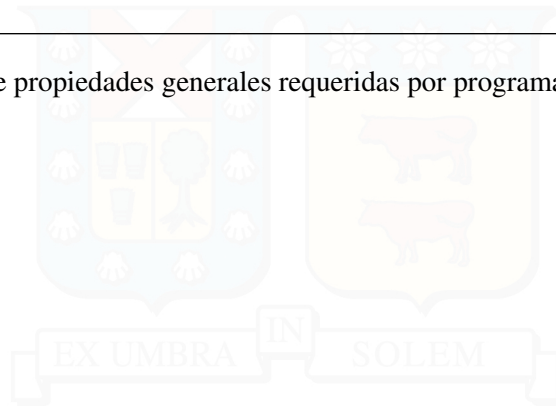
- S. Luding (2008). Introduction to discrete element methods basics of contact force models and how to perform the micro-macro transition to continuum theory. *Geomaterials*. 3.1.4.1
- S.R. Mead, P.W. Cleary, G.K. Robinson (2012). Characterising the failure and repose angles of irregularly shaped three-dimensional particles using dem. *Ninth Int. Conf. CFD Miner. Process Ind. CSIRO*. 4
- Tan Yuanqiang, Yang Dongmin, Sheng Yong (2008). Study of polycrystalline al₂o₃ machining cracks using discrete element method [j]. *International Journal of Machine tool and Manufacture*. 3.1
- X. Shen, L. Cao, R. Li (2010). Numerical simulation of sliding wear based on archard model. *Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng.* 3.2.4
- YADE DEM (2017). Yade is an extensible open-source framework for discrete numerical models. 6

A | Lista de variables que caracterizan un sólido a granel.

Parámetro	Símbolo	Unidad
Densidad de partícula	ρ_p	$\frac{kg}{m^3}$
Densidad de pared	ρ_w	$\frac{kg}{m^3}$
Módulo elástico de partícula	E_p	Pa
Módulo de corte partícula	G_p	Pa
Coefficiente de Poisson partícula	$Poisson_p$	
Módulo elástico pared	E_w	Pa
Módulo de corte pared	G_w	Pa
Coefficiente de Poisson pared	$Poisson_w$	
Rigidez normal partícula -partícula	$K_{n,pp}$	$\frac{N}{m}$
Rigidez tangencial partícula -partícula	$K_{t,pp}$	$\frac{N}{m}$
Coefficiente de amortiguamiento normal partícula - partícula	$\eta_{n,pp}$	$\frac{N \cdot s}{m}$
Coefficiente de amortiguamiento tangencia partícula - partícula	$\eta_{t,pp}$	$\frac{N \cdot s}{m}$
Rigidez normal partícula – pared	$K_{n,pw}$	$\frac{N}{m}$
Rigidez tangencial partícula – pared	$K_{t,pw}$	$\frac{N}{m}$
Coefficiente de amortiguamiento normal partícula – pared	$\eta_{n,pw}$	$\frac{N \cdot s}{m}$
Coefficiente de amortiguamiento tangencial partícula – pared	$\eta_{t,pw}$	$\frac{N \cdot s}{m}$
Radio de partícula	R	m
Coefficiente de roce estático partícula-partícula	μ_{pp}	-
Coefficiente de roce estático partícula-pared	μ_{pw}	-
Coefficiente de roce de rodadura partícula-partícula	$\mu_{b,pp}$	
Coefficiente de roce de rodadura partícula-pared	$\mu_{b,pw}$	
Coefficiente de roce de restitución partícula-partícula	ϵ_{pp}	
Coefficiente de roce de restitución partícula-pared	ϵ_{pw}	
Número de partículas	N	
Ángulo de fricción interna	ϕ	

Porosidad	ϵ	-
Ángulo de fricción	σ	
Ángulo de reposo estático	α_e	
Ángulo de reposo dinámico	α_d	
Paso de tiempo	Δt	S

Tabla A.1: Tabla de propiedades generales requeridas por programas basados en MED.



B | Descripción y funcionamiento de las variables del código.

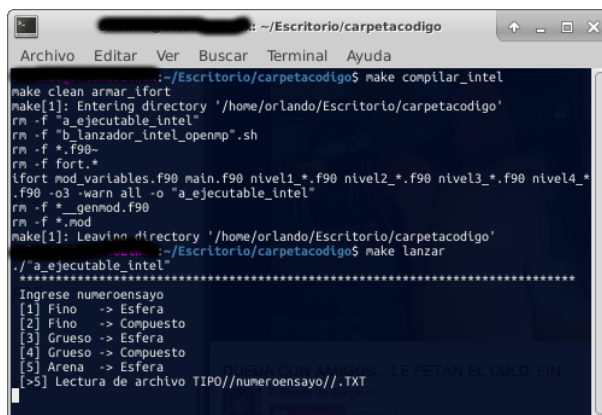
Compilación y ejecución.

Este programa escrito en *FORTRAN90/95* por *Frederik Knop*, para poder ser compilado requiere de *INTEL Fortran*, en base a esto el código cuenta con un archivo *makefile* con las siguientes opciones:

- 1) **armar_ifort:** Permite la compilación del código, generando el ejecutable de salida “a_ejecutable_intel”
- 2) **armar_debug:** Permite la compilación con las opciones de debug para *IDB* o *GDB* del código, generando el ejecutable de salida “a_ejecutable_intel”
- 3) **clean:** Permite la eliminación de archivos que genera el compilador
- 4) **lanzar:** Permite la iniciación del ejecutable

Dicho lo anterior, se abre un emulador de terminal en la carpeta se extraen los archivos proporcionados, luego se ejecutan las sentencias.

```
~/codigo$ make compilar
~/codigo$ make lanzar
```



```
~/Escritorio/carpetacodigo
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
~/Escritorio/carpetacodigo$ make compilar_intel
make clean armar_ifort
make[1]: Entering directory '/home/orlando/Escritorio/carpetacodigo'
rm -f "a_ejecutable_intel"
rm -f "b_lanzador_intel_openmp".sh
rm -f *.f90~
rm -f fort.*
ifort mod_variables.f90 main.f90 nivel1*.f90 nivel2*.f90 nivel3*.f90 nivel4*.f90 -o3 -warn all -o "a_ejecutable_intel"
rm -f *__genmod.f90
rm -f *.mod
make[1]: Leaving directory '/home/orlando/Escritorio/carpetacodigo'
~/Escritorio/carpetacodigo$ make lanzar
./a_ejecutable_intel
*****
Ingrese numeroensayo
[1] Fino -> Esfera
[2] Fino -> Compuesto
[3] Grueso -> Esfera
[4] Grueso -> Compuesto
[5] Arena -> Esfera
[5] Lectura de archivo TIPO//numeroensayo//.TXT
[>]
```

Luego el software, requiere el parámetro de *NUMEROENSAYO* entrada de carácter entero, el cual lee el archivo “*tipo“NUMEROENSAYO”.txt*”, en el cual se pre-carga la configuración del software.

Luego los resultados son escritos en dos rutas; La primera para los datos referentes a la ejecución del software “*./resultados/caso#/logs#*” donde se escriben tres archivos: logs.txt, datapunto.csv y data.csv; La segunda ruta corresponde a los archivos en formato vtk para ser visualizados por el software paraview, esta corresponde a “*./resultados/caso#/vtk#*”. Donde # es el número de tres cifras que corresponde al ensayo.

Configuración mínima requerida por el software.

El software de por si no tiene cargadas configuraciones acerca de las simulaciones que se quieren realizar, por lo tanto es necesario preparar de ante mano la configuración de la malla como la del sólido a granel. A pesar de esta desventaja posee la capacidad de leer hasta 999 preconfiguraciones sin necesidad de recompilar el código. Para ello, se debe acceder en la carpeta “configuración”, y crear el archivo “*tipo“###.txt*”. Donde ### corresponde al número (de tres cifras) de ensayo que se asigna a la simulación.

A continuación se muestran las posibles configuraciones de cada uno de los parámetros y luego el ejemplo para poder implementar la simulación del ensayo de la rueda de desgaste, en el orden que pide ser ingresado por el archivo de texto.

Parámetros de ensayo y granulometría pre-configurada sobre el sólido a granel.

Los primeros parámetros a configurar tienen relación con el tipo de ensayo que se quiere simular. Estos se pueden ver en la tabla B.1.

Variable	Descripción	Valor
Calibración	[1] Ensayo de la rueda de desgaste	
	[2] Calibración de la eficiencia de rebote de las partículas	1,2 o 3
	[3] Calibración del coeficiente de roce entre partículas	
Fi	Factor de interferencia entre partículas	0 - 1
Nmac	[3] Número de partículas que componen la macropartícula	1 - 8
Granulometría	Tipo de granulometría pre-configurada en el software	1-6

Tabla B.1: Variables asociadas al ensayo y granulometría del sólido a granel.

Las granulometrías pre-configuradas en el software corresponden a las que ([Frederik](#)

Knop, 2015) documenta para el desarrollo del código, estas corresponden a:

- 1 Mineral chancado de cobre, con diametro de esferas 100 % menor a 6[mm]. Representado por partículas esféricas.
- 2 Mineral chancado de cobre, con diametro de esferas 100 % menor a 6[mm]. Representado por macropartículas compuestas de tres partículas.
- 3 Mineral chancado de cobre, con diametro de esferas 100 % entre 12[mm]y 6[mm]. Representado por partículas esféricas.
- 4 Mineral chancado de cobre, con diametro de esferas 100 % entre 12[mm]y 6[mm]. Representado por macropartículas compuestas de tres partículas.
- 5 Arena gruesa con diametro de esferas constante 100 % 1,6[mm]. Representado por partículas esféricas.
- 6 Esta opción permite leer la variable *Radio*, la cual asigna el radio de elemento discreto utilizado en MED.

Parámetros de inserción de partículas.

Los parámetros de inyección de partículas regulan el flujo de entrada del sólido a granel en la simulación, siendo estos parámetros fundamentales en la estabilidad del código debido a que de ellos depende si existe interferencia en las partículas durante la inyección en la simulación. Estos parámetros se pueden observar en la tabla B.2.

Variable	Descripción	Valor
Xcol	Cantidad de columnas de partículas o macropartículas en la dirección x	>1
Ycol	Cantidad de columnas de partículas o macropartículas en la dirección y	>1
Ncuerpo	Cantidad máxima de partículas en la simulación	>=1
Fmod	Factor de radio que permite la separación de las matrices de inyección	>=2
Alturajet	Altura de inyección de las partículas	Real
Dx	Ubicación en la posición x de la primera partícula de la cuadrícula	Real
Dy	Ubicación en la posición y de la primera partícula de la cuadrícula	Real
Dz	Ubicación en la posición z de la primera partícula de la cuadrícula	Real
Vinicialx	Velocidad lineal en dirección x de todas partículas en la cuadrícula	Real

Sigue en la página siguiente

Variable	Descripción	Valor
Vinicialy	Velocidad lineal en dirección y de todas partículas en la cuadrícula	Real
Vinicialz	Velocidad lineal en dirección z de todas partículas en la cuadrícula	Real

Tabla B.2: Variables asociadas a la inserción de partículas en la simulación.

Parámetros sobre el volumen de control.

El volumen de control es una técnica utilizada para disminuir el recurso computacional debido a que todos los cálculos se hacen solamente sobre los elementos discretos que estén dentro del mismo, en la tabla B.3 se aprecian las variables que limitan el volumen de control.

Variable	Descripción	Valor
Xiz	Límite máximo hacia el lado izquierdo del eje x	<0.01
Xder	Límite máximo hacia el lado derecho del eje x	>0
Yiz	Límite máximo hacia el lado izquierdo del eje y	<0
Yder	Límite máximo hacia el lado derecho del eje y	>0
Alturacorte	Límite hacia abajo del eje z	<0

Tabla B.3: Variables asociadas a los límites del volumen de control en la simulación.

Parámetros de tiempo.

El modelo utilizado para poder hacer la integración temporal se explicó en la sección 3.1.2. El modelo trabaja en pasos de tiempo, siendo este parámetro el que define la estabilidad en la ejecución de la simulación. Mientras más pequeño tiende a ser más estable debido a las constantes interacciones y a las interferencias que se producen entre las partículas, esto produce que se deben hacer más iteraciones para poder tener un resultado convergente. Sobre eso se agrega el modelo de búsqueda de vecinos de Velvet (B. Muth, P. Eberhard, S. Luding, nd) se basa en agregar un radio extra sobre la partícula durante la búsqueda evitando evaluar los vecinos en todos los pasos de tiempo para poder optimizar el tiempo de cálculo entre las partículas.

Variable	Descripción	Valor
Deltabus	Radio extra para la búsqueda de vecinos en $[m]$	>0
Deltamalla	Factor de largo característico para la detección de la malla	0-1
Velbus	Velocidad de búsqueda de vecinos en $[m/s]$	>0

Sigue en la página siguiente

Variable	Descripción	Valor
H	Paso de tiempo en [s]	
Tmax	Tiempo total a simular en [s]	>0
Tdes	Tiempo en el que se inicia el cálculo del desgaste	Tdes<Tmax
Fotos	Cantidad de veces que el software escribe los resultados parciales	>=1

Tabla B.4: Variables asociadas a los parámetros de tiempo en la simulación.

Variables de configuración sobre la posición de la malla.

Al momento de iniciar la lectura de malla, el software revisa si existen los archivos con extensión “.stl” correspondientes a la malla que va a leer durante la ejecución del mismo, esto es en la carpeta “./configuracion”. En caso de no existir los archivos necesarios, el software termina. Donde cada malla tiene un comportamiento distinto, sin poder hacer combinaciones sobre el, pero se pueden hacer modificaciones dentro del código fuente, por ejemplo dejar alguna malla estática para hacer el modulo de calibración del coeficiente de eficiencia de rebote y el de ángulo de reposo.

Propiedades asignadas a “placader.stl”

Las variables que controlan el comportamiento de la malla correspondiente a “placader.stl” se pueden ver en la tabla B.5.

Variable	Descripción	Valor
D	Constante de dureza específica (capítulo 4)	>0
Momento	Corresponde al momento que tiene la placa de desgaste simulando el peso en el porta probeta	>0
Alpha	Ángulo inicial para el enmallado “placader.stl” [°]	Real
Dxplaca	Desplazamiento en x de “placader.stl”	Real
Dyplaca	Desplazamiento en y de “placader.stl”	Real
Dzplaca	Desplazamiento en z de “placader.stl”	Real
Puntogiro_x	Coordenada x del pivote para “placader.stl”	Real
Puntogiro_y	Coordenada y del pivote para “placader.stl”	Real
Puntogiro_z	Coordenada z del pivote para “placader.stl”	Real

Tabla B.5: Variables asociadas a los parámetros de la malla “placader.stl”.

Propiedades asignadas a “rueda.stl”

Las variables que controlan el comportamiento de la malla correspondiente a “rueda.stl” se pueden ver en la tabla B.6.

Variable	Descripción	Valor
Rps	Revoluciones por segundo que gira “rueda.stl”	>0
Dxrueda	Desplazamiento en x de “rueda.stl”	Real
Dyrueda	Desplazamiento en y de “rueda.stl”	Real
Dzchute	Desplazamiento en z de “rueda.stl”	Real

Tabla B.6: Variables asociadas a los parámetros de la malla “rueda.stl”.

Propiedades asignadas a “chute.stl”

Las variables que controlan la posición de la malla correspondiente a “chute.stl” se pueden ver en la tabla B.7.

Variable	Descripción	Valor
Dxchute	Desplazamiento en x de “chute.stl”	Real
Dychute	Desplazamiento en y de “chute.stl”	Real
Dzchute	Desplazamiento en z de “chute.stl”	Real

Tabla B.7: Variables asociadas a los parámetros de la malla “chute.stl”.

Variables independientes de la granulometría.

Estas variables corresponden a las propiedades que se utilizan en forma independiente de las granulometrías ya pre-configuradas. Debido a que el software cuenta con granulometrías pre-configuradas se implementó el uso de radio y densidad constante para la poder utilizar otras posibles combinaciones para las partículas sin necesidad de modificar el código fuente. Estas variables se ven en la tabla B.8.

Variable	Descripción	Valor
Densidad	Densidad de las partículas en el sólido a granel [kg/m^3]	>0
Radio	Radio constante en caso de no ocupar las granulometrías pre-configuradas en el código[m]	>0

Tabla B.8: Control de la densidad y radio de las partículas de forma independiente

Variables que permiten configurar el comportamiento de las partículas.

Finalizando la configuración del software, este requiere parámetros acerca de la interacción del movimiento de las partículas con respecto a otras partículas y con respecto a los elementos de malla. Estos se dividen en tres etapas.

Coefficientes de rebote.

Coefficientes que permiten controlar la eficiencia de rebote entre los elementos que están en interacción.

Variable	Descripción	Valor
ν Part	Coefficiente eficiencia de rebote Partícula - Partícula	0-1
ν Chuteinox	Coefficiente eficiencia de rebote Chute inoxidable - Partícula	0-1
ν Chuteacero	Coefficiente eficiencia de rebote Chute acero - Partícula	0-1
ν Placa	Coefficiente eficiencia de rebote Placa de desgaste - Partícula	0-1
ν Goma	Coefficiente eficiencia de rebote Rueda de goma - Partícula	0-1
ν Bordegoma	Coefficiente eficiencia de rebote Borde rueda - Partícula	0-1

Tabla B.9: Variables de control sobre los coeficientes de rebote entre partículas, entre las partículas y los elementos de malla.

Coefficientes de roce.

Coefficientes que permiten controlar los coeficientes de roce entre los elementos que están en interacción.

Variable	Descripción	Valor
μ Chuteinox	Coefficiente de roce Chute inoxidable - Partícula	0-1
μ Chuteacero	Coefficiente de roce Chute acero - Partícula	0-1
μ Placa	Coefficiente de roce Placa de desgaste - Partícula	0-1
μ Goma	Coefficiente de roce Rueda de goma - Partícula	0-1
μ E	Coefficiente de roce Rueda de Partículas - Partícula	0-1
$f\mu c$	Coefficiente de roce Rueda de Estático - Dinámico	0-1
Roda	Coefficiente de resistencia a la rodadura	0-1
μp	Coefficiente de roce Caras restantes	0-1

Tabla B.10: Variables de control sobre los coeficientes de roce entre partículas, entre las partículas y los elementos de malla.

Módulos elásticos.

Coefficientes que permiten controlar los módulos elásticos de los elementos en la simulación.

Variable	Descripción	Valor
ϵ Chuteinox	Módulo de elasticidad Chute acero inoxidable	Real
ϵ Chuteacero	Módulo de elasticidad Chute acero	Real
ϵ Placa	Módulo de elasticidad Placa de desgaste	Real
ϵ Goma	Módulo de elasticidad Rueda de goma	Real
ϵ Bordegoma	Módulo de elasticidad Borde de rueda	Real
ϵ Partícula	Módulo de elasticidad Partículas	Real
ϵ Restantes	Módulo de elasticidad Caras restantes	Real

Tabla B.11: Módulos elásticos de los elementos que existen en la simulación.

Variables extra.

Estos son parámetros que permiten configurar los ensayos del material granular, para poder obtener una correcta calibración. Se debe tener en cuenta que no caben en ninguna configuración antes mencionada pero si son necesarios. Ver en las tablas [B.12](#) y [B.13](#).

Ensayo de rebote y ángulo de roce entre partículas.

Variable	Descripción	Valor
Wgiro	Velocidad angular a la que puede girar el enmallado “ <i>placader.stl</i> ”	
Tgiro	Instante en que la placa comienza a girar.	

Tabla B.12: Variables extra que son específicas para el ensayo de rebote y ángulo de roce.

Ensayo de ángulo de reposo.

Variable	Descripción	Valor
Altmax	Altura mínima de la partícula más alta en el cilindro.	
Ttapa	Instante en que la tapa es retirada del volumen de control.	

Tabla B.13: Variables extra que son específicas para el ensayo de rebote y ángulo de roce.

Ejemplo.txt

```

!TITULO
!Valor Variable      Detalle
1  !calibracion [1] ensayo [2] calibrar coef. roce placa [3] calibrar
    coef- roce entre particulas
1  !Fi      Factor de interferencia en las particulas compuestas
1  !nmac    Se puede usar hasta 8 Numero de particulas de la
    macropartícula
1  !granulometria [1] Fino->Esfera [2] Fino->Compuesto [3] Grueso->
    Esfera [4] Grueso->Compuesto

!INSERCIÓN
21 !xcol    Cantidad de particulas en x de la cuadrícula de inyección
12 !ycol    Cantidad de particulas en y de la cuadrícula de inyección
3000 !ncuerpo Cantidad de particulas totales en la simulación
1.5 !factinsercion Factor de radio para la inserción de particulas
1  !fmod    Factor de radio para la inserción de particulas
0.15 !alturajet Altura de inyección de particulas
0.0355 !dx    Ubicación en la posición x de la primera partícula en la
    cuadrícula
-0.036 !dy    Ubicación en la posición y de la primera partícula en la
    cuadrícula
0.    !dz    Ubicación en la posición z de la cuadrícula
-0.35 !vinicialx Velocidad inicial en x
0.0  !vinicialy Velocidad inicial en y
-1.4 !vinicialz Velocidad inicial en z

!VOLUMEN DE CONTROL
0.01 !xiz    Limite x a la izquierda del volumen de control
0.2  !xder    Limite x a la derecha del volumen de control

-0.07 !yiz    Limite y a la izquierda del volumen de control
0.07 !yder    Limite y a la derecha del volumen de control

-0.11 !alturacorte Limite z abajo del volumen de control

```

```

!TiEMPO
0.0025 !deltabus Radio extra de busqueda de vecinos
25. !velbus[m/s] Velocidad de busqueda de vecinos
7.14e-7 !h Paso de tiempo en [s]
1.5 !tsimm Tiempo total de simulacion
1000 !fotos Cantidad de fotos en el intervalo de simulacion

!Propiedades asociadas a la malla
!Propiedades de la placa de desgaste
510E9 !dureza [N/m2] Dureza equivale a 1/k constante de desgaste
especifico 24300000000
5.7119 !fuerzapresion Torque que se imprime sobre la placa de desgaste
0.3 !Poisson [-] Modulo de Poisson
0.0 !dzplaca Desplazamiento de placa en direccion z
0.0 !dyplaca Desplazamiento de placa en direccion y
0.11 !dxplaca Desplazamiento de placa en direccion x
.1390896!puntogiro(1) Posicion x del punto de giro de placa
0.0 !puntogiro(2) Posicion y del punto de giro de placa
.0869142!puntogiro(3) Posicion z del punto de giro de placa

!Relacionadas a la dinamica de la rueda
7.5833 !rps Revoluciones por segundo !7.5833!11.833!17.333!
0.0 !dxrueda Desplazamiento de placa en direccion x
0.0 !dyrueda Desplazamiento de placa en direccion y
0.0 !dzrueda Desplazamiento de placa en direccion z

!Relacionadas a la posicion del chute
0.0595 !dxchute Desplazamiento de chute en direccion x
-0.040 !dychute Desplazamiento de chute en direccion y
0.083 !dzchute Desplazamiento de chute en direccion z

!FiN Propiedades de malla

!PROPIEDADES DEL SOLIDO A GRANEL
3039.12 !densidad Densidad de cada particula en kg/m3
6.3e-3 !radio radio constante en caso de usar granulometria tipo 6

!PROPIEDADES DE CALiBRACiON DEL ENSAYO
!Coeficientes de rebote -----
0.43 !vpart 1 Coeficiente de rebote particula-particula eficiencia
0.33 !vchuteinox 2 Coeficiente de rebote Chuteinox-particula
0.4 !vchuteacero 2 Coeficiente de rebote estatico Chuteacero-particula
0.4 !vplaca 3 Coeficiente de rebote Placa de desgaste-particula

```

```

0.05 !vgoma 4 Coeficiente de rebote particula-pared de goma
0.4 !vbr 4 Coeficiente de rebote Borde rueda-particula

! Coeficiente de roce -----
0.2121 !muchuteinox 1 Coeficiente de roce estatico Chuteinox-particula
0.451 !muchuteacero 1 Coeficiente de roce estatico Chuteacero-particula
1.6 !muplaca 2 Coeficiente de roce estatico Placa de desgaste-
    particula
1.835 !mugoma 3 Coeficiente de roce estatico particula-pared de goma

0.42 !mue 4 Coeficiente de roce estatico entre particulas

0.5 !fmuc 5 Coeficiente de roce estatico/dinamico

0.941 !roda 6 coeficiente de resistencia a la Rodadura 0-1
0.7 !mup 7 Coeficiente de roce estatico caras restantes

! Modulos elasticos [N/m2] !0.7E9[N/m2] Modulo elastico de la arena
2.1d11 !echuteinox !1 Coeficiente Chuteinox
2.1d11 !echuteacero !1 Coeficiente Chuteacero

2.1d11 !eplaca !2 Coeficiente placa
1.77d7 !egoma !3 Coeficiente pared de goma
2.1d11 !ebr !3 Coeficiente borde de rueda

1.77d8 !elastp !4 coeficiente particula
2.1d11 !elast !5 Caras restantes
!FiN PROPIEDADES DE CALIBRACION DEL ENSAYO

```

C | Diagramas de flujo del software.

En este capítulo se detallan, en forma de diagramas de flujo, las subrutinas que componen el código trabajado en esta memoria.

1-1 Seteo de variables.

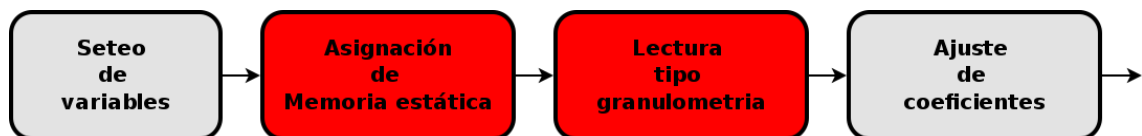


Figura C.1: Diagrama de la subrutina 1-1 seteo de variables antes de la modificación.

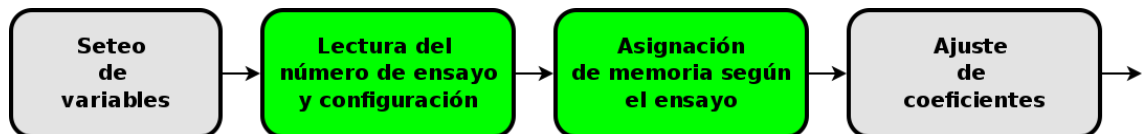


Figura C.2: Diagrama de la subrutina 1-1 seteo de variables después de la modificación propuesta en este trabajo.

1-2 Lectura de malla.



Figura C.3: Diagrama de la subrutina 1-2 lectura de malla preparada para leer formato *.stl*.

2-1 Desplazamientos de malla.

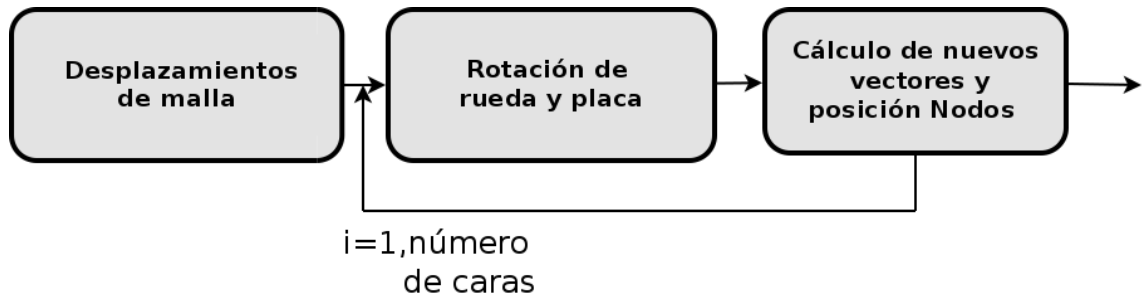


Figura C.4: Diagrama de la subrutina 2-1 desplazamientos de malla.

2-2 Inserción de partículas.

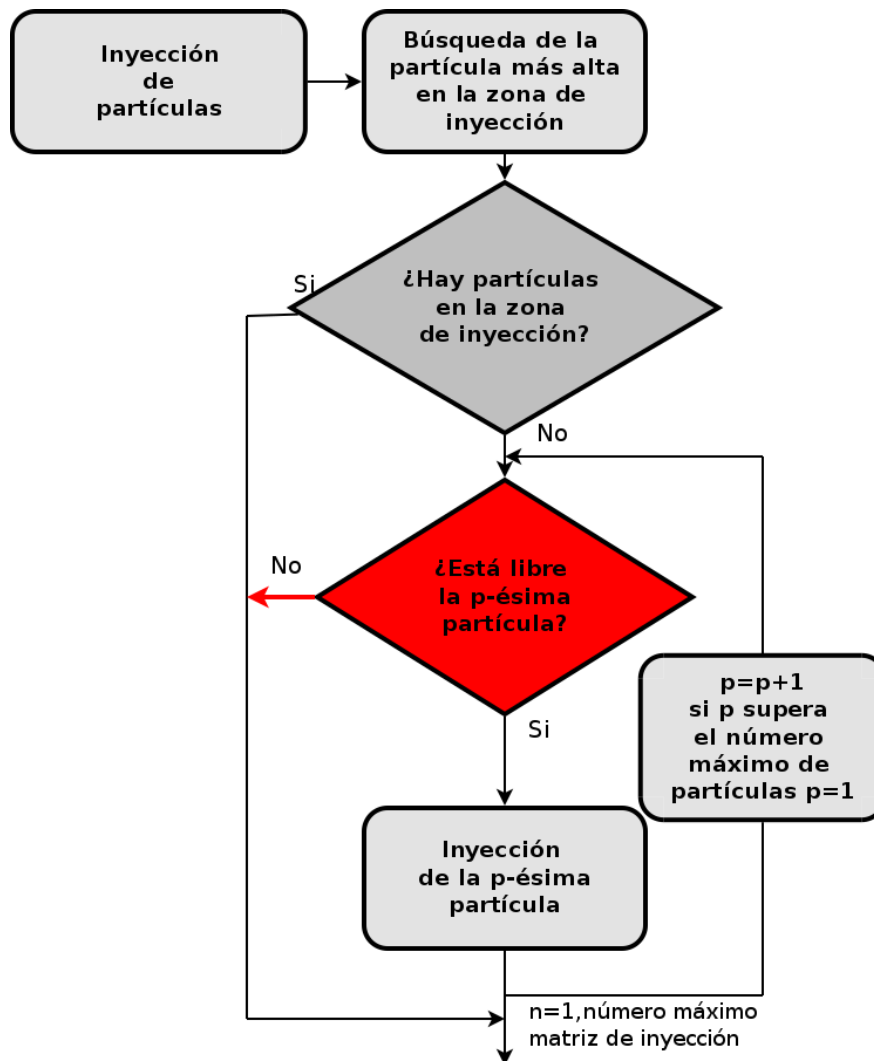


Figura C.5: Diagrama de la subrutina 2-2 inserción de partículas antes de la modificación.

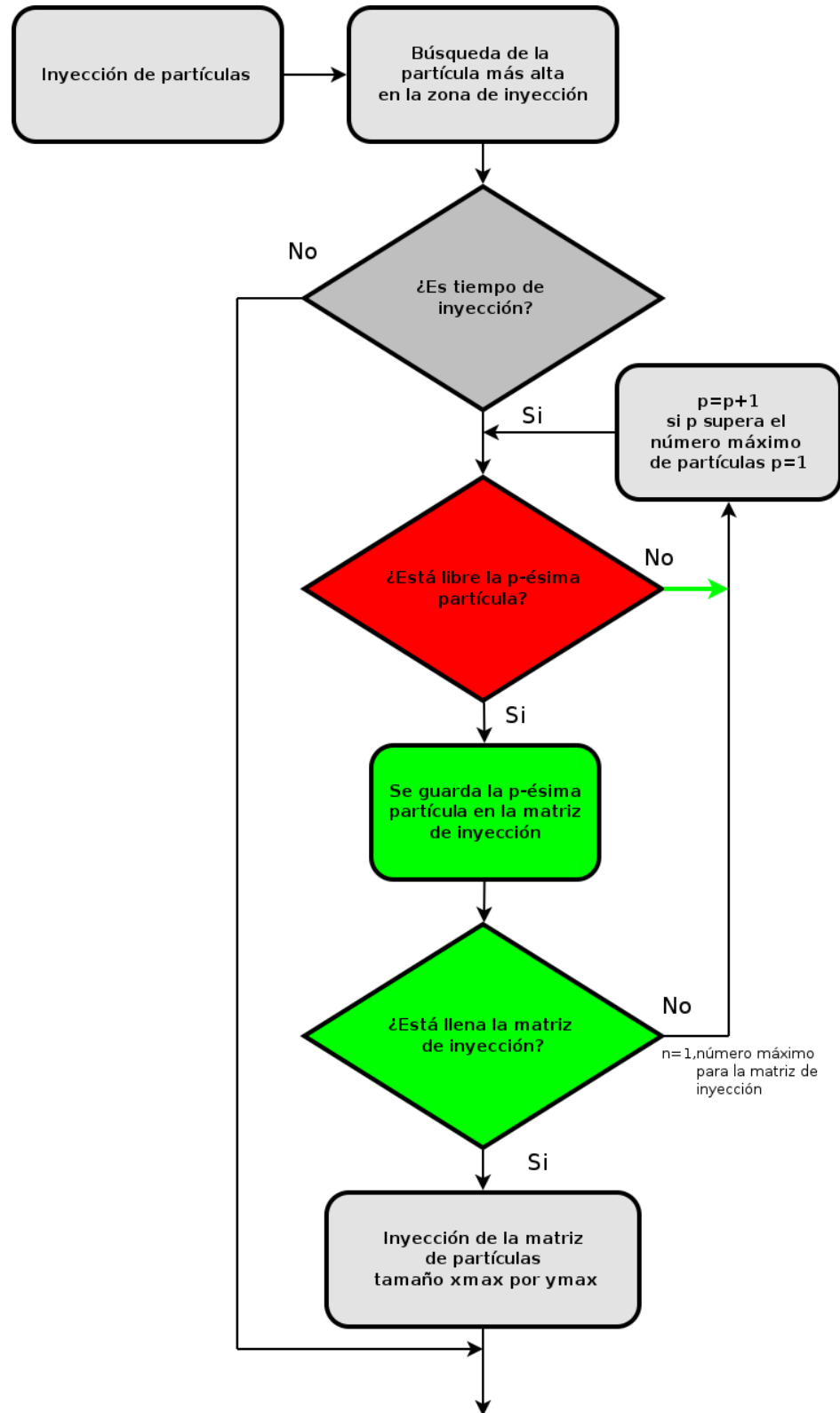


Figura C.6: Diagrama de la subrutina 2-2 **inserción de partículas** después de la modificación en este trabajo.

2-3 Determinación de la zona de contactos.

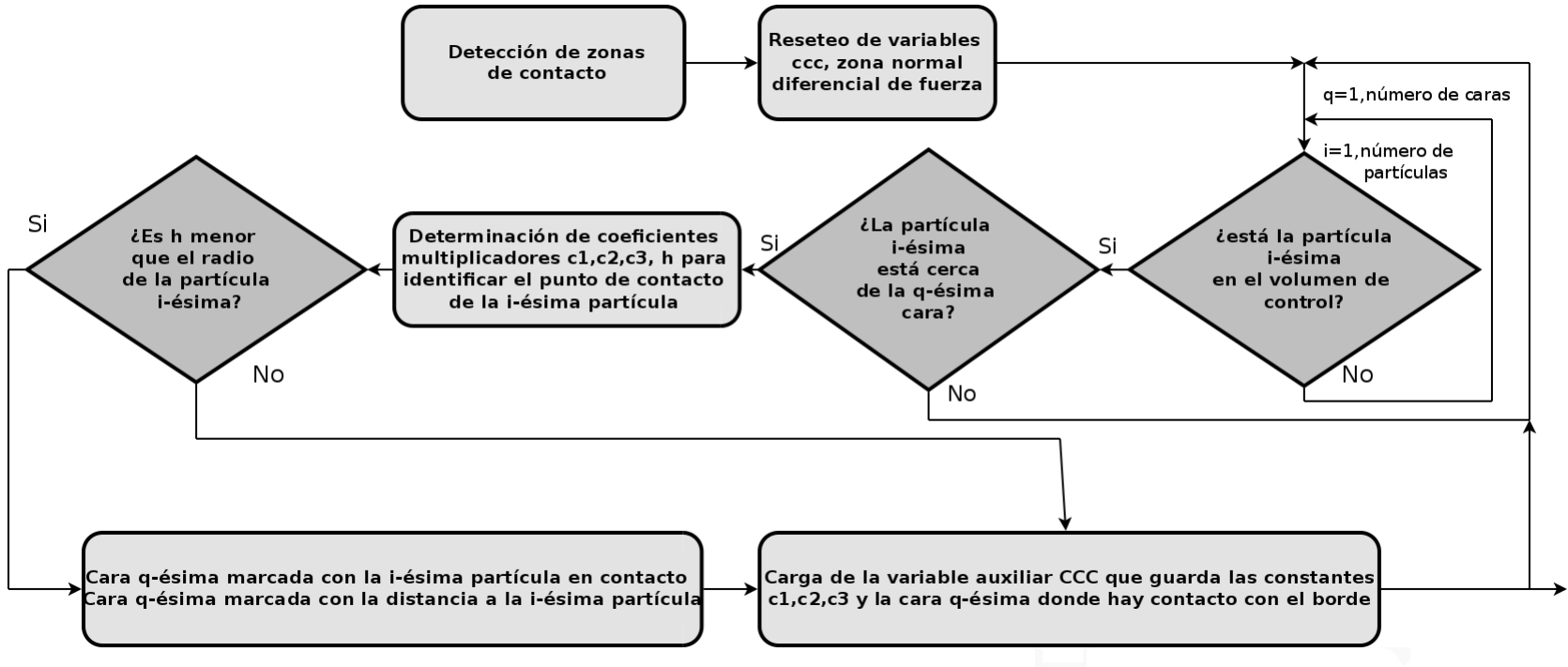


Figura C.7: Diagrama de la subrutina 2-3 determinación de las zonas de contacto.

2-4 Búsqueda de vecinos.

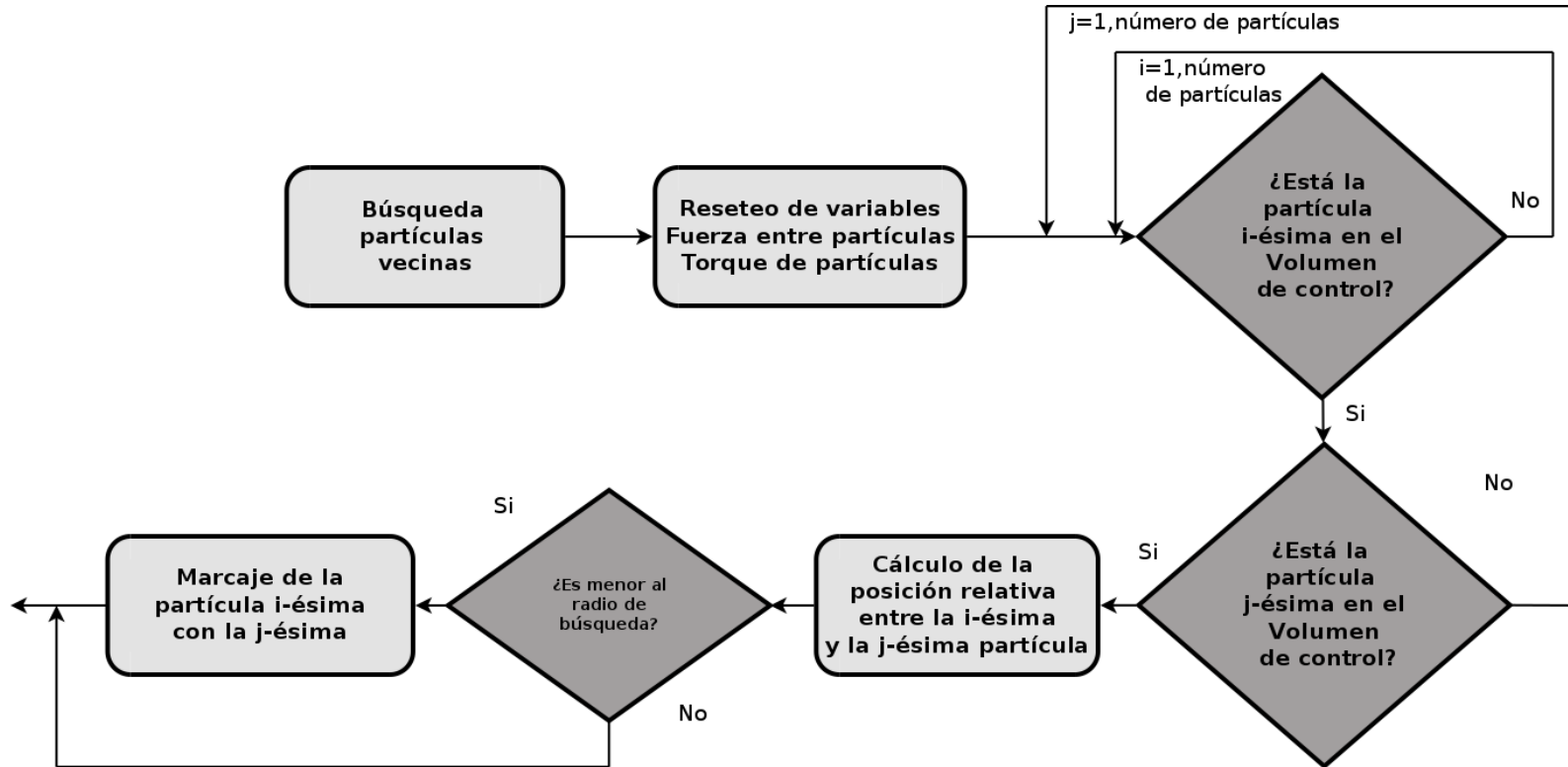


Figura C.8: Diagrama de la subrutina 2-4 búsqueda de vecinos.

2-5 Cálculos sobre partículas.

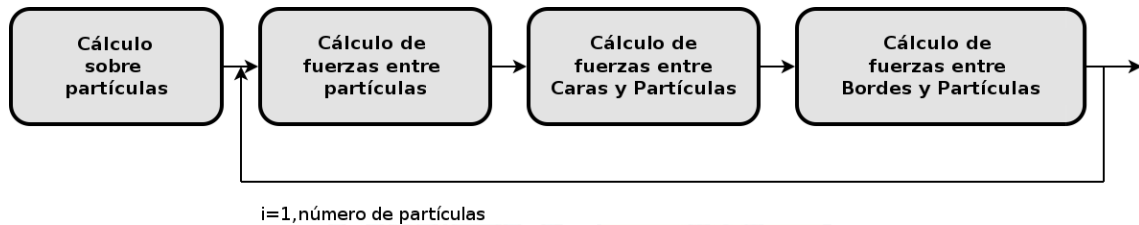


Figura C.9: Diagrama de la subrutina 2-5 Cálculos sobre partículas.

2-7 Integración de la posición

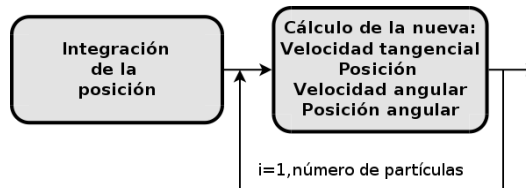


Figura C.10: Diagrama de la subrutina 2-7 integración de la posición .

2-8 Eliminación de partículas

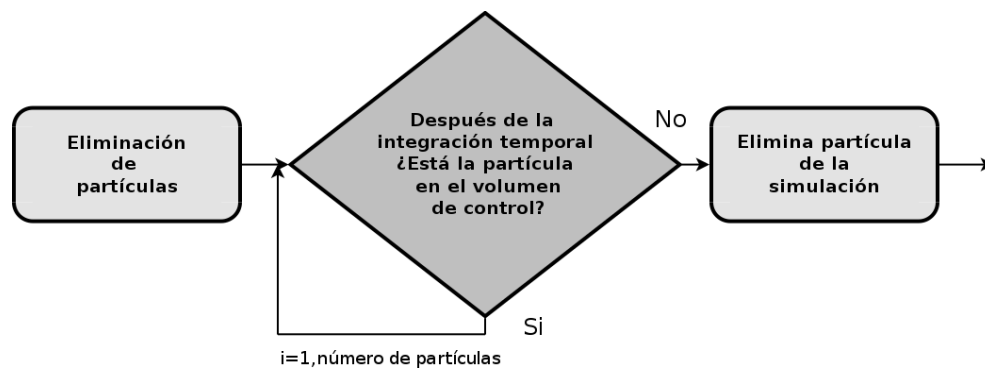


Figura C.11: Diagrama de la subrutina 2-8 eliminación de partículas .

2-9 Cálculo de desgaste.

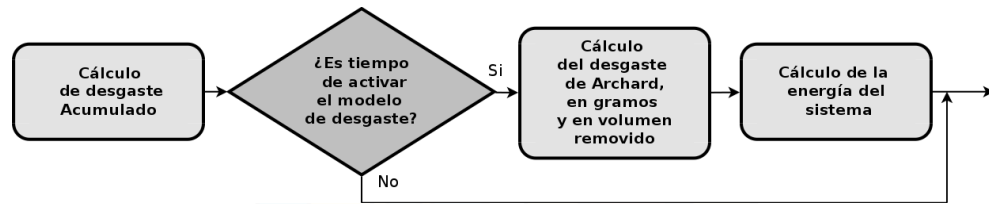


Figura C.12: Diagrama de la subrutina 2-9 Cálculo de desgaste acumulado .

D | Configuración de la geometría para calibrar coeficiente de roce en- tre partículas.

Cilindro hueco.

Este enmallado representa el cilindro de pvc que se utiliza en el ensayo de ángulo de reposo. La cantidad de vertices utilizada es 14748, en consecuencia se tienen 4916 elementos de malla dispuestos de forma que la zona donde se aprecian los elementos más finos es donde impactan las esferas que simulan el sólido a granel. La miniatura de la malla se puede apreciar en la figura D.1

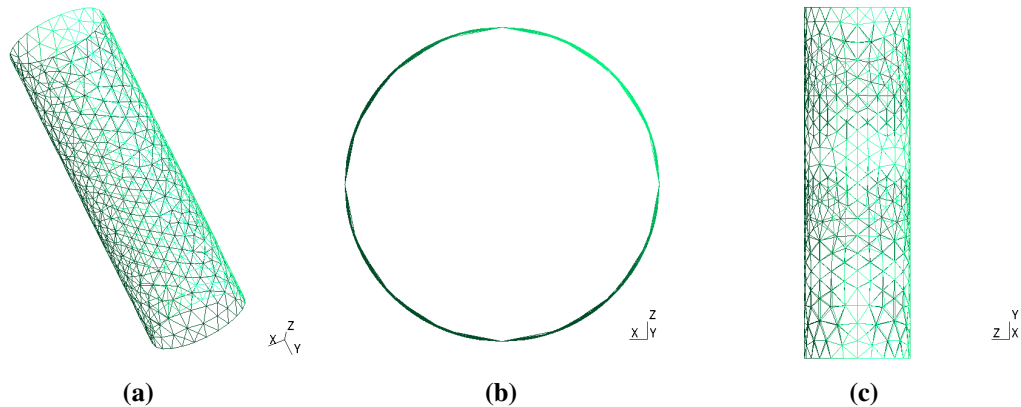


Figura D.1: Enmallado del cilindro utilizado en la calibración.

La configuración de la posición del enmallado que representa cilindro se presentan en la tabla D.1. De tal forma que queda arriba de la esquina donde se juntan las paredes de la base que recibe el material granular.

Variable	Valor
Dxchute	0.23
Dychute	-0.041
Dzchute	0.06275

Tabla D.1: Configuración de las variables asociadas a la posición del cilindro colocándolo arriba en la esquina donde se juntan las paredes de la base que recibe el material granular.

Superficie cuadrada.

Este enmallado es la tapa que evita la caída del material durante la primera etapa de llenado del cilindro en el ensayo de ángulo de reposo. La cantidad de vértices utilizada es 11606, en consecuencia se tienen 3868 elementos de malla dispuestos de forma que la zona donde se aprecian los elementos más finos es donde impactan las esferas que simulan el sólido a granel. La miniatura de la malla se puede apreciar en la figura D.2

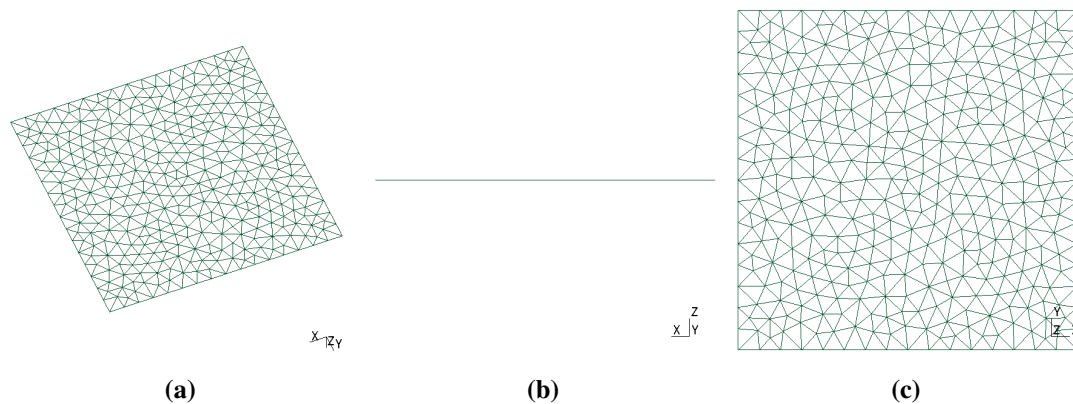


Figura D.2: Enmallado del cuadrado que evita la caída del material durante el ensayo de ángulo de reposo .

La configuración de la posición de la superficie cuadrada plana, se presentan en la tabla D.2. De tal forma que queda abajo del cilindro como una tapa para que el material granular no caiga.

Variable	Valor
Dxrueda	0.2
Dyrueda	-0.067
Dzrueda	0.06275

Tabla D.2: Configuración de las variables asociadas a la posición de la superficie cuadrada plana colocándola abajo del cilindro como tapa.

Recipiente.

Este enmallado corresponde a la base que recibe el material durante la calibración del ensayo de ángulo de reposo. La cantidad de vertices utilizada es 9564, en consecuencia se tienen 3188 elementos de malla dispuestos de forma que la zona donde se aprecian los elementos más finos es donde impactan las esferas que simulan el sólido a granel. La miniatura de la malla se puede apreciar en la figura D.3

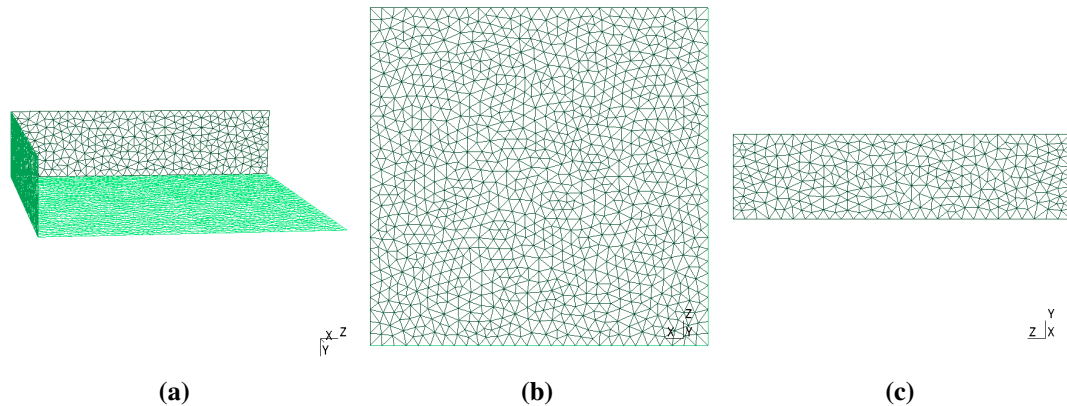


Figura D.3: Enmallado de la base que recibe el material en el ensayo de ángulo de reposo.

La configuración de la posición del recipiente que recibe el material granular, se presentan en la tabla D.3. De tal forma que queda abajo del cilindro.

Variable	Valor
Dxplaca	0.0
Dyplaca	-0.069
Dzplaca	0.26

Tabla D.3: Configuración de las variables asociadas a la posición del recipiente que recibe el material granular colocándolo abajo del cilindro.

Al final de la configuración, se muestra el conjunto resultante post-procesado para el ensayo del ángulo de reposo. Ver figura 5.4.

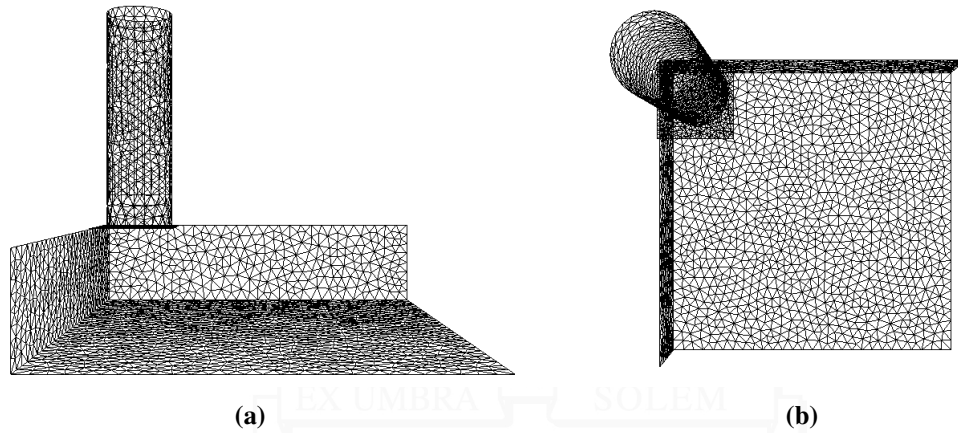


Figura D.4: Conjunto de las tres geometrías que representan el ensayo de la rueda de desgaste.

Luego se adapta la configuración del volumen de control para que el espacio de trabajo contenga el total de las partículas en la simulación. Estas se detallan en la tabla D.4.

Variable	Valor
Xiz	0.01
Xder	0.31
Yiz	-0.13
Yder	0.18
AlturaCorte	-0.015

Tabla D.4: Configuración del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.

Se puede ver en la figura D.5 el área de trabajo para el ensayo del ángulo de reposo.

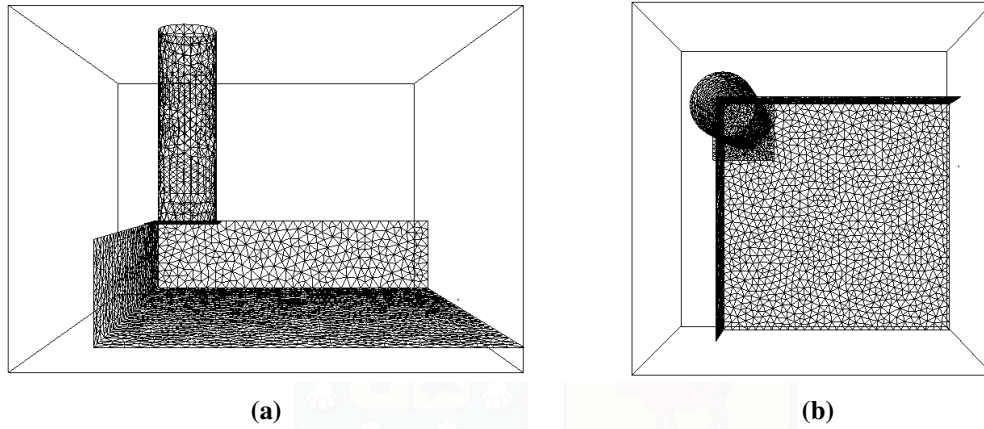


Figura D.5: Detalle del contorno del volumen de control para el ensayo de la rueda de desgaste.